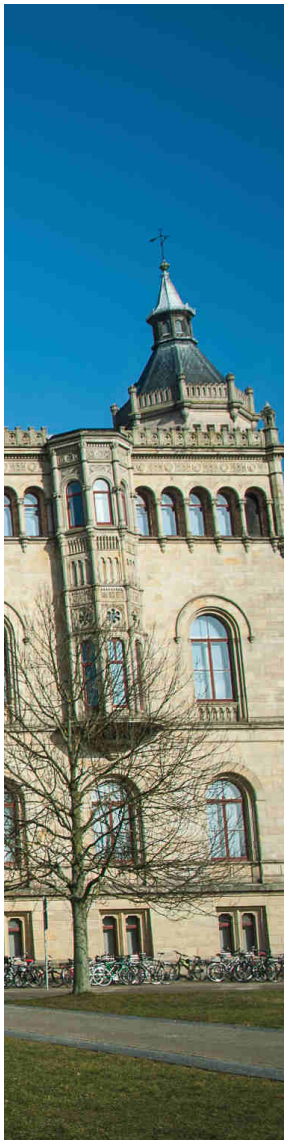
Institut für
Antriebssysteme und
Leistungselektronik

Leibniz
Universität
Hannover

Institutsbericht | Institute Report

2016/17/18



Institutsbericht

Antriebsregelung

Elektrische Antriebssysteme

Elektrische Maschinen

Leistungselektronik

Institute Report

Drive Control

Drive Systems

Electrical Machines

Power Electronics

Impressum | Imprint

Herausgeber | **Publisher:** Institut für Antriebsysteme und Leistungselektronik (IAL)

Geschäftsführung | **Management:** Prof. Dr.-Ing. Axel Mertens, Prof. Dr.-Ing. Bernd Ponick

Redaktion | **Editor:** IAL

Übersetzung | **Translation:** Dipl.-Fachübers. Petra Duensing

Fotos | **Photos:** IAL

©Alle Rechte sind vorbehalten. Insbesondere ist die Übernahme in maschinenlesbare Form sowie das Speichern in Informationssystemen, auch auszugsweise, nur mit schriftlicher Genehmigung des IAL gestattet.

All rights reserved. In particular transfer of data int omachine readable form as well as storage into information systems (even extracts) is only permitted with prior written consent by IAL.

Inhaltsverzeichnis | Table of Contents

Vorwort | **Preface** **4**

Forschung am IAL: Projektberichte | **Research at IAL: Project Reports** **6**

Elektrisch erregte Synchronmaschinen als Fahrantriebe
Electrically Excited Synchronous Machines as Traction Drives 6

Motorintegrierte Dämpfung von Spindelschwingungen
Motor-integrated Damping of Spindle Vibrations 8

Wicklungskopflose Turbogeneratoren mit Mehrphasentransformatoren in der Energieerzeugung
Turbo Generators without Winding Overhang Using Multiphase Transformers for Power Generation 10

Motoren mit extremer Drehmomentdichte
Motors with Extreme Torque Density 12

Radnabenantrieb ohne Reibungsbremse
Motors with Extreme Torque Density 14

Quasi Zwei-Level PWM Betrieb für modulare Multilevel Umrichter
Quasi Two-Level PWM Operation of Modular Multilevel Converter 16

Positionsgeberlose Regelung mit überabtastender Stromerfassung
Sensorless Control for Position Estimation Using Current Oversampling 18

Innovationscluster Leistungselektronik für Regenerative Energieversorgung
Innovation Cluster Power Electronics for Regenerative Energy Supply 20

Innovationscluster Leistungselektronik für Regenerative Energieversorgung
Innovation Cluster Power Electronics for Regenerative Energy Supply 22

Induktives Laden
Inductive Charging 24

Hochleistungs-DC/DC-Wandler für neuartige Offshore-Anwendungen mit SiC-Leistungshalbleitern
High-Power DC/DC Converters for New Offshore Applications with SiC Power Semiconductors . 26

Luftgekühlte Wide-Bandgap-Batterieladegeräte für Elektrofahrzeuge
Air-Cooled Wide Bandgap Battery Chargers for Electric Vehicles 28

Aggregierte Modelle für die Simulation von dynamischen Vorgängen in elektromechanischen Energiesystemen (AMSES)
Aggregate Models for the Simulation of Dynamic Processes in Electromechanical Power Systems (AMSES) 30

Bezahlbare Elektrische REIchweite durch ModularitäT (BEREIT)
Affordable Electrical Range by Modularity (BEREIT) 32

SFB 880 Grundlagen des Hochauftriebs künftiger Verkehrsflugzeuge
CRC 880 Fundamentals of Active High-Lift of Future Commercial Aircraft 34

Besondere Aktivitäten am IAL | **Special Activities at IAL** **36**

Neues in und von FEMAG
Novelties around FEMAG 36

Microgrid-Prüfstand
Microgrid Test Bench 38

HorsePower Hannover
HorsePower Hannover 40

Großprüfstände am IAL GeCoLab und AutomotiveLab
Large-Scale Test Benches at IAL GeCoLab and AutomotiveLab 42

Lehre am IAL | **Teaching at IAL** **46**

Lehrveranstaltungen
Lectures 46

Grundlagen der elektromagnetischen Energiewandlung
Basics of Electromagnetical Power Conversion 47

Elektrische Antriebe
Electric Drives 48

Berechnung elektrischer Maschinen
Theory of Electrical Machines 49

Elektrische Klein-, Servo- und Fahrzeugantriebe
Small Electrical Motors, Servo and Vehicle Drives 50
Elektrische Klein- und Servoantriebe *
Small Electrical Motors and Servo Drives * 51
Elektrische Antriebssysteme
Electrical Drive Systems 52
Leistungselektronik I
Power Electronics I 53
Leistungselektronik II
Power Electronics II 54
Einführung in das deutsche und europäische Energierecht
Introduction into German and European Energy Law 55
Leistungshalbleiter und Ansteuerungen
Power Semiconductors and Gate Drives 56
Regelung elektrischer Drehfeldmaschinen
Control of Electrical Three-phase Machines 57
Elektrische Bahnen und Fahrzeugantriebe
Electrical Traction and Vehicle Drives 58
Passive Komponenten der Leistungselektronik
Passive Components in Power Electronics 59
Wasserkraftgeneratoren
Hydrogenerators 60
Labor "Leistungselektronik"
Laboratory Exercise on Power Electronics 61
Labor „Elektrische Maschinen “
Laboratory Exercise on „Electrical Machines“ 62
Labor „Elektrische Antriebssystem “
Laboratory Exercise on „Electrical Drive Systems “ 63
Studentische Arbeiten 2016/17/18
Studentst' Theses 2016/17/18 64

Dissertationen 2016/17/18 | **Dissertations 2016/17/18** **78**
Das Stirnraumfeld und sein Einfluss auf Schlingströme bei Schenkelpolsynchronmaschinen
Magnetic Field of the End Winding Region and the Influence of Circulating Currents of Salient Pole Synchronous Machines 78
Elektrisch erregte Synchronmaschinen als Fahrantriebe
Electrically Excited Synchronous Machines as Traction Drives 80
Gestaltung und Analyse elektromagnetischer Kippaktoren
Design and Analysis of Electromagnetic Tilting Actuators 82
Dimensionierung motorintegrierter elektromagnetischer Aktoren zur Dämpfung von Rotorschwingungen
Dimensioning of Motor-Integrated Electromagnetic Actuators for Rotor Vibration Damping 84
Umrichterregelung für Windenergieanlagen in schwachen Netzen mit Resonanzen
Converter Control for Wind Turbines when Operating in Weak Grids Containing Resonances . . 86
Optimiertes multifunktionales bidirektionales Ladegerät für Elektrofahrzeuge
Optimized Multifunctional Bidirectional Charger for Electric Vehicles 88
Untersuchung der Stromverdrängung im Ständer hoch ausgenutzter elektrischer Maschinen
Study of the Current Displacement in the Stator of Highly Utilized Electrical Machines 90
Elektrische Antriebssysteme mit sehr hoher Drehmomentdichte für Elektro- und Hybridflugzeuge
Electrical Drive Systems with Ultra-high Torque Density for Electric and Hybrid Aircrafts 92
Analyse und Regelung einer Klasse von modularen Multilevelumrichter-Topologien
Analysis and Control of a Class of Modular Multilevel Converter Topologies 94
Online-Parameter-Identifikation von geregelten Antriebssystemen mit Umrichterspeisung
Online Parameter Estimation of Inverter-Fed Squirrel-Cage Induction Machines 96
Untersuchungen zum Einsatz von Siliziumcarbid-Leistungshalbleitern in Traktionsantriebsumrichtern
Investigations Concerning the Use of Silicon Carbide Power Semiconductors in Traction Drive Converters 98

Betriebsverhalten von Synchronmaschinen mit unsymmetrischer Ständerwicklung
Performance of Synchronous Machines with Unsymmetrical Stator Winding 100
Modulare und skalierbare mehrsträngige Antriebssysteme für Elektrofahrzeuge
Modular Scalable Multiphase Drive Systems for Electric Vehicles 102
Erweiterung von analytischen Verfahren zur Berechnung von Ummagnetisierungsverlusten in Drehfeldmaschinen
Enhancement of analytical calculation techniques for reversal magnetic losses in rotating field machines 104
Systemanalysen zur elektrischen Belastung von Wälzlagern bei umrichtergespeisten Motoren
System Analyses for the Electrical Load on Rolling Bearings of Converter-Fed Electric Motors . 106
Positionsgeberlose Regelung von permanentmagneterregten Synchronmaschinen bei kleinen Drehzahlen mit überabtastender Stromerfassung
Self-Sensing Control for Permanent Magnet Synchronous Machines in the Lower Speed Range Using Current Oversampling 108
Berührungslose Übertrager für elektrisch erregte Synchronmaschinen
Rotating Transformer for Electrically Excited Synchronous Machines 110
Beitrag zur Zustandsüberwachung von IGBT-Modulen mit temperatursensitiven Parametern
Contribution to Condition Monitoring of IGBT Modules with Temperature Sensitive Parameters . 112
Spannungsbasierte Verfahren zur Bestimmung der Rotorlage in permanentmagneterregten Synchronmaschinen ohne Lagegeber
Voltage-based Rotor Position Estimation Methods for Permanent Magnet Synchronous Machines without Angle Sensor 114
Doppelgeneratorsystem für Laufwasserkraftwerke
Double Generator System for Run-of-river Hydro-electric Power Plants 116

Das Institut | The Institute **118**
Mitarbeiter des IAL
IAL Staff 118
Chronik 2016/17/18
Chronicle 2016/17/18 132
Veröffentlichungen 2016/17/18
Publications 2016/17/18 145
Auszeichnungen 2016/17/18
Awards 2016/17/18 156

Vorwort | Preface

Liebe Freunde und Interessierte,
liebe Ehemalige und Angehörige des IAL,

ausnahmsweise blicken wir mit diesem Bericht auf drei Jahre zurück, die angefüllt waren mit vielen Projekten, wissenschaftlichen Erfolgen und vielen Ereignissen, die das lebendige Miteinander im IAL ausmachen. Das macht jedes Jahr viel Freude, und daraus beziehen wir und wahrscheinlich alle Angehörigen des IAL einen großen Teil unserer Motivation. Einen anderen Teil beziehen wir daraus, dass kein Jahr am IAL dem anderen gleicht. Jedes Mal stehen wir vor neuen Fragen und Herausforderungen. So konnte Prof. Mertens im Jahr 2016 nach einer relativ eingeschränkten Periode als Dekan wieder stärker an der wissenschaftlichen Arbeit des IAL mitwirken. Wir hatten bereits in 2015 sehr viele Beiträge für die EPE 2016 in Karlsruhe geplant, und erfreulicherweise wurden alle angenommen, so dass das IAL mit 17 Beiträgen die wohl stärkste Gruppe stellen konnte. Auch an weiteren Tagungen haben wir uns beteiligt, was in der Chronik und in der Liste der Veröffentlichungen nachzulesen ist. Außerdem wurde 2016 für uns zum Jahr der DFG-Anträge. Allein im Fachgebiet Leistungselektronik konnten vier davon eingereicht werden, dazu ein AiF-Antrag, der ähnlich aufwendig ist. Alle wurden in 2016 oder 2017 bewilligt - ein großer Erfolg. Auch in 2017 wurden vier DFG-Anträge eingereicht. Noch bedeutender war in 2017 die Antragstätigkeit bei den Bundesministerien, die mit großem Einsatz von den Oberingenieuren getragen wurde. Hier waren wir dank Dr. Steinbrink mit einem interessanten Projekt im Bereich der Windenergie erfolgreich, im Bereich der Elektromobilität sind es dank Dr. Meyer sogar drei gewichtige Projekte. Und im Jahr 2018 konnte durch die Beteiligung am erfolgreich bewilligten Exzellenzcluster SE^2A (Sustainable and Energy Efficient Aircraft) ein besonders prestigeträchtiger Erfolg errungen werden. Insgesamt können wir damit die Anzahl der Mitarbeiter auf hohem Niveau in etwa beibehalten. Dadurch bekommen auch sehr gute auswärtige Bewerbungen eine Chance, was sich bereits in der Internationalität unserer Promovierenden widerspiegelt. Besonders erfreulich war, dass wir zwei besonders geeignete Kandidaten für Juniorprofessuren an den beiden Fachgebieten finden konnten. So hat Jun.-Prof. Dr.-Ing. Amir Ebrahimi seine Juniorprofessur für Wasserkraftgeneratoren am Fachgebiet Elektrische Maschinen und Antriebssysteme zum 16.12.2017 angetreten, was durch eine Stiftung der Fa. Voith möglich wurde. Er wird zu einer hohen Auslastung unseres GeCoLab beitragen, welches wir im Januar 2016

Dear alumni, colleagues, partners and friends of the IAL,

Exceptionally, this report is a review of the last three years which have been filled with many projects, scientific achievements and numerous events reflecting the institute's spirit of togetherness. All this is giving us a lot of pleasure and that's from where probably all of us draw a large part of our motivation. Another source of motivation: No two years at the IAL are alike and we always have to face new challenges and scientific issues. In 2016, after a busy time as Dean, the aim of Prof Mertens was to re-intensify his active involvement in the scientific work of IAL. In 2015, we had already planned a lot of contributions for the EPE 2016 in Karlsruhe. Fortunately, all contributions were accepted, so that the IAL could participate with 17 papers, probably the largest group among all conference participants. All further conferences with IAL participation will be mentioned later in our chronicle and in the list of publications. In addition, 2016 turned out for us to be the year of DFG proposals. At IAL's Chair of Power Electronics alone, we submitted four proposals plus one AiF proposal, which is equally complex and time-consuming. All proposals were approved in 2016 and 2017, respectively - a great success to be proud of. In 2017, we submitted four further DFG proposals; the approvals are still pending. In 2017, even more proposals were submitted to the Federal Ministries, mainly supported by our senior engineers. Thanks to Dr Steinbrink, we have been successful in a very interesting wind energy project and, thanks to Dr Meyer, in three extensive projects related to electromobility. With our participation in the sucessfully approved Cluster of Excellence SE^2A (Sustainable and Energy Efficient Aircraft) in 2018, we could achieve a prestigious success of particular importance. In this way, we are able to keep the number of staff members approximately on the same high level, so that we can also welcome applications of excellent graduates from abroad. This is already visible when looking at our international team of researchers. In 2017, we luckily found two particularly outstanding candidates for junior professorships for the two chairs of our institute. On 16 December 2017, Jun.-Prof. Dr.-Ing. Amir Ebrahimi took up his Junior Professorship for Hydrogenerators, endowed by Voith and affiliated to our Chair of Electrical Machines and Drive Systems. One of his tasks will be to ensure a high utilization level of our GeCoLab, officially inaugurated in January 2016. On 1 January 2018, Jun.-Prof. Dr.-Ing. Jens Friebe took up his Junior Professorship in Passive

offiziell einweihen konnten. Seit 1.1.2018 bekleidet Jun.-Prof. Dr.-Ing. Jens Friebe die Juniorprofessur für Passive Komponenten der Leistungselektronik, womit wir den steigenden Anforderungen an das Schaltungsumfeld der neuen Leistungshalbleiter aus SiC und GaN begegnen wollen. Diese Stelle wird aus Mitteln des niedersächsischen MWK finanziert. In beiden Fällen konnte eine personelle Ausstattung mit wissenschaftlichen Mitarbeitern bereitgestellt werden, was bei Juniorprofessuren außergewöhnlich ist. Die beiden neuen Kollegen stellen sich in dieser Broschüre noch ausführlicher selbst vor. Wir erwarten nicht zuletzt aufgrund dieser Verstärkung für 2019 und 2020 eine weitere positive Entwicklung des IAL. Dazu wurden unsere letzten Ausbaureserven an Räumlichkeiten aktiviert: Der Flur vor dem Labor für die Studierenden wurde zum Rechnerraum ausgebaut und zum Jahreswechsel 17/18 bezogen. Dadurch wird auch im Labor mehr Platz geschaffen. Für die Zukunft haben wir die Zusage, dass wir ende 2020 in unserem Gebäudeflügel des Welfenschlosses oberhalb unserer Büros weitere Räume beziehen können. Und nicht zuletzt waren 2017 und 2018 am IAL die Jahre der Promotionen. So konnten im Berichtszeitraum 21 Promotionsverfahren zum Abschluss gebracht werden, davon 10 allein im Jahr 2017. Damit sind wir auch in dieser Hinsicht zum stärksten Institut der Fakultät geworden, in der es in 2017 insgesamt 26 Promotionen zum Dr.-Ing. gab. Eine Fortsetzung dieser erfreulichen Entwicklung auch in den folgenden Jahren ist bereits absehbar. Die Zeichen stehen also bestens für weitere erfolgreiche Jahre am IAL, auf die wir uns gemeinsam mit Ihnen sehr freuen.

Hannover, im Dezember 2018

Components for Power Electronics, preparing us to face the increasing demands regarding the circuit environment of the new SiC and GaN power semiconductors. This junior professorship is financed by the Lower Saxony Ministry of Science and Culture. In both cases, resources for research associates were granted, which is unusual in the case of junior professorships. Our new colleagues will introduce themselves in detail later in this report. Not least because of this enhancement, we are expecting the institute's positive development to be continued in 2019 and 2020. This in mind, we have already been activating our last space capacities: The corridor in front of the student laboratory was changed into a computer room and was to move in by early 2018. This leaves more space in the lab. Moreover, we have been promised that we can move into additional premises located in the same wing of the Guelph Castle on the upper floors of the IAL building approx. in 2020. Last but not least, 2017 and 2018 can be called the years of doctorates at the IAL. We could award 21 doctorates in the reporting period, 10 alone in 2017. With a total of 26 Dr.-Ing. degrees awarded from 28 chairs within the faculty in 2017, it makes us the strongest institute of the faculty. To be continued in the next year! As you can see, all signs are pointing to the institute's continued success and we are looking forward to sharing it with you.

Hannover, December 2018

Forschung am IAL: Projektberichte
Research at IAL: Project Reports

Elektrisch erregte Synchronmaschinen als Fahrantriebe

von Dipl.-Ing. Jonathan Jürgens und M.Sc. Björn Berweiler

Bei der Entwicklung von elektrischen Antriebssystemen für die New Energy Vehicles, also rein batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) und Plug-In-Hybride (HEV), gilt es, einen sinnvollen Kompromiss zwischen der Performance, dem Bauraum, den Rohstoff- und Produktionskosten sowie der Lebensdauer zu finden. Entscheidend ins Gewicht fällt dabei die Auswahl der elektrischen Maschinenart, die nicht nur den obengenannten Anforderungen unterliegt, sondern auch direkte Auswirkung auf die Umrichter-, Batterie- und Kühlkreisdimensionierung hat. Aufgrund der hohen Leistungsdichte, sehr guter Fahrzykluswirkungsgrade und der im Allgemeinen ausreichenden Kühlung des Stators, dominiert aktuell die permanentmagneterregte Synchronmaschine (PMSM) den Markt. Nachteilig hingegen sind die hohen und zeitweise volatilen Rohstoffpreise für die Permanentmagnete sowie die wirtschaftliche Abhängigkeit von China, das den Markt der notwendigen Seltenerdmetalle quasi allein beherrscht. Als Alternative zur PMSM untersucht das IAL in Zusammenarbeit mit der Automobilindustrie die Eignung elektrisch erregter Synchronmaschinen (ESM) als Fahrantriebe (Fig. 0.1).

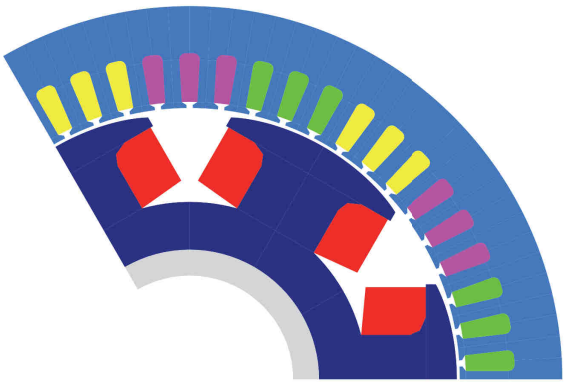


Fig. 0.1: 2D-FEM-Modell einer ESM mit Schenkelpolen für einen Achsantrieb
2D FEM model of a salient-pole ESM used as an axle drive

Die Vorteile einer steuerbaren Erregung sind die sehr guten Wirkungsgrade im gesamten Arbeitsbereich und der Wegfall der hohen Magnetkosten

Electrically Excited Synchronous Machines as Traction Drives

by Dipl.-Ing. Jonathan Jürgens and M.Sc. Björn Berweiler

The development of electrical drive systems for New Energy Vehicles, i.e. battery electric vehicles (BEV) and plug-in hybrid electric vehicles (HEV), requires a reasonable compromise between performance, installation space, raw material and production costs as well as lifetime. A decisive factor is the choice of the electrical machine type, which is not only subject to the aforementioned requirements, but has also immediate effect on the inverter, battery and cooling circuit design. Thanks to high power density, excellent driving cycle efficiencies and the usually sufficient stator cooling, permanent magnet synchronous machines (PMSM) are currently dominating the market. However, the disadvantages include high and sometimes volatile raw material prices for the permanent magnets and the economic dependence on China, which practically dominates the rare earth metal market. In cooperation with the automotive industry, IAL is investigating, as an alternative to PMSM, the suitability of electrically excited synchronous machines (ESM) for use as traction drives (Fig. 0.1). The advantages of controllable excitation include excellent efficiencies over the entire operating range, no need for magnets and thus no economic dependence, facilitating better strategic planning for suppliers and OEMs. Compared to PMSM and induction machines (IM), another advantage of appropriately designed ESM is that they are operable with a power factor near one over a wide operating range and especially at maximum in the constant power range. In combination with excellent efficiencies, this inherently leads to highest utilization of the total provided output power , i.e. the sum of the inverter's apparent and the excitation power, compared to the other two machine types (Fig. 0.2). ESM meet temporary requirements at maximum speed due to the field winding's high thermal capacity. However, at high speeds, mechanical strength can only be ensured with higher development and construction efforts compared to PMSM and IM. In addition, the continuous power requirements pose a great design challenge. Just for relatively small continuous power densities, it is possible to use air-cooled field windings (cf. ESM of Renault Zoe R90). In case of larger performance re-

sowie der wirtschaftlichen Abhängigkeit auch zur langfristig besseren strategischen Planbarkeit der Zulieferer und OEMs. Ein weiterer Vorteil gegenüber PMSM und Induktionsmaschinen (IM) besteht bei geeigneter Dimensionierung darin, dass die ESM in weiten Teilen des Arbeitsbereichs und insbesondere an der Grenzkennlinie im Konstantleistungsbereich mit einem Leistungsfaktor nahe eins betrieben werden kann. Dies führt in Kombination mit sehr guten Wirkungsgraden prinzipbedingt zur besten Ausnutzung der maximalen Ausgangsleistung, d.h. der Summe aus Umrichterscheinleistung und Erregerleistung, im Vergleich zu den anderen beiden Maschinenarten (Fig. 0.2). Die Erfüllung der Kurzzeitanforderungen bei maximaler Beschleunigung wird bei der ESM durch die hohe thermische Kapazität der Erregerwicklung begünstigt. Jedoch ist für die Sicherstellung der mechanischen Festigkeit bei hohen Drehzahlen ein erhöhter Entwicklungs- und Konstruktionsaufwand gegenüber der PMSM und der IM notwendig. Ebenso stellt die Dauerleistungsanforderung eine große Herausforderung bei der Dimensionierung dar. Nur für relativ kleine Dauerleistungsdichten ist es möglich, eine reine Luftkühlung der Erregerwicklung vorzusehen (vgl. ESM des Renault Zoe R90). Bei größeren Anforderungen muss eine geeignete Wasser-Glykol- oder Ölkühlung des Rotors zur Wärmeabfuhr berücksichtigt werden. In den vergangenen Jahren wurden zu diesen Themen im Rahmen von Abschlussarbeiten und Dissertationen geeignete Dimensionierungsregeln unter Berücksichtigung der elektromagnetischen Ausnutzung, der strukturmechanischen Belastung sowie des thermischen Verhaltens mit größtenteils selbst erstellten Softwaretoolketten erarbeitet. Die experimentelle Validierung dieser Ergebnisse anhand von Prüfstandsmessungen sind Bestandteil aktueller Projekte. In diesem Zusammenhang wurden und werden auch innovative Konzepte untersucht, die z.B. die Bewertung von ESM für Radnabenanwendungen (Fig. 0.3), sechssträngige Konzepte sowie die Dimensionierung von berührungslosen Übertragern als Ersatz für die Schleifringsysteme umfassen. Das Ziel ist eine ganzheitliche (Antriebs-)Systembetrachtung und -bewertung bei Verwendung von ESM als Fahrantriebe für Elektrofahrzeuge.

quirements, an adequate water glycol or oil cooling of the rotor must be employed for heat dissipation. In the last years, these topics have been dealt with in final theses and doctoral theses. The aim was to prepare applicable design rules with mostly self-developed software tool chains, considering electromagnetic utilization, structural mechanics stress and thermal behaviour. In current projects, the research results are experimentally validated on a test bench. In this context, research was and will be focused also on innovative concepts, e.g. the evaluation of ESM for wheel hub applications (Fig. 0.3), six-phase concepts and the design of brushless excitation systems replacing slip-ring systems. The goal is to analyse and evaluate the complete (drive) system when using an ESM as a traction drive in electric vehicles.

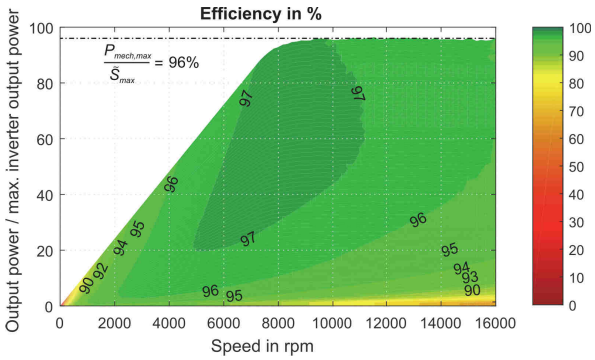


Fig. 0.2: Wirkungsgradkennfeld einer ESM für einen Achsantrieb in Abhängigkeit von der Drehzahl
Efficiency map of an ESM used as an axle drive

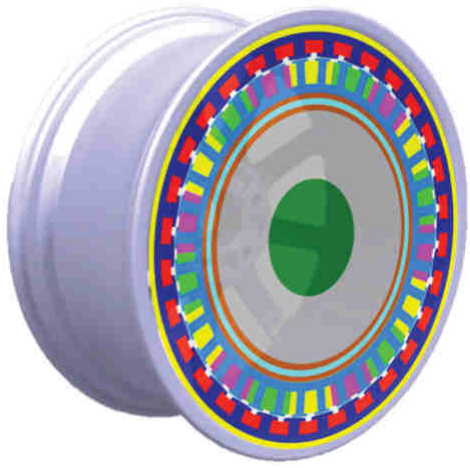


Fig. 0.3: Konzept eines ESM-Radnabenantriebs
Concept of an ESM wheel hub drive

Motorintegrierte Dämpfung von Spindelschwingungen

von M.Sc. Jan Königsberg

Gegenstand der Untersuchungen ist ein vollständig integriertes Aktorsystem zur Reduzierung von Ratterschwingungen in Spindelantrieben. Ratterschwingungen reduzieren die Werkstückqualität und die Werkzeugstandzeit, und sie können einen ungeplanten Maschinenstillstand hervorrufen und eine Gefährdung durch Werkzeugversagen darstellen. Insbesondere für instabile Prozesse mit lang auskragenden Werkzeugen, bei denen die maximale Motorleistung häufig nicht abgerufen werden kann, ist eine aktiv gedämpfte Spindel interessant. In Zusammenarbeit mit dem Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW) wird in einem durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft geförderten Projekt ein neuartiger Spindelprototyp in ein Seriengehäuse integriert. Ziel ist es, hierfür ein neues Aktivteil zu gestalten. Ein schematischer Aufbau des Aktivteils ist in Fig. 0.5 dargestellt. Es handelt sich um eine permanenterregte Synchronmaschine mit v-förmig vergrabenen Magneten. Das aktive Dämpfungssystem besteht aus drei voneinander unabhängigen elektromagnetischen Aktoren. Deren Wicklungen werden in die Nuten des Stators integriert und erstrecken sich jeweils über ein Drittel des Maschinenumfangs. Die Wirkung der Aktoren ist einem aktiven Magnetlager ähnlich. Der bedeutendste Unterschied besteht in dem von Motor und Dämpfungsaktoren gemeinsam genutzten, magnetischen Kreis. In der axialen Mitte des Rotors ist ein nichtmagnetischer Messring angeordnet zur Erfassung der Rotorauslenkung mittels Wirbelstromsensoren. Die drei Wirbelstromsensoren, die jeweils um $120°$ versetzt sind, werden in Bohrungen in den Statorzähnen montiert.

Gegenüber einer permanenterregten Synchronmaschine mit Oberflächenmagneten ist der magnetisch wirksame Luftspalt der vorgestellten Anordnung geringer. Hierdurch können höhere Radialkräfte erreicht werden. Zudem ist das Magnetmaterial durch die Integration in das Rotorblechpaket besser gegen Entmagnetisierung geschützt. Die radialen Zugkräfte werden durch die maxwellsche Grenzflächenkraft erzeugt, die an der Grenze zweier Materialien mit unterschiedlicher Permeabilität stets zum niederpermeablen Material, daher zum Luftspalt hin, gerichtet sind. Die Überlagerung des Hauptfelds (Drehfeld) und des Aktorfelds (Wechselfeld) erzeugt eine Abhängigkeit der Radialkraft von der Rotorposition. Fig. 0.4 zeigt die Radialkraft über einer Rotorumdrehung bei konstanter Bestromung eines Aktors. Es sind je drei Maxima und Minima entsprechend der Polpaarzahl p=3 zu erkennen. Eine weitere Besonderheit ist die Möglichkeit, den Rotor anzuziehen

Motor-integrated Damping of Spindle Vibrations

by M.Sc. Jan Königsberg

The object of investigation is a fully integrated actuator system to reduce chatter vibrations in spindle drives. Chatter vibrations deteriorate tool quality and tool life quantity. Moreover, they can cause unplanned machine breakdown and tool failure. Active spindle damping is interesting especially in case of instable processes with tools having large overhangs which are often not able to use maximum motor power.

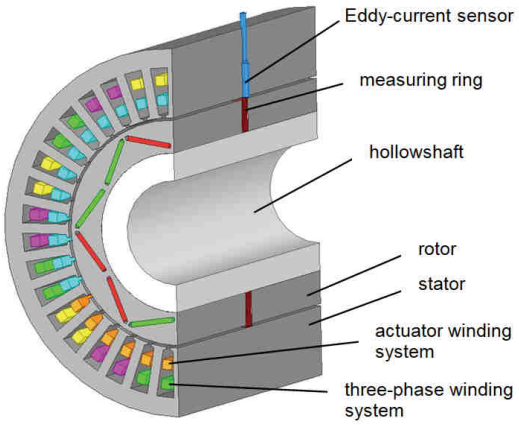


Fig. 0.5: Modell einer Spindel mit vollständig integriertem Aktorsystem
Spindle model with fully integrated actuator system

Within the scope of a research project funded by the German Research Foundation and conducted in cooperation with the Institute of Production Engineering and Machine Tools (IFW), a novel spindle prototype is integrated into a standard housing. The project aim is to design a new active part. The schematic structure of the active part is depicted in Fig. 0.5. It is a permanent magnet synchronous machine with v-shaped buried magnets. The active damping system consists of three independent electromagnetic actuators. Their windings are integrated into the stator slots along one third of the machine circumference. The actuators act like an active magnetic bearing. The greatest difference is the magnetic circuit jointly used by the motor and the damping actuators. A non-magnetic measuring ring placed in the axial rotor centre measures the rotor deflection by means of eddy-current sensors. Three eddy-current sensors shifted by $120°$ are mounted in bores in the stator teeth. Compared to permanent magnet synchronous machines with surface-mounted magnets, the magnetic air gap of the proposed design is smaller. This way, higher radial forces are possible. In addition, the integration

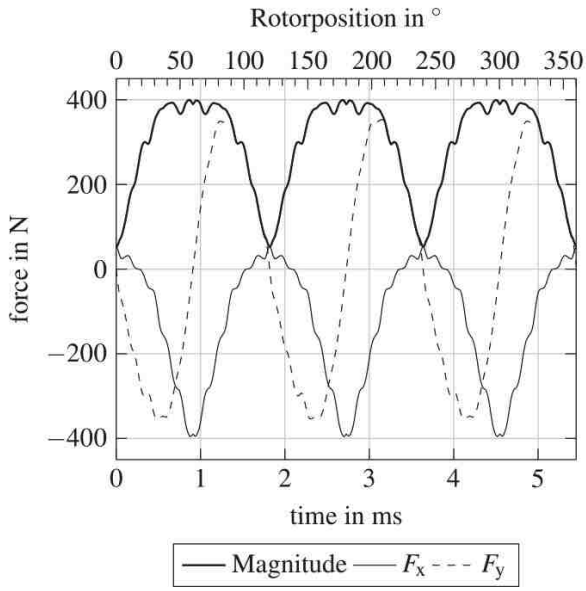


Fig. 0.4: Radialkraft über einer Rotorumdrehung bei konstanter Bestromung eines Aktors
Radial force over one rotor revolution with constantly excited actuator

und wegzudrücken. Ein Drücken ist für einen Elektromagneten üblicherweise nicht möglich und wird in diesem Fall dadurch erreicht, dass das Hauptfeld unter einem Aktor lokal geschwächt werden kann. Auf der gegenüberliegenden Seite der Bohrung entsteht hierdurch eine Zugkraft.
Für die Berechnung des gemeinsamen Betriebsverhaltens von Aktor und Antrieb wird aufgrund der unsymmetrischen Sättigung des magnetischen Kreises und der transienten Betriebscharakteristik ein transientes FEM-Modell verwendet. Die maximal erreichbare Kraft eines Aktors liegt bei einer Blechpaketlänge von 154 mm bei ca. 550N und erreicht ihr Maximum bei Vollaussteuerung nach $170\mu s$. Die Leistungseinbußen des Antriebs durch die Integration des Aktorsystems sind vom Verhältnis der Leiterfläche zwischen Antrieb und Aktor in einer Nut abhängig. Diese Einbuße fällt jedoch praktisch nicht ins Gewicht, da die maximale Zerspanleistung meist nicht durch die maximale Antriebsleistung begrenzt ist, sondern durch die Stabilität des Zerspanprozesses selbst. Diese Stabilität kann durch die aktive Schwingungsdämpfung mittels des Aktorsystems entscheidend erhöht werden.

into the rotor core protects the magnetic material more reliably against demagnetization. The radial traction forces are generated by the Maxwell boundary force. At the boundary of two materials with different permeability, they are always oriented in the direction of the low-permeable material, i.e. towards the air gap. The superposition of fundamental field (rotating field) and actuator field (alternating field) results in a dependency of the radial force from the rotor position. Fig. 0.4 shows the radial force over one rotor revolution with constantly excited actuator. According to the number of pole pairs p=3, three maxima and three minima can be observed. Moreover, rotor attraction as well as repulsion is possible. Repulsion of electromagnets is normally not possible. Here, it is achieved by locally dampening the fundamental field below the actuator. This generates a traction force on the opposite side of the bore. Due to the asymmetrical saturation of the magnetic circuit and the transient operating characteristics, a transient FEM model is used to calculate the performance of actuator and drive. The maximum achievable force of an actuator is approx. 550 N at a core length of 154 mm and reaches its maximum at full modulation after 170 ţs. The power losses of the drive resulting from the integrated actuator system depend on the relationship of the conductor cross-section area between drive and actuator in a slot. However, the losses are negligibly small, since the maximum cutting performance is mostly not limited by the maximum driving power, but by the stability of the cutting process itself. This stability can be increased considerably by active vibration damping using the actuator system.

Wicklungskopflose Turbogeneratoren mit Mehrphasentransformatoren in der Energieerzeugung

von Dipl.-Ing. Henrik Schroeder

Für die Erzeugung von elektrischer Energie werden in Atom-, Kohle- und Gaskraftwerken Turbogeneratoren mit einer Leistung zwischen 30 und 2000 MVA eingesetzt. Im Vergleich zu hochpoligen Generatoren, wie sie beispielsweise in Wasserkraftwerken eingesetzt werden, hat der Wicklungskopf eines zwei- oder vierpoligen Turbogenerators eine erhebliche axiale Länge. Die weite Ausladung und die geringe Steifigkeit des Leitermaterials machen den Wicklungskopf anfällig gegenüber Schwingungsanregungen, die im ungestörten Betrieb und insbesondere bei transienten Ausgleichsvorgängen auftreten. So treten im Kurzschluss Stromkräfte auf, welche die Kräfte des ungestörten Bemessungsbetriebs um das bis zu 150fache übersteigen. Die Dimensionierung der Stützkonstruktion der Wicklungsköpfe ist mit großen Unsicherheiten bezüglich der Materialbelastung verknüpft. Außerdem sind Wicklungsköpfe auch anfällig für mechanische Schwingungen im normalen Betrieb. Mit dem Konzept des wicklungskopflosen Turbogenerators könnten die Kosten für den Wicklungskopf reduziert werden. Anstelle des konventionellen Wicklungskopfes verbindet ein Kurzschlussring alle Leiter der Ständerwicklung auf einer Seite des Generators (Fig. 0.6). Daraus folgt, dass sich in der Ständerwicklung ein Drehspannungssystem ausbildet, dessen Strangzahl der Zahl der Nuten je Polteilung entspricht. Um einen solchen mehrsträngigen Generator mit dem Energieversorgungsnetz verbinden zu können, wird ein Mehrphasen-transformator (Fig. 0.7) eingesetzt, der sowohl die Funktion des Maschinentransformators erfüllt als auch das mehrsträngige Drehspannungssystem in ein dreisträngiges System transformiert. Um die Komplexität des Mehrphasentransformators zu reduzieren, ist bei der Dimensionierung des Generators eine möglichst geringe Ständernutzahl zu wählen. Aufgrund der konzeptbedingten Parallelschaltung aller Teilleiter einer Nut ergibt sich im Generator eine Einlochwicklung, deren Wicklungsfaktor für alle Wicklungsfelder gleich eins ist.

Daraus folgt, dass der wicklungskopflose Generator bei gleicher Leistung ein geringeres Bauvolumen benötigt als Generatoren mit einer verteilten Wicklung. Jedoch entfällt die Filterwirkung einer verteilten Wicklung bzgl. der Wicklungsoberfelder, sodass höhere Ummagnetisierungsverluste auf der Läuferoberfläche entstehen und Stromoberschwingungen mit erheblicher Amplitude in den Strangströmen

Turbo Generators without Winding Overhang Using Multiphase Transformers for Power Generation

by Dipl.-Ing. Henrik Schroeder

In nuclear, coal- and gas-fired power plants, turbo generators with a power ranging from 30 to 2000 MVA are used for the generation of electric power. Compared to multipole generators as they are used in hydropower plants, a two- or four-pole turbo generator has a considerably longer axial winding overhang. The large overhang and low stiffness of the conductive material makes the end winding prone to vibrations excited during normal operation and especially in case of transient phenomena. During short-circuit operation, the electrodynamic forces are up to 150 times higher compared to normal operation at rated power. With respect to material load, there are large uncertainties when designing the winding overhang support. Moreover, end windings are also prone to mechanical vibrations occurring during normal operation. The turbo generator concept without winding overhang could reduce cost considerably. Instead of the conventional winding overhang, a short-circuit ring connects all the conductors of the stator winding on one generator side (Fig. 0.6). The result is a multiphase system in the stator winding whose number of phases equals the number of slots per pole pitch. To connect such kind of multiphase generator to the grid, a multiphase transformer (Fig. 0.7) is used, which assumes the function of a machine transformer and also transforms the multiphase system into a three-phase system. To reduce the complexity of the multiphase transformer, the generator's number of slots in the stator has to be as small as possible. The concept prescribes that all strands in a slot are switched in parallel, resulting in a winding with one slot per pole and per phase in the generator and a winding factor equal to one for all winding fields. For the same power, a generator without winding overhang thus requires less installation space than a generator with distributed winding. However, without the filtering effect of a distributed winding eliminating the spatial harmonics of the winding field, higher eddy-current losses on the rotor surface and current harmonic components with large amplitude in the phase currents might occur. However, the harmonics in the multiphase transformer cancel each other out, so that the harmonic content on the transformer's grid side is low. To reduce additional losses caused by current harmonic components in the generator, the ampere conductors per unit length of the rotor can be stepped by selecting different numbers of turns per rotor slot or by varying their distance.

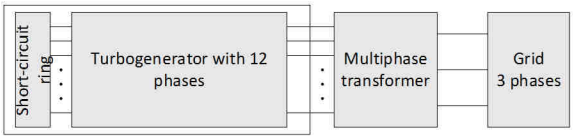


Fig. 0.6: Systemübersicht
System overview

auftreten können. Die Oberschwingungen löschen sich jedoch im Mehrphasentransformator gegenseitig aus, sodass der Oberschwingungsgehalt auf der Netzseite des Transformators gering ist. Um zusätzliche Verluste aufgrund von Stromoberschwingungen im Generator zu reduzieren, kann der Strombelag des Läufers treppenförmig gestaltet werden, indem unterschiedliche Windungszahlen je Läufernut ausgeführt werden oder deren Abstand variiert wird. Des Weiteren ergibt sich aus dem Konzept eine geringe spannungshaltende Windungszahl. Jeder Strang des Generators besteht aus einer Windung, sodass die Klemmenspannung des wicklungskopflosen Generators erheblich geringer ist als bei Generatoren mit einer verteilten Wicklung. Die Dicke der Wicklungsisolation kann folglich reduziert werden. Der verfügbare Platz in den Nuten kann z.B. für eine direkte Leiterkühlung genutzt werden, indem kühlgasdurchströmte Hohlrohre in die Nuten eingebracht werden. Diese führen die Stromwärmeverluste der Ständerwicklung direkt von der Leiteroberfläche ab und verbessern die Entwärmung des Ständerblechpakets. Dadurch kann die Stromdichte in der Ständerwicklung gesteigert und so das Bauvolumen weiter reduziert werden.

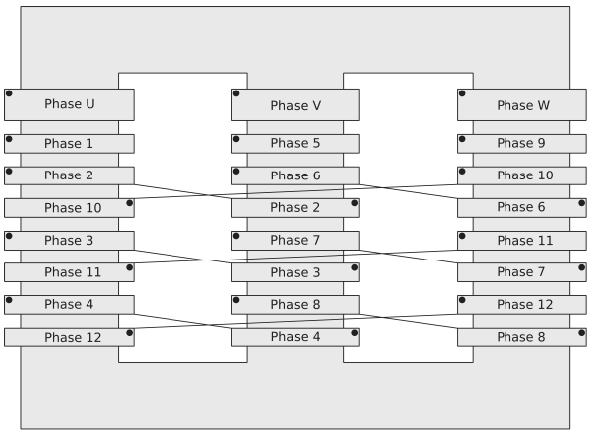


Fig. 0.7: Mehrphasentrafo
Multiphase transformer

Moreover, the new concept implies a small number of effective turns per phase. Each generator phase consists of one winding, so that the terminal voltage of the generator without winding overhang is considerably lower than in case of generators with distributed winding. Thus, the winding insulation can be thinned. The space available in the slots can for example be used for direct conductor cooling by integrating hollow tubes into the slots which are cooled by cooling gas. Their task is to dissipate I^2R losses of the stator winding away from the conductor surface and to improve the cooling down of the stator core. By this means, the current density in the stator winding can be increased which further reduces the required installation space.

Motoren mit extremer Drehmomentdichte

von M.Sc. Constantin Wohlers

Am IAL werden derzeit eine Methodik sowie die Randbedingungen und Grenzen für den Entwurf und den Einsatz von Elektroantrieben erforscht, bei denen durch eine direkte, aber vergleichsweise einfach realisierbare Flüssigkeitskühlung der Ständerwicklung eine weit über den Stand der Technik hinausgehende Stromdichte und damit Drehmomentdichte ermöglicht wird. Dazu sollen vor allem die folgenden Fragen geklärt werden:

- Bis zu welcher Grenze ist eine Erhöhung der Stromdichte überhaupt sinnvoll?
- Wie groSS sind Masse und Volumen derartiger Antriebssysteme im Vergleich zu Hydraulikmotoren?
- Welcher Systemwirkungsgrad lässt sich erreichen?
- Welche Dimensionierungs- und Gestaltungsregeln sind einzuhalten (z.B. Entmagnetisierungsgefahr der PM bei zu hohem Strombelag)?
- Wie sollte das Kühlsystem konkreter Antriebe dimensioniert werden (Durchflussmenge, Kühlmedium, Kühlmittelpumpe)?

Dabei sollen auch die Wechselwirkungen zwischen Maschinenentwurf und Frequenzumrichter betrachtet werden (Systemoptimierung). Aktuell liegt der Fokus auf permanenterregten Synchronmaschinen mit Zahnspulenwicklung. Eine direkte Leiterkühlung mit entionisiertem Wasser ist bei Großgeneratoren oberhalb von ca. 700 MVA seit langem Stand der Technik, da es dort die einzige technische Möglichkeit ist, die absolut hohen Verlustleistungen bei der gleichzeitig bis zu 10 mm und mehr dicken Isolierung abzuführen, und da der Aufwand für die Kühlwasseraufbereitung angesichts der hohen Gesamtleistung noch wirtschaftlich ist. Der Ansatz, der am IAL verfolgt wird, sieht Kühlkanäle in jedem einzelnen Leiter der Spule vor, sodass ein direkter Kontakt zwischen der Wärmequelle und dem Kühlmedium besteht. Durch eine generative Herstellung der Spulen (Guss oder additive Fertigung) können auSSerdem höhere Nutfüllfaktoren im Vergleich zu Runddrahtwicklungen erreicht werden. Als Kühlmedium werden dabei Silikonöle eingesetzt, die unbrennbar und ungiftig sind; alternativ kann auch das Reaktionswasser von Brennstoffzellen verwendet werden. Untersuchungen an Versuchsgeometrien, bestehend aus am IFAM gegossenen Kupferspulen, haben gezeigt, dass auf diese Weise stationär Stromdichten von über $100 A/mm^2$ möglich

Motors with Extreme Torque Density

by M.Sc. Constantin Wohlers

IAL researchers are currently investigating a methodology as well as the boundary conditions and limits for the design and application of electrical machines. By the use of an easily feasible direct liquid cooling of the stator winding, it is possible to achieve current densities and thus torque densities which go far beyond the state of the art. Current research is especially dealing with the following questions:

- Which is the reasonable limit for current density increase?
- How large are mass and volume of this type of motors compared to hydraulic ones?
- Which system efficiency is achievable?
- Which dimensioning and design rules have to be observed (e.g. risk of demagnetization of PMs in case of excessive ampere turns)?
- How should the cooling system be designed for specific motors (flow rate, coolant, coolant pump)?

The aim is also to investigate the interactions between motor design and frequency converter (system optimization). The current focus is on permanent magnet synchronous machines with tooth-coil winding. In large-scale generators above 700 MVA, direct liquid cooling with deionized water has already been state of the art for a long time, since it is the only technical possibility to dissipate high power losses, while the insulation is up to 10 mm and higher. Moreover, the effort for cooling water treatment is still economic due to the high overall power. The approach pursued at IAL uses cooling channels in each conductor of the coil. This enables a direct contact between heat source and coolant. Furthermore, with additively manufactured or cast coils, higher slot space factors can be achieved compared to round-wire windings. The coolants are non-combustible, non-toxic silicone oils. Alternatively, the water produced in fuel cells can be used. Measurements on test geometries using copper coils cast at IFAM showed that steady-state current densities of more than $100 A/mm^2$ are possible without exceeding $180°$C coil temperature at $30°$C coolant temperature. The project aim is to redesign the active part of an existing sample motor to make use of such high current densities. In an iterative process, the geometric and winding parameters are modified systematically to obtain maximum torque, preferably without demagnetization and few additional losses caused by current displacement in the

sind, ohne bei einer Kühlmitteltemperatur von 30°C eine Spulentemperatur von 180°C zu überschreiten. Im Rahmen der Arbeit wird, ausgehend von einem existierenden Beispielantrieb, eine Nachgestaltung des Aktivteils für den Einsatz hoher Stromdichten vorgenommen. In einem iterativen Prozess werden Geometrie- und Wicklungsparameter systematisch verändert, um ein maximales Drehmoment möglichst ohne Entmagnetisierung und bei wenig zusätzlichen Verlusten durch Stromverdrängung innerhalb der Leiter zu erreichen. Ein Vergleich bei 1000 1/min zwischen dem ursprünglichen Antrieb mit Runddrahtwicklung sowie bei Einsatz von gegossenen Spulen mit direkter Leiterkühlung ohne geometrische Veränderungen und dem für den Einsatz hoher Stromdichten verbesserten Entwurf ist in Fig. 0.8 und Fig. 0.9 zu sehen. Die Drehmomentdichte lässt sich dabei - je nach akzeptabler Wirkungsgradeinbuße - auf das Drei- bis Fünffache erhöhen.

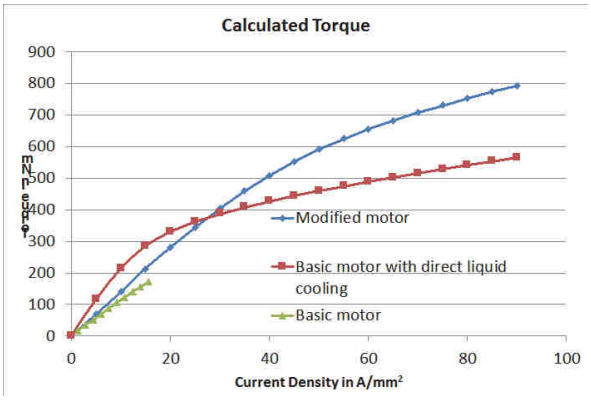


Fig. 0.8: Drehmoment in Abhängigkeit von der Stromdichte
Torque subject to current density

conductors. Fig. 0.8 and Fig. 0.9 show a comparison between a basic motor with round-wire winding, one with cast coils and direct liquid cooling without geometric modifications and the improved motor design to make use of higher current densities. Torque density is thus increasable by a factor of three to five depending on the acceptable loss of efficiency.

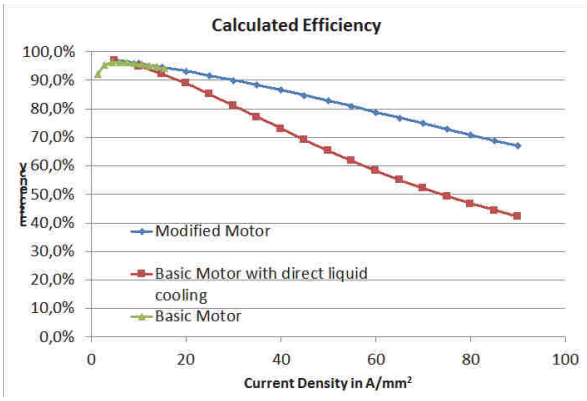


Fig. 0.9: Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Stromdichte
Efficiency subject to current density

Radnabenantrieb ohne Reibungsbremse

von Dipl.-Ing. Tobias Krone
und Dipl.-Ing. Fabian Oelkers

Elektrofahrzeuge mit Radnabenantrieben bieten erstmalig die Chance, vollständig ohne ein mechanisches Reibungsbremssystem auszukommen. Dies liegt darin begründet, dass diese Antriebe die nötige Bremsleistung elektrisch bereitstellen können und gleichzeitig eine radindividuelle, unabhängige Regelung des Drehmoments erlauben. Für das rein elektrische Bremsen ist neben der Batterie eine alternative Energiesenke, z. B. in Form eines Bremswiderstands, erforderlich, da die Batterie nicht in jedem Fall die gesamte Bremsenergie sicher aufnehmen kann. Gemeinsam mit Continental, Ford, Fraunhofer IFAM und Schaeffler entsteht im Verbundvorhaben RABBIT ein Fahrzeug mit Radnabenantrieben ohne Reibungsbremse an der Hinterachse. Fig. 0.10 zeigt die Struktur des elektrischen Antriebsstrangs mit einem Bremswiderstand als alternative Energiesenke [1].

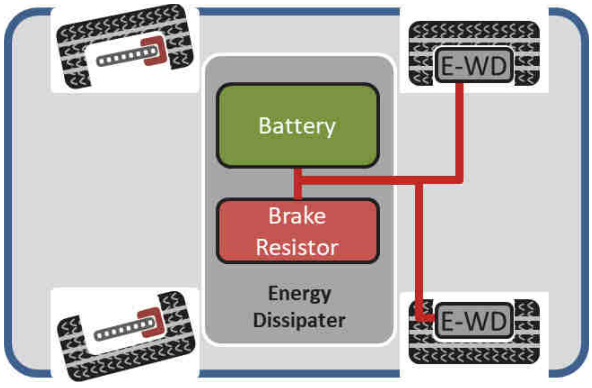


Fig. 0.10: Struktur des Antriebsstrangs
Power train structure

Schwerpunkt des IAL ist der Aufbau eines fehlertoleranten Antriebswechselrichters für die Radnabenantriebe [2] und die Entwicklung von beobachterbasierten Fehlererkennungs- und Fehlerbehandlungssystemen, aufbauend auf dem Vorgängerprojekt FuSy. In Fig. 0.11 ist das CAD-Modell des entwickelten, fehlertoleranten Antriebswechselrichters, der in die Radnabe verbaut werden soll, dargestellt. Die maximale Bremsleistung des Radnabenantriebs beträgt ungefähr 100 kW. Der Wechselrichter wird derzeit aufgebaut und soll gemeinsam mit dem Motor am Prüfstand untersucht und anschließend im Fahrzeug getestet werden. Um die Verfügbarkeit eines Radnabenantriebs mit integrierter Bremsfunktionalität auch im Fehlerfall gewährleisten zu können, benötigt ein solches System Verfahren zur Fehlererkennung und -behandlung. Zu den Fehlerquellen zählt ei-

Motors with Extreme Torque Density

by Dipl.-Ing. Tobias Krone
and Dipl.-Ing. Fabian Oelkers

For the first time, electric cars using wheel hub drives can manage without a mechanical friction brake system. The drives facilitate full-electric braking and provide the opportunity to control the torque at every wheel independently. Apart from the battery, full-electric braking requires an additional energy dissipator, for example a brake resistor, due to the power limit of the battery. In cooperation with Continental, Ford, Fraunhofer IFAM and Schaeffler, the goal of the joint research project RABBIT is to develop a car with wheel hub drives without friction brake at the rear axle. Fig. 0.10 shows the structure of an electric power train using a brake resistor as an additional energy dissipator [1]. IAL's task is to design a fault-tolerant motor inverter for wheel hub drives [2] and to develop observer-based fault detection and diagnosis systems, based on the previous project FuSy. Fig. 0.11 depicts the CAD model of the developed fault-tolerant motor inverter which is integrable into a wheel hub. The maximum braking power of the wheel hub drive is about 100 kW. It is planned that the inverter under construction is tested together with the motor first on a test bench and then on a test car.

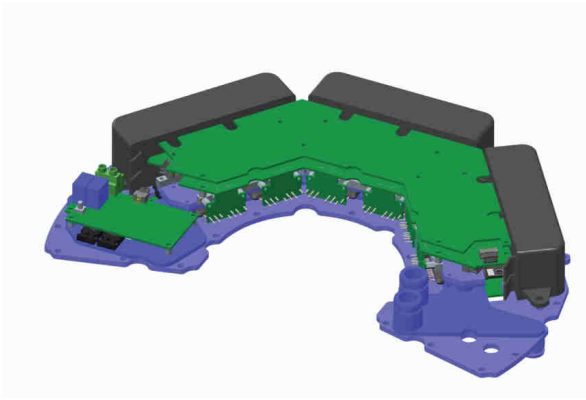


Fig. 0.11: CAD-Modell des Antriebswechselrichters
CAD model of a motor inverter

To ensure the functional safety of a wheel hub drive with integrated braking feature in the case of a fault, such a system requires an adequate fault detection and diagnosis concept. Faults may occur in sensors (rotor position, phase currents, DC-link voltage, temperature) and in actuators (semiconductors [3], motor windings, etc.). Observer-based approaches facilitate fault detection, creating redundancy (Fig. 0.12). After fault detection, the redundant data can

nerseits die Sensorik (Rotorlage, Phasenströme, Zwischenkreis-spannung, Temperatur) und anderseits die Aktorik (Halbleiter [3], Motorwicklungen, etc.). Durch beobachterbasierte Ansätze kann eine Fehlererkennung durch Herstellung von Redundanz erreicht werden (Fig. 0.12). Mit dieser Redundanz bietet sich nach erfolgreicher Fehlererkennung die Möglichkeit die redundanten Informationen für die Fehlerbehandlung zu verwenden. Zur Erkennung und Behandlung von Fehlern in der Rotorlagesensorik wird z. B. eine Rotorlageschätzung mittels Flussbeobachter und Adaptionsalgorithmus durchgeführt. Ein Fehlererkennungsblock überwacht die Differenz von gemessener und geschätzter Rotorlage. Ebenfalls findet dabei eine Überwachung der Stromsumme sowie der Zwischenkreisspannung statt, sodass eine Fremdfehlerauslösung vermieden werden kann. Die Messergebnisse zu dieser Fehlerbehandlung auf einem eigens aufgebauten Prüfstand zeigt Fig. 0.13.

[1] Krone, T.; Mertens, A.: Optimized Design of the Electric Power Train for Wheel Hub Drive Systems Without Friction Brakes, EPE 2017

[2] Krone, T.; Mertens, A.: DC Link RMS Current Estimation in Systems with Several Converters Connected to a Shared DC Link with Distributed Capacitors, EPE 2016

[3] Oelkers, F., Weber, B., Mertens, A.: Oversampling Based Approach for Open Circuit Fault Detection in PMSM Drive Systems, EPE 2016

be used for fault diagnosis and handling. Fault detection and diagnosis in rotor position sensors is achieved, for example, by rotor position estimation using a flux observer and adaptation algorithms. A fault detection block checks the difference between measured and estimated rotor position. Current sum and DC-link voltage are observed, too, in order to detect faults in the corresponding sensors. The measurement results of this fault detection and handling approach achieved on a specifically developed test bench are shown in Fig. 0.13.

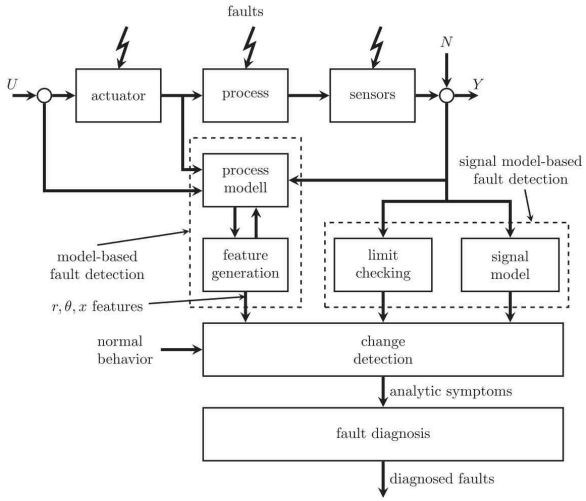


Fig. 0.12: Konzept der beobachterbasierten Fehlererkennung und -behandlung
Concept of observer-based fault detection and diagnosis

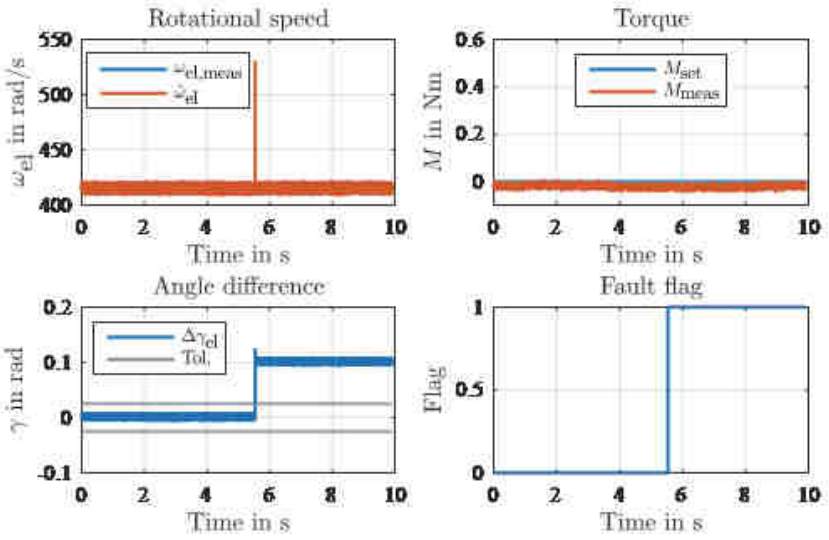


Figure 0.13: Messergebnisse der Untersuchung der Fehlerbehandlung bei Fehlern in der Rotorlagesensorik
Measurement results of fault analysis with respect to rotor position estimation errors

Quasi Zwei-Level PWM Betrieb für modulare Multilevel Umrichter

von Ing. Jakub Kučka

Seit dem Einsatz des modularen Multilevel-Umrichters (Fig. 0.14) für HVDC-Anwendungen sind zahlreiche Versuche unternommen worden, diese Topologie auch für Mittelspannungsantriebe zu verwenden. Dafür sprechen zahlreiche Vorteile, wie z.B. die leichte Skalierbarkeit für hohe Spannungen, niedrige Spannungsverzerrung, niedrige Spannungssteilheit und eine mögliche Redundanz. Als problematisch zeigt sich hingegen die große Menge an installierter Kapazität in den Umrichtermodulen, die die Kosten und das Bauvolumen erhöhen.

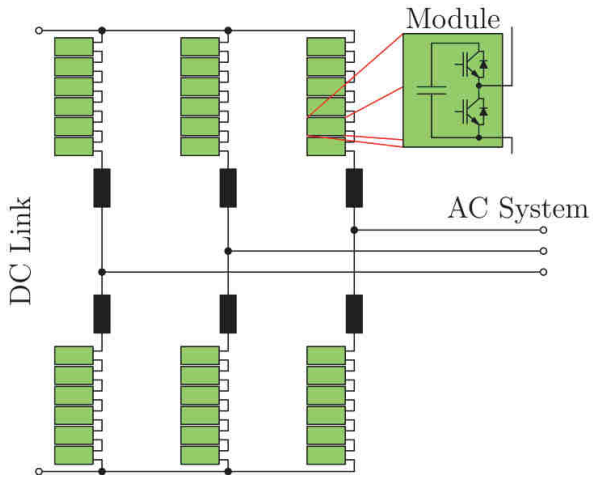


Fig. 0.14: Modularer Multilevel-Umrichter
Modular Multilevel Converter

Der hohe Kapazitätsbedarf ergibt sich aus den niederfrequenten Leistungskomponenten in den Umrichterzweigen. Die in den Modulkondensatoren zu puffernde Energiemenge ist antiproportional zu den niederfrequenten Leistungskomponenten. Diese sind mit der Ausgangsfrequenz des Umrichters verknüpft, welche (insbesondere bei drehzahlvariablen Antrieben) extrem niedrig sein kann. Um diese niederfrequenten Leistungskomponenten zu kompensieren, wird als Gegenmaßnahme zur Sicherstellung eines stabilen Betriebs bei extrem niedrigen Frequenzen eine zusätzliche HF-Injektion in die Umrichterzweige vorgenommen. Eine gängige Lösung ist der sogenannte Low-Frequency Mode, der von Korn et al. entwickelt wurde. Er basiert auf einer Injektion zusätzlicher hochfrequenter Spannungskomponenten in die Gleichtaktspannung. Dieser Betriebsmodus ermöglicht einen niederfrequenten Betrieb ohne Stromverzerrung. Wird das Bemessungsdrehmoment allerdings während des gesamten Betriebsbereiches benötigt, muss der Umrichter erheblich überdimensioniert werden.

Quasi Two-Level PWM Operation of Modular Multilevel Converter

by Ing. Jakub Kučka

Ever since the modular multilevel converter (Fig.0.14) has been proposed for HVDC applications, many efforts have been made to apply this topology also to medium-voltage drives. While the large number of benefits of the topology, i.e. simple scalability to high voltages, low voltage distortion, low dv/dt, and possible redundancy, encourage the drive application, the large amount of installed capacitance in the converter's modules is a critical issue, increasing cost and volume. This large demand for capacitance is caused by the low-frequency power components, occurring in the converter branches, as the amount of energy to be buffered in the module capacitors is inversely proportional to the power-component frequencies. These low-frequency components are linked to the converter output frequency, which can be extremely low (especially for variable-speed machine drives). The countermeasure, enabling a stable operation at very low frequencies, is to inject additional high-frequency components into the branch voltages and branch currents to cancel the aforementioned low-frequency power components. A standard solution is the Low-Frequency Mode proposed by Korn et al. based on an injection of additional high-frequency voltage components into the common-mode voltage. This operating mode enables low-frequency operation without distorting the machine currents. However, when the rated torque is demanded over the whole operating range, a considerable oversizing of the converter applies. Moreover, the amount of installed capacitance cannot be reduced, if the nominal operating (corner) frequency is low. A recent solution addressing the high capacitance demand in drive applications, proposed by our Institute, is a quasi two-level PWM operation for modular multilevel converters [1]. The main idea is to employ a standard pulse-width modulation (PWM) to generate the output voltage waveforms. The additional high-frequency voltage components (resulting from the PWM) are combined with additional branch currents to efficiently compensate almost all power components, vastly reducing capacitor costs and volume. Although the multilevel waveform is sacrificed, the output dv/dt can be still limited by introducing a switching delay between any two switching instants (leading to staircase voltage waveforms). Moreover, the other benefits, i.e. scalability to high voltages and possible redundancy, can be kept. The quasi two-level operation is currently being investigated as a part of the DFG project New operation modes of modular multilevel converters with output voltage

Außerdem kann die Menge an installierter Kapazität bei einer niedrigen Eckfrequenz nicht reduziert werden. Ein neuer am Institut entwickelter Ansatz, dem hohen Bedarf an Kapazität in Antrieben zu begegnen, basiert auf einem quasi Zwei-Level-PWM-Betrieb für modulare Multilevel-Umrichter [1]. Dabei ist die Idee, mit der üblichen Pulsdauermodulation (PWM) Ausgangsspannungsformen zu generieren. Die zusätzlichen hochfrequenten Spannungskomponenten (aus der PWM) werden mit zusätzlichen Zweigströmen kombiniert, um so nahezu alle Leistungskomponenten zu kompensieren. Dadurch können die Kosten für die Kondensatoren sowie das Bauvolumen drastisch reduziert werden. Obwohl auf die Multilevel-Spannungsform verzichtet werden muss, kann die Ausgangsspannungssteilheit durch Schaltverzögerungen zwischen jeweils zwei Schaltvorgängenweiterhin begrenzt werden (so ergibt sich eine Treppenspannungsform). Die anderen Vorteile, wie Skalierbarkeit für hohe Spannungen und mögliche Redundanz, bleiben erhalten. Im Rahmen des DFG-geförderten Projekts Neue Betriebsmodi von modularen Stromrichtern mit modulierter Ausgangsspannung und stark verminderter Modulkapazität wird der quasi Zwei-Level-Betrieb derzeit näher untersucht. Vor kurzem wurde der Umrichterprototyp fertig gestellt und erste Regelalgorithmen experimentell erprobt (Fig. 0.15). Während die Kondensator-Entladungskonstante des Umrichterprototypen (Zeit, in der die in den Kondensatoren gepufferte Energie durch die Ausgangsleistung des Umrichters entladen wird) ca. 2 ms beträgt, liegt sie bei herkömmlichen Verfahren oft bei über 50 ms. Dies gilt für einen 50-Hz-Umrichter; bei niedrigeren Frequenzen sind Werte von bis zu einigen Hundert ms zu erwarten. Auf diese Weise kann die problematische Kapazität auf wenige Prozent vermindert werden.

[1] A. Mertens and J. Kucka, „Quasi Two-Level PWM Operation of an MMC Phase Leg with Reduced Module Capacitance“ , In IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 31, no. 10, pp. 6765-6769, Oct. 2016.

modulation significantly reducing the module capacitor requirements. Lately, the converter prototype has been built and first control algorithms have been experimentally validated (Fig. 0.15).

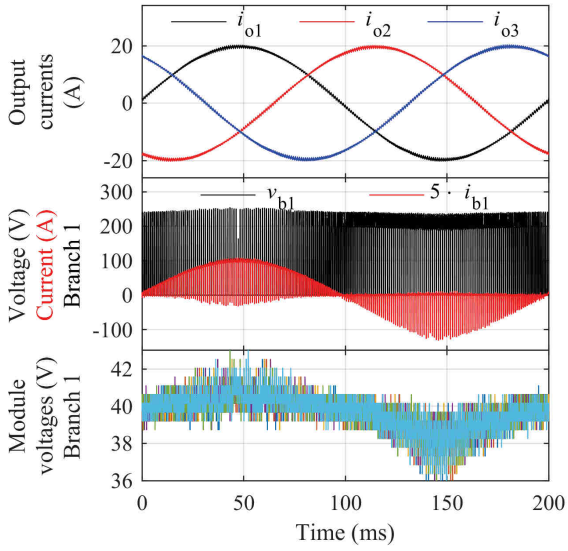


Fig. 0.15: Gemessene Verläufe bei quasi Zwei-Level-PWM-Betrieb des MMC-Prototypen
Measured waveforms showing quasi two-level PWM operation of MMC prototype

While the discharge constant of the converter prototype (the time to discharge the power stored in capacitors with the converters nominal output power) is around 2 ms here, a value of over 50 ms is common with the standard control procedure. This is a value for a 50 Hz converter; with lower frequencies, even higher values up to some hundred ms are expected. Thus, the critical capacitance can be reduced to a few percent.

Positionsgeberlose Regelung mit überabtastender Stromerfassung

von M.Sc. B. Weber
und M.Sc. G. Lindemann

Auf dem Gebiet der positionsgeberlosen Regelung von umrichtergespeisten permanentmagneterregten Synchronmaschinen im Bereich niedriger Drehzahlen bis Drehzahl Null wird derzeit untersucht, welcher technische Nutzen aus einer Überabtastung der Stromerfassung entsteht. Im Bereich niedriger Drehzahlen erfolgt die Bestimmung der Rotorlage aus dem Zusammenhang einer hochfrequenten Spannungsanregung und der daraus resultierenden Stromantwort. Dies setzt eine Abhängigkeit der Maschineninduktivitäten von der Rotorlage voraus. Da aus dieser hochfrequenten Anregung Verlustmechanismen wie Skin-Effekt resultieren, muss eine möglichst kleine Amplitude der Anregung gewählt werden. Dies motiviert die Untersuchung der Überabtastung als hochdynamische Stromerfassung mit einem hohen Signal-Rausch-Verhältnis. Bisherige Verfahren der positionsgeberlosen Regelung verarbeiten Messwerte der Maschinenstrangströme, die zeitlich jeweils zu Beginn oder in der Mitte einer Periodendauer der PWM-Ansteuerung des Umrichters erfasst werden. Die Überabtastung erfolgt dagegen zeitlich äquidistant deutlich häufiger, z.B. 100 Stromabtastwerte in einer PWM-Periode. Auf Grund des überwiegend induktiven Verhaltens der Maschine können die Verläufe der Strangströme während der Nullspannungszustände durch Geradenabschnitte approximiert werden. Mit Hilfe einer FPGA-basierten linearen Regression werden somit die Stromsteigungen $\frac{d}{dt}i_{pss}$ und die rekonstruierten Ströme ermittelt, welche sich jeweils auf den Beginn und das Ende eines Nullspannungszustandes beziehen. Mit diesen rekonstruierten Strömen werden die rekonstruierten mittleren Stromanstiege $\frac{d}{dt}i_{ass}$ im Zeitbereich der aktiven Spannungszustände berechnet. Mit einer neuartigen reduzierten Beobachter-Struktur werden die Stromanstiege gegenüber der gestellten Spannung während der aktiven Spannungszustände $\hat{u'}_{ass}$ für eine Rotorlageschätzung ausgewertet. Die zusätzliche Verrechnung von $\frac{d}{dt}i_{pss}$ führt zu einer Parameterunabhängigkeit des neuartigen Verfahrens in Bezug auf den Widerstand der Maschine und die Polradspannung.

Abb. 0.17 zeigt die Dynamik der resultierenden Drehzahlregelung, welche dynamisch angreifenden Lastmomenten unterliegt. Dargestellt ist die mit Encoder gemessene Rotorlage γ_{el} und Drehzahl n sowie die geschätzte Rotorlage $\hat{\gamma}_{el}$ und die geschätzte Drehzahl $\hat{n}$. Zudem ist der q-Strom i_q und das gemessene Drehmoment M dargestellt.

Sensorless Control for Position Estimation Using Current Oversampling

by M.Sc. B. Weber
and M.Sc. G. Lindemann

In the field of sensorless control for position estimation of inverter-fed permanent magnet synchronous machines in the lower speed range down to zero speed, current research is investigating the technical benefit obtained from current oversampling. In the lower speed range, the rotor position is estimated based on the relation of a high-frequency voltage excitation and the resulting current response, assuming a dependency of the machine inductances on the rotor position. As high-frequency excitation leads to loss mechanisms, such as the skin effect, the injection amplitudes should be as low as possible. This is the motivation for investigating current oversampling, a highly dynamic current sensing approach with a high signal-to-noise ratio. Previous sensorless control methods process currents that are sampled once, either at the beginning or in the middle of an inverter's PWM period. In contrast, current oversampling is done more often at equidistant time steps, e.g. 100 current samples taken during one PWM period. Due to the predominantly inductive machine behaviour, the current waveforms at the zero voltage vectors can be approximated by line segments. Based on a linear regression algorithm performed by an FPGA, the current slopes $\frac{d}{dt}i_{pss}$ and the constructed current samples are computed, each referring to the beginning and to the end of a zero voltage vector. Based on these constructed current samples, the constructed average current slopes $\frac{d}{dt}i_{ass}$ are computed in the time span of the active voltage vectors. Using a novel reduced observer structure, the current slopes are evaluated at the active voltage vectors $\hat{u'}_{ass}$ for position estimation. Due to the additional computation of $\frac{d}{dt}i_{pss}$, the novel approach is parameter-independent with respect to the influence of EMF and resistance. Fig. 0.17 shows the dynamic behaviour of the resulting closed-loop speed control applying highly dynamic load torques, depicting the rotor position γ_{el} and speed n measured with an encoder as well as the estimated rotor position $\hat{\gamma}_{el}$ and the estimated speed $\hat{n}$. Moreover, the q current i_q and the measured torque M are given. The novel approach shows a highly dynamic control behaviour, comparable to an encoder-based control [1].

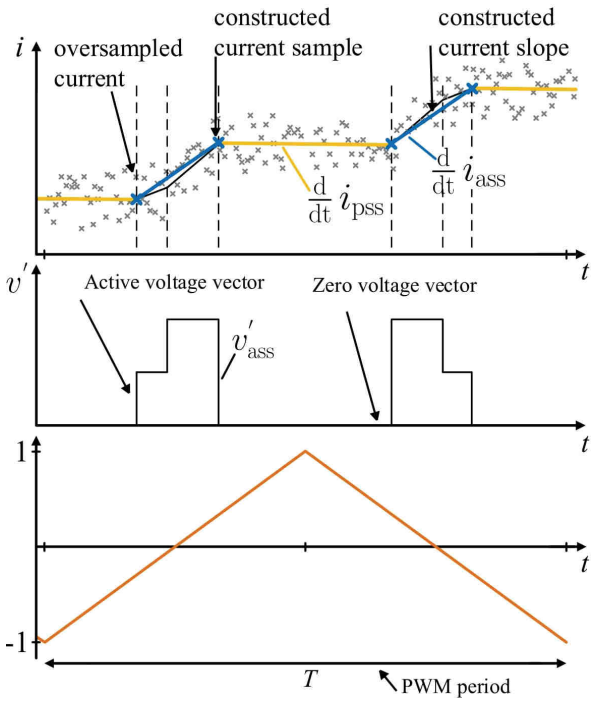


Fig. 0.16: Erläuterung der Überabtastung der Stromerfassung sowie die weitere Auswertung
Current oversampling and further evaluation

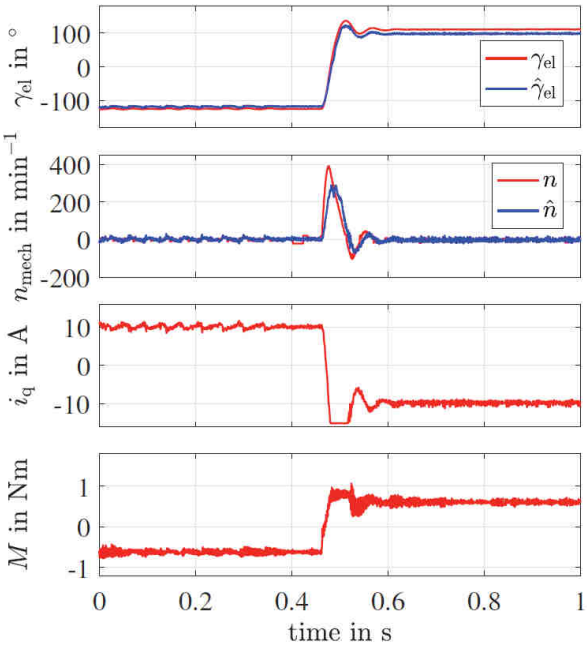


Fig. 0.17: Vergleich der Dynamik der geberlosen Drehzahl-regelung mit reduzierter Beobachterstruktur mit der geberbehafteten Drehzahlregelung
Dynamic of sensorless closed-loop speed control using a reduced observer structure compared to an encoder-based control

Es zeigt sich für das neuartige Verfahren eine sehr hohe Dynamik, sodass die resultierende Drehzahlregelung mit einer geberbehafteten Regelung vergleichbar ist [1].

[1] B. Weber, G. Lindemann, A. Mertens: Reduced Observer for Anisotropy-Based Position Estimation of PM Synchronous Machines Using Current Oversampling, SLED 2017

Innovationscluster Leistungselektronik für Regenerative Energieversorgung

Triebstrangmodellierung zur Bestimmung von Umrichterbelastungen in Windenergieanlagen

von Dipl.-Ing. Marcel Moriße

Zur Identifikation schädigungsrelevanter Einflüsse im Betrieb wurden in diesem Teilprojekt des Innovationsclusters Modelle von Windenergieanlagen mit typischen Triebstrangtopologien inklusive verschiedener Generator- und Umrichterkonzepte entwickelt, die die speziellen Eigenschaften der Subsysteme Rotor, Triebstrang sowie elektrisches System inklusive des Netzes in einem Gesamtmodell berücksichtigen. Anschließend wurde zur Bewertung der Auswirkungen auf die Leistungshalbleiter ein Lebensdaueralgorithmus gemäß Fig. 0.18 angewandt. Dieser basiert auf einem akkuraten thermischen Modell der Umrichtermodule und aktuellen empirischen Untersuchungen von deren Lebensdauererwartung in Abhängigkeit von unterschiedlich parametrierbaren Leistungszyklen. Ein Ergebnis der Untersuchungen ist, dass übliche zum Teil starke Vereinfachungen der Gesamtsystemmodellierung zulässig sind, um die thermische Belastung der Leistungsumrichter zu ermitteln. Arbeitspunktabhängige Lastzyklen durch unterschiedliche Windgeschwindigkeiten im Zeitbereich von mehreren Sekunden haben einen deutlich größeren Einfluss auf thermische Modulverspannungen als hochfrequente Windturbulenzen oder Triebstrangschwingungen. Relevantere Lebensdauerbeeinträchtigungen können stattdessen aktive Regelstrategien ausüben.
Die individuelle Pitchregelung (IPC) zur Reduktion von höhenbedingt asymmetrischen Biegemomenten auf die Rotorblattlager resultiert beispielsweise in einer Mehr-belastung für den Pitchumrichter. Aufgrund der üblichen Überdimensionierung der Pitchantriebe sollte diese Mehrbelastung jedoch nicht ausschlaggebend für einen Frühausfall der Pitchumrichter sein. Ähnliche Auswirkungen auf den Hauptumrichter sind durch die aktive Torsionsdämpfung (ATD) des Triebstrangs mittels eines zusätzlichen Generatormoments zu erwarten. Da der Hauptumrichter als signifikanter Kostentreiber jedoch eher nicht zu stark überdimensioniert ist, gilt es, die tatsächliche Auswirkung von ATD bei der Dimensionierung zu berücksichtigen. Regelverfahren zur Entschärfung des thermisch besonders kritischen Generatorsynchronismus bei Anlagen mit doppeltgespeister Asynchronmaschine wurden darüber hinaus gesondert betrachtet. Deren Berücksichtigung kann für die Auslegung der Leistungsmodule für den

Innovation Cluster Power Electronics for Regenerative Energy Supply

Drive Train Modelling to Determine Harmful Influences on Converters in Wind Turbines

by Dipl.-Ing. Marcel Moriße

In this subproject of the Innovation Cluster, the aim was to identify harmful influences during operation by the development of wind turbine models with typical drive train topologies and converter concepts which consider the specific properties of the subsystems (rotor, drive train and electrical system including grid) in an overall model. In the next step, a lifetime algorithm (Fig. 0.18) was applied to evaluate the effects on the power semiconductors. The algorithm is based on an accurate thermal model of the converter modules and on current empirical investigations concerning their expected lifetime depending on specifically parameterizable power cycles. One research result proves that typical and partially vast simplifications are permissible when modelling the overall system, in order to determine the thermal stress on the power semiconductors. Operating point dependent load cycles due to different wind speeds in the range of several seconds have a considerably larger impact on thermal module stress than high-frequency wind turbulences or drive train vibrations. In contrast, active control strategies can have a more relevant influence on lifetime. Individual pitch control (IPC) to reduce magnitude-dependent asymmetrical bending moments at the rotor blade bearings increases for example the load on the pitch converter. Due to typically oversized pitch drives, these surplus loads might not be crucial for a premature failure of the pitch converters. Similar effects on the main converter can be expected from active torsional damping (ATD) of the drive train through additional generator torque. However, since the main converter as a significant cost driver is normally rather not excessively oversized, it is important to consider the effective impact of ATD in the design phase. Another point of research was the consideration of control methods to mitigate the thermally particularly critical generator synchronism in systems with doubly-fed induction machine. Their consideration can play an important role when designing power modules for the generator converter. Fig. 0.19 shows the avoidance of the largest lifetime-significant temperature differences of a diode when the magnetizing reactive power for the generator during synchronism is partly supplied by the grid converter.

Generatorumrichter von großer Bedeutung sein. So zeigt Fig. 0.19 die Vermeidung der lebensdauersignifikanten größten Temperaturhübe einer Diode, indem die Magnetisierungsblindleistung für den Generator während des Synchronismus zum Teil vom Netzumrichter übernommen wird.

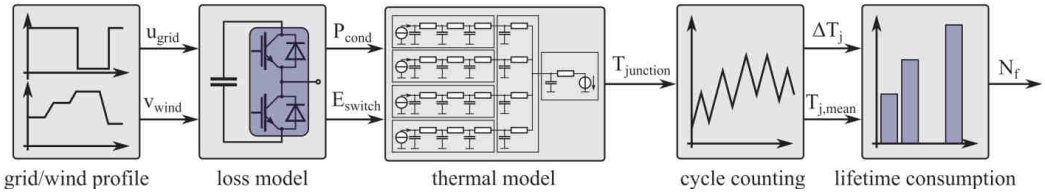


Figure 0.18: Schematischer Ablauf der Berechnung des Lebensdauerverbrauchs einzelner Umrichterhalbleiter
Schematic procedure when calculating the lifetime consumption of the single converter semiconductors

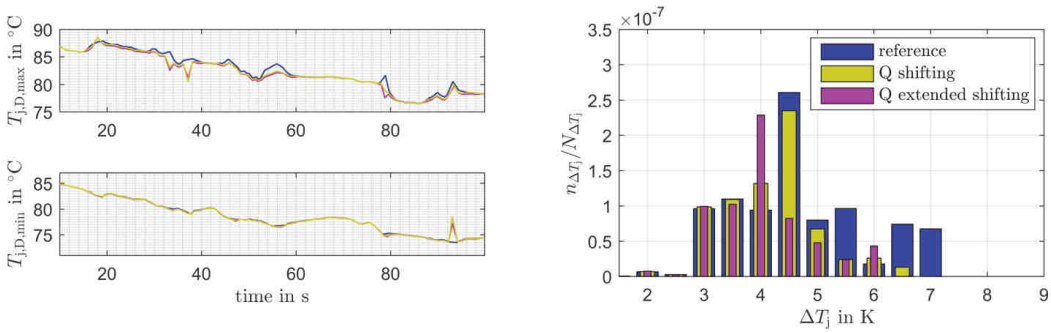


Figure 0.19: Thermische Entlastung einer Diode des Generatorumrichters durch Blindleistungsbereitstellung des Netzumrichters im Generatorsynchronismus
Thermal relief of a diode of the generator converter by reactive power supply of the grid converter in generator synchronism

Innovationscluster Leistungselektronik für Regenerative Energieversorgung

Zustandsüberwachung, Restlebensdauerabschätzung und präventive Instandhaltungsstrategien

von M.Sc. Simon Weber

Im Rahmen des Innovationsclusters Leistungselektronik wird die Zuverlässigkeit von elektrischen Umrichtern in Windenergieanlagen untersucht. Laut Ergebnissen des Projekts RELIAWIND (2011) sind das Pitchsystem und der Frequenzumrichter die häufigsten Ausfallursachen. Als Ausfallursache der Frequenzumrichter kommen hier vor allem Alterungsmechanismen der IGBT-Module oder Isolationsfehler in Frage. Das mittlerweile abgeschlossene und vom Land Niedersachsen sowie der Fraunhofer-Gesellschaft geförderte Innovationscluster Leistungselektronik will zur Klärung der Ursachen beitragen und hat Ansätze zur Verbesserung und zur Fehlerprädiktion untersucht. Das IAL arbeitete dabei eng mit dem Fraunhofer IWES in Hannover zusammen. Dieses Teilprojekt konzentriert sich auf Alterungsmechanismen in dem IGBT-Modul. In Fig. 0.20 ist der vertikale Aufbau eines IGBT-Moduls gezeigt.

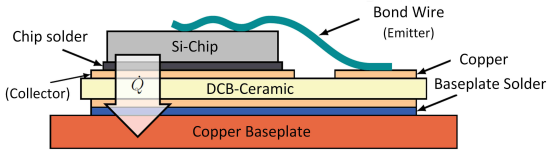


Fig. 0.20: Vertikaler IGBT-Modulaufbau [1]
Vertical design of IGBT module [1]

Im Betrieb kommt es auf Grund von Durchlass- und Schaltverlusten zu einem Anstieg der Sperrschichttemperatur im Leistungshalbleiter (SI-Chip). Auf Grund des zyklischen Verlaufs der Sperrschichttemperatur altern die Bonddrahtverbindung und die Chiplötung. Um die Lebensdauer des Modulaufbaus mit Lebensdauermodellen vorhersagen zu können, ist die Kenntnis der Sperrschichttemperatur erforderlich. Es wird in diesem Teilprojekt der Ansatz verfolgt, die Sperrschichttemperatur im Betrieb über temperatursensitive Parameter (TSEPs) zu messen. TSEPs sind elektrische Parameter des IGBTs, die sich mit der Sperrschichttemperatur verändern. Mit Hilfe von Doppelpulsversuchen wurden verschiedene TSEPs hinsichtlich ihrer Temperatursensitivität untersucht. Als geeignete Parameter wurden die Durchlassspannung und die Ausschaltzeit ausgewählt. Für beide Parameter ist jeweils eine kosten-

Innovation Cluster Power Electronics for Regenerative Energy Supply

Condition Monitoring, Remaining Lifetime Prediction and Preventive Maintenance Strategies

by M.Sc. Simon Weber

Within the scope of the Innovation Cluster Power Electronics, one research topic was to investigate the reliability of electrical converters in wind turbines. According to the research results of the project RELIAWIND (2011), the main failure sources are the pitch system and the frequency converter. Ageing mechanisms of the IGBT modules and insulation defects are the most important failure causes in frequency converters. The aim of the meanwhile completed Innovation Cluster Power Electronics, which was funded by the Land of Lower Saxony and by Fraunhofer-Gesellschaft, was to identify the causes and develop approaches for improvements and failure prediction. Within the project, IAL has worked in close cooperation with Fraunhofer IWES in Hannover. This subproject focuses on ageing mechanisms in IGBT modules. Fig. 0.20 shows the vertical design of an IGBT module. Due to conduction and switching losses during operation, the junction temperature in the power semiconductor (SI chip) rises. Since the temperature changes cyclically, there are ageing processes at the wire bonds and the solder joints. To predict the lifetime of the modular design by means of lifetime models, it is necessary to know the junction temperature. Within this subproject, an approach has been developed to measure the junction temperature while the drive is operating based on temperature-sensitive electrical parameters (TSEP). TSEPs are electrical parameters of the IGBT which change depending on the junction temperature. In double pulse tests, various TSEPs were analyzed with respect to their temperature sensitivity. On-state voltage and turn-off delay time were selected as appropriate parameters. For the detection of both parameters, a low-cost electronic circuit was developed. The total component costs of the circuit are less than six € per piece for a quantity of 1,000 pieces. At an open IGBT module, the IGBTs surface temperature as well as the two TSEPs were measured in the inverter mode. Based on the measured data depicted in Fig. 0.21, conclusions can be drawn on the junction temperature. When the junction temperature is known, lifetime consumption is predictable.

günstige Messschaltung entwickelt worden. Die gesamten Bauteilkosten beider Messschaltungen betragen weniger als 6 €/St. bei einer Stückzahl von 1.000.

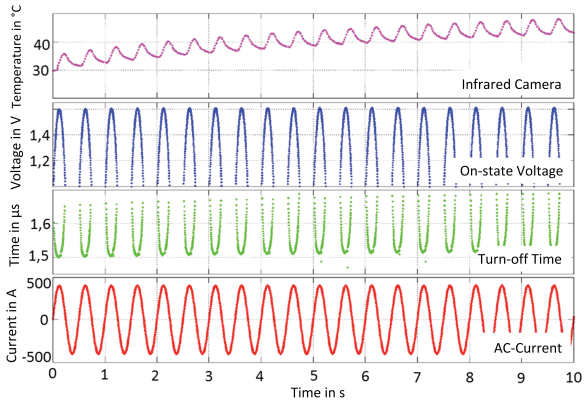


Fig. 0.21: Messung der Durchlassspannung, der Ausschaltzeit
Measurement of on-state voltage and turn-off delay time

An einem geöffneten IGBT-Modul wurden gleichzeitig die Oberflächentemperatur der IGBTs und die beiden TSEPs im Wechselrichterbetrieb gemessen. Anhand der Messdaten in Fig. 0.21 können Rückschlüsse auf die Sperrschichttemperatur gezogen werden. Der Lebensdauerverbrauch lässt sich bei Kenntnis der Sperrschichttemperatur abschätzen.

[1] M. Schulz, Vervielfachung von Lebensdauer und Leistungsdichte mit IGBT5 & .XT, ELEKTRONIKPRAXIS Leistungselektronik & Stromversorgung, September 2015.

Induktives Laden

von M.Sc. Hedieh Movagharnejad

Durch die steigende Nachfrage nach Plug-in-Hybriden und Elektrofahrzeugen steigt auch die Nachfrage nach bequemeren und zuverlässigeren Möglichkeiten der Batterieaufladung. Viele Nachteile herkömmlicher konduktiver, kabelgebundener Ladesysteme können durch induktive Energieübertragungssysteme überwunden werden. Beim induktiven Laden wird die hochfrequente Wechselspannung in der Senderspule durch magnetische Kopplung an die Empfängerspule im Verbraucher übertragen. Die Primärspule befindet sich in diesem Fall im Erdboden und die Sekundärspule im Boden des Fahrzeugs. Der Fahrer braucht lediglich das Fahrzeug über der Primärspule zu parken, und die Batterie des Fahrzeugs wird automatisch geladen. Obwohl die induktive Energieübertragung im Vergleich zur herkömmlichen konduktiven kabelgebundenen Energieübertragung viele Vorteile aufweist, ist das induktive Laden von Elektrofahrzeugen auch mit gewissen Designanforderungen und technischen Hindernissen verbunden, die die praktischen Einsatzmöglichkeiten erheblich einschränken. Ein Aspekt ist beispielsweise, dass der Luftspalt zwischen Sender- und Empfängerspule ungefähr 10 - 25 cm beträgt. Ein großer Luftspalt bedeutet eine geringe Kopplung zwischen den Spulen. Im Falle eines horizontalen Versatzes nimmt die magnetische Kopplung noch weiter ab. Eine niedrige Kopplung hat direkte Auswirkungen auf die beiden wichtigsten Parameter zur Bewertung eines Ladesystems den Wirkungsgrad und das Energieübertragungsvermögen. Hohe Streuinduktivitäten in den Spulen beeinträchtigen die Regelung des Systems und erhöhen die Spannungs- und Strombeanspruchung der Bauteile. Der Leistungsfaktor nimmt bei geringer magnetischer Kopplung ebenfalls ab. Das Problem der elektromagnetischen Strahlung wird durch größere Luftspalte ebenfalls verstärkt. Bei induktiven Energieübertragungssystemen ohne Parkhilfe kommt es auch zu horizontalem Versatz und radialen Abweichungen zwischen den Spulen. Die Abweichungen führen zu schwankenden Kopplungen zwischen den Spulen, wodurch sich die elektrischen Parameter des Gesamtsystems drastisch ändern können. So kann zum Beispiel die Nenn-Ausgangsleistung nicht konstant gehalten werden, wenn das geladene Fahrzeug in einer anderen Position über der Senderspule geparkt wird. Dies beeinträchtigt auch den Wirkungsgrad des Systems. Daher sollte das System so ausgelegt sein, dass selbst bei Kopplungs- und Lastschwankungen eine stabile Ladeleistung zur Verfügung gestellt werden kann. Für Anwendungen im Automobilbereich muss die Hardware induktiver Energieübertagungs-

Inductive Charging

by M.Sc. Hedieh Movagharnejad

The growing market for plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs) and electric vehicles (EVs) stimulates the demand for more convenient and reliable means to recharge the battery. Inductive power transfer (IPT) technology can be used as an alternative solution in eliminating many charging hazards and drawbacks related to traditional conductive, plug-based power transfer. Inductive charging transfers the high-frequency AC power in the transmitting coil to the receiving coil in the load by magnetic coupling. With the primary coil hidden in the ground and the secondary coil integrated into the bottom of a vehicle, the driver would only require setting the vehicle over the primary coil and the system would automatically charge the battery while the vehicle is parked.

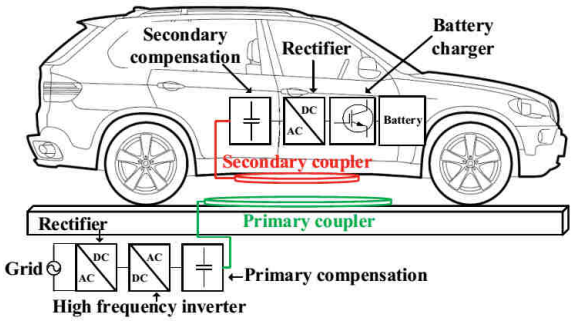


Fig. 0.22: Allgemeiner Aufbau beim induktiven Laden von Elektrofahrzeugen
General structure for inductive charging of EVs

Although IPT technology has significant advantages over the traditional plug-based method, inductive charging of EVs has some design challenges and technological obstacles that strongly limit its practical applications. One issue is that the air gap between the transmitting and receiving coils is around 10 - 25 cm. A large air gap leads to low coupling between the transmitting and receiving coils. Horizontal offset between the coils further reduces the magnetic coupling. The low coupling directly affects the two most important parameters for evaluating a charging system: efficiency and power transfer capability. Meanwhile, large leakage inductances of the coils worsen control of the system and increase the voltage and current stress on components. The power factor also decreases when magnetic coupling decreases. Electromagnetic radiation is also a problem exacerbated by larger air gaps. Horizontal misalignment and rotary deviation between the coils also definitely exist in IPT systems as a result of unassisted parking. The

systeme kompakt, leicht und hocheffizient sein und vertikale Änderungen der Luftspaltabstände, horizontalen Versatz und radiale Abweichungen zulassen. Außerdem muss sie leicht und bequem handhabbar sein. Um diese Probleme zu lösen, forscht das IAL auf dem Gebiet des induktiven Ladens und entwickelt und baut den Prototyp eines induktiven Energieübertragungssystems. Es wurden bereits verschiedene Topologien magnetischer Koppler und die zugehörige Leistungselektronik untersucht und optimiert [1, 2]. Das umgesetzte induktive Energieübertragungssystem weist ein gutes Verhalten gegenüber Kopplungs- und Lastschwankungen auf. Die Betriebsfrequenz wird so gewählt, dass die Ausgangskennlinie während des gesamten Ladevorgangs bei einem Wirkungsgrad von 94% bei 3kW konstant bleibt.

[1] H. Movagharnejad, A. Mertens, Design Optimization of Various Contactless Power Transformer Topologies for Wireless Charging of Electric Vehicles, European Conference on Power Electronics and Applications (EPE2016 ECCE -Europe), Karlsruhe, Germany, September 2016.

[2] H. Movagharnejad, A. Mertens, Design Metrics of Compensation Methods for Contactless Charging of Electric Vehicles, European Conference on Power Electronics and Applications (EPE2017 ECCE -Europe), Warsaw, Poland, September 2017.

misalignments lead to varied coupling between the coils. Thus, the electrical characteristics of the overall system can be seriously changed. For example, the nominal output power cannot be maintained when the charged EV is parked in a different position over the transmitting coil. The system efficiency is affected as well. Therefore, the system should be designed in the way that it is able to provide stable and efficient charging power to the load, even when coupling and load variation exist. For practical automotive applications, IPT hardware must be compact and lightweight, highly efficient, tolerant to variable vertical air gap spacing, lateral misalignment and rotary deviation, as well as being easy and convenient to use. To meet these challenges, IAL is working on inductive charging and an IPT prototype is designed and constructed. Various magnetic coupler topologies and the corresponding power electronics topologies have been studied and optimized [1, 2]. The implemented IPT system shows good behaviour against variable coupling and load variations. The operating frequency is chosen so as to maintain constant output characteristics for a complete charging process with high efficiency of 94% at 3kW.

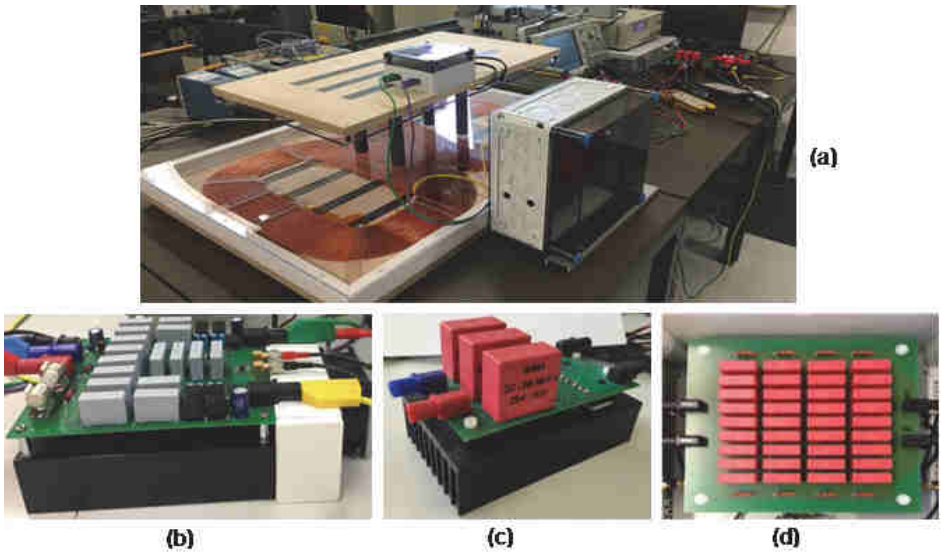


Figure 0.23: Versuchsaufbau eines induktiven Energieübertragungssystems,
(b) hochfrequenter Vollbrückenwechselrichter,
(c) Brückengleichrichter,
(d) Resonanzkondensatoren
Experimental IPT setup,
(b) full-bridge high-frequency inverter,
(c) full-bridge rectifier,
(d) resonant capacitors

Hochleistungs-DC/DC-Wandler für neuartige Offshore-Anwendungen mit SiC-Leistungshalbleitern

von M.Sc. Christian Sommer

Offshore-Windenergie ist eine der vielversprechendsten erneuerbaren Energien, und die Anzahl einspeisender Offshore-Windenergieanlagen (WEA) steigt kontinuierlich an. Verglichen mit der Situation an Land ist der Wind auf See stärker und stetiger. Hinzu kommt der große verfügbare Platz. Um die Energie verlustarm an Land übertragen zu können, wird bei Offshore-Windparks, welche einige hundert Kilometer entfernt von der Küste liegen, Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung eingesetzt (HGÜ). Derzeit speisen WEA in einem Offshore-Windpark ihre Leistung in ein 50-Hz-Netz, von wo aus sie mittels HGÜ an Land übertragen wird. Hierbei nehmen die 50-Hz-Transformatoren und die modularen Umrichter einen Großteil der Fundament- sowie Installationskosten ein. Um die Leistungsdichte eines solchen Systems zu erhöhen, sind Konzepte entstanden, welche ein reines Gleichspannungsnetz im Windpark vorsehen [1]. Die Netztransformatoren werden dabei durch Hochleistungs-Gleichspannungswandler ersetzt, welche beim Betrieb mit einer Frequenz im Kilohertz-Bereich eine weit höhere Leistungsdichte versprechen (vgl. Fig. 0.26). Bei diesem Konzept speist die WEA in ein DC-Verteilnetz, welches im Anschluss von einem Cluster-DC/DC-Wandler auf Übertragungslevel und mittels HGÜ an Land transferiert wird.

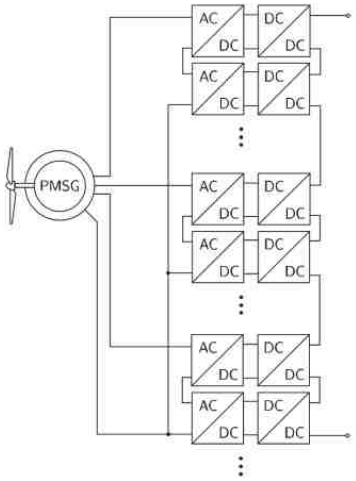


Fig. 0.24: Modulares Konzept für den Einsatz als WEA-naher Konverter in einem Offshore DC-Netz
Modular concept for use as a wind turbine converter in an offshore DC grid

High-Power DC/DC Converters for New Offshore Applications with SiC Power Semiconductors

by M.Sc. Christian Sommer

Offshore wind power is one of the most promising renewable energy sources, and there is a continuous trend to more and more offshore wind turbines (WT). Compared to the conditions onshore, offshore winds are much stronger and blow more steadily. Another advantage is the large space available. Offshore wind parks located some hundred kilometres away from the shore rely on HVDC transmission lines to transmit the power onshore with as low losses as possible. Currently, wind turbines in offshore wind farms feed their power into a 50-Hz grid from which a HVDC transmission line transmits the power onshore. The 50-Hz transformers and modular converters take the largest part of the foundation and installation costs. In order to increase the power density of such a system, DC grid concepts for wind farms were developed [1], replacing power transformers by high-power DC/DC converters. This leads to much higher power densities when operated at frequencies in the kilohertz range (cf. Fig. 0.26). Using this concept, WTs feed their power into a DC collector grid which is then transformed by a cluster DC/DC converter to transmission level and finally transmitted onshore via an HVDC transmission line.

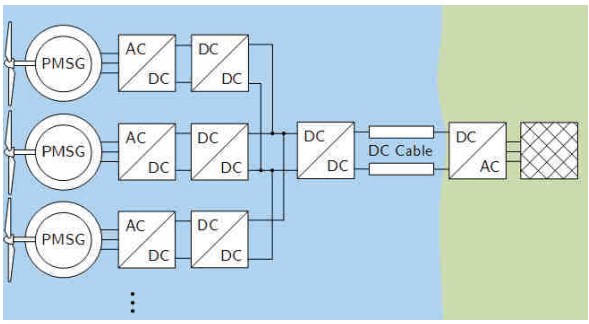


Fig. 0.26: Zukünftiges Konzept eines zweistufigen Gleichspannungsnetzes in einem Offshore-Windpark
Future concept of a two-stage DC grid in an offshore wind park

The goal of this project is to analyze and compare DC/DC converter topologies for use as a converter in the wind turbine (Fig. 0.24) based on silicon carbide (SiC) power semiconductors. Due to the lower switching losses compared to Si-IGBTs, SiC semiconductors enable higher switching frequencies and thus lead to a more compact design of the inductive

Gegenstand der Untersuchung in diesem Projekt ist die Analyse sowie der Vergleich von Gleichspannungswandler-Topologien für den Einsatz im WEA-nahen Konverter (Fig. 0.24) auf der Basis von Siliziumkarbid(SiC)-Leistungshalbleitern. SiC-Halbleiter ermöglichen aufgrund der niedrigeren Schaltverluste im Vergleich zu Si-IGBTs höhere Schaltfrequenzen und somit ein kompakteres Design der induktiven Komponenten. Ferner besitzen sie durch die Auslegung als unipolares Bauelement einen höheren Teillastwirkungs-grad im Vergleich zu Si-IGBTs in derselben Spannungsklasse. In Kombination mit der erhöhten kritischen Feldstärke versprechen SiC-Halbleiter für die beschriebene Anwendung deutliche Vorteile. Die nach einer Vorauswahl selektierten unidirektionalen, hart schaltenden Single-Phase Single-Active Bridge (SAB) und Three-Phase SAB DC/DC-Wandler wurden eingehender untersucht und miteinander verglichen. Nach einer analytischen Beschreibung der Stromformen und der vollständigen Betriebsdiagramme der Wandler (für Three-Phase SAB erstmalig) erfolgte die Untersuchung verschiedener Designs der induktiven Komponenten. Fig. 0.27 zeigt beispielhaft Auslegungsvarianten des Transformators in einem Wirkungsgrad-Leistungsdichte-Kennfeld für Three-Phase SAB.

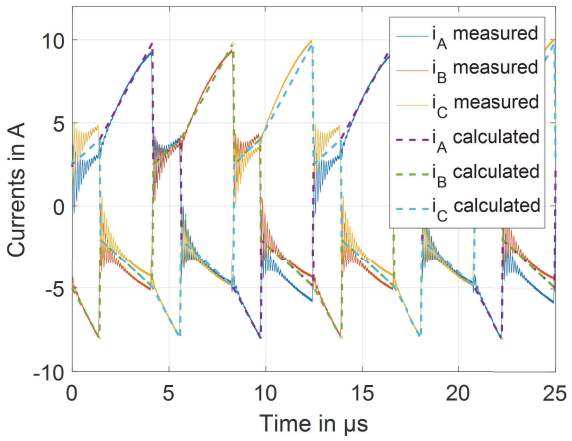


Fig. 0.25: Umrichterausgangsströme eines dreiphasigen Gleichspannungswandlers (Messung und Vorausberechnung) bei einer Ausgangsleistung von 5 kW
Converter output currents of a three-phase DC/DC converter (measurement and calculation) at 5 kW output power

Zur Validierung wurde ein skaliertes SiC-DC/DC-Wandler-Submodul mit einer Aus-gangsleistung von 5 kW dimensioniert, aufgebaut und getestet. Exemplarische Stromverläufe bei Zielleistung (Abb. 0.25) bestätigen die analytischen Ergebnisse.

power components. Moreover, due to their unipolar component design, their efficiency at partial load is higher compared to Si-IGBTs of the same voltage class. In combination with the increased critical field strength, SiC semiconductors largely benefit this particular application.

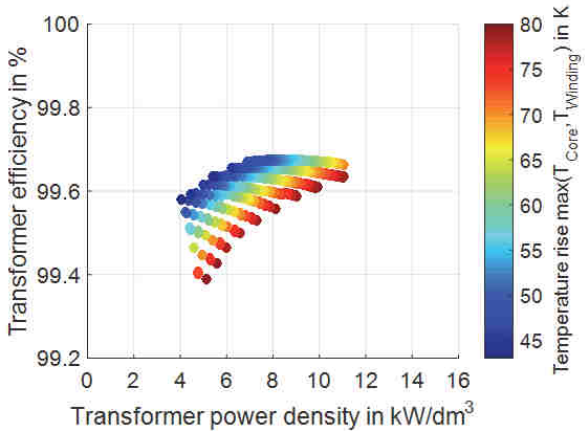


Fig. 0.27: Wirkungsgrad über Leistungsdichte von drei einpha-sigen Transformatoren für die geforderte Anwendung in einem dreiphasigen Gleichspannungswandler bei der Übertragung einer Ausgangsleistung von 50 kW
Efficiency over power density of three single-phase transformers used in a three-phase DC/DC converter at 50 kW output power transmission

In a next step, pre-selected hard switching unidirectional single-phase single-active bridge (SAB) and three-phase SAB DC/DC converters were analysed in detail and compared with each other. Based on the analytical description of the currents and the converterst' overall operating modes (for three-phase SAB for the first time), different inductive component designs were analysed. Fig. 0.27 shows possible transformer design configurations in an efficiency/power density map for the three-phase SAB. Finally, a scaled SiC DC/DC converter submodule with 5 kW output power was designed, set up and tested to validate the analytical results. Exemplary currents measured at the target output power validate the analytical results (Fig. 0.25).

[1] Meyer, C.; Hoing, M.; Peterson, A. De Doncker, R.W. Control and design of DC grids for offshore wind farms. IEEE Trans. Ind. Appl., 43(6):14751482, 2007.

Luftgekühlte Wide-Bandgap-Batterieladegeräte für Elektrofahrzeuge

von Dipl.-Ing. Silvia Zulk

Die Anbindung des on-board-Batterieladegerätes von Elektrofahrzeugen an einen Kühlkreislauf verschärft das Platzproblem im Fahrzeug. Durch eine Luftkühlung lässt sich die für die Wasserkühlung notwendige Peripherie einsparen und das Batterieladegerät an bauraumunkritischeren Einbauorten platzieren. Die Erarbeitung einer Auslegungsmethodik, um dieses Ziel zu erreichen, ist ein Bestandteil des Projekts Luftstrom (Luftgekühlte Wide-Bandgap-Leistungselektronik und Mechatronik). Die Luftkühlung reduziert die abführbare Wärmemenge im Vergleich zur Wasserkühlung gleicher Baugröße und soll einerseits durch die Reduzierung der Verluste mit dem Einsatz von Wide-Bandgap (WBG)-Halbleitern und einer optimalen galvanisch trennenden Topologie erreicht werden, im Weiteren durch die Optimierung des Kühldesigns. Um die Zusammenhänge von Schaltfrequenz, Halbleitereinsatz, Verlusten, Filteraufwand, Kühlkörpergröße, gewicht usw. bestimmen zu können, wird auf eine analytische Beschreibung der Einzelkomponenten Wert gelegt, die zu einer ganzheitlichen Systemauslegung führt und optimale Betriebsparameter ermitteln lässt. Die Kühlkörpermodellierung wurde für erzwungene und natürliche Konvektion vorgenommen. Ziel dabei ist es, die Machbarkeit einer Kühlung durch natürliche Konvektion abzuschätzen, um Geräuschbelästigungen durch Ladevorgänge zu vermeiden. Die gefundenen analytischen Modelle wurden am Messaufbau validiert und weisen Abweichungen des thermischen Widerstands von max. 13% (erzwungene Konvektion) und 8% (natürliche Konvektion) auf. Die abzuführende Wärme setzt sich zusammen aus den Verlustleistungen aller Teilkomponenten des einphasigen Batterieladegerätes (Fig. 0.29). Der Strom ist dem Netz in Phase mit der Spannung zu entnehmen, was durch einen PFC-Gleichrichter realisiert wird. Ein Filter garantiert die Einhaltung der zulässigen Grenzwerte bezüglich der Stromharmonischen. Sicherheitsregulierungen erfordern eine galvanische Trennung zwischen Batterie und Netz, weshalb auf die Gleichrichtung ein isolierender DC-DC-Wandler folgt. Für diese Komponenten wurden Topologien gewählt, die analytisch zu beschreiben sind. Die Filtereinheit besteht aus einer Aneinanderreihung von LC-Gliedern. Das Filtervolumen kann in Abhängigkeit der Dämpfung, der PFC-Schaltfrequenz und der Anzahl von LC-Gliedern dargestellt (Fig. 0.30) und daraus ein Optimum gefunden werden. Bei der Anwendung von WBG-Halbleitern ist die verlustärmste Gleichrichter-

Air-Cooled Wide Bandgap Battery Chargers for Electric Vehicles

by Dipl.-Ing. Silvia Zulk

Connecting the on-board battery charger of electric vehicles to the cooling system worsens the space problem in the car. The peripheral equipment required by a water-cooled system can be eliminated when using an air-cooled system. Moreover, the battery charger can be located at a more convenient installation place. To achieve this objective, a design methodology is currently being developed as part of the research project Air Flow (air-cooled wide bandgap power electronics and mechatronics). An air-cooled system reduces the heat to be dissipated compared to a water-cooled system of the same size. On the one hand, this is supposed to be reached by lower losses due to the use of wide bandgap (WBG) semiconductors and an optimal, electrically isolated topology, and on the other hand, by an optimized design of the cooling system. To analyse the relations between switching frequency, use of semiconductors, losses, necessary filters, size and weight of the heatsink, etc., an analytical description of the individual components is of great importance in order to develop an integrated system design and determine the optimal operating parameters. The heatsink was modelled for forced convection and natural convection. The aim was to estimate the cooling feasibility through natural convection in order to avoid noise caused by the charging processes. The created analytical models were validated on a test setup. The thermal resistance deviates by max. 13% (forced convection) and 8% (natural convection).

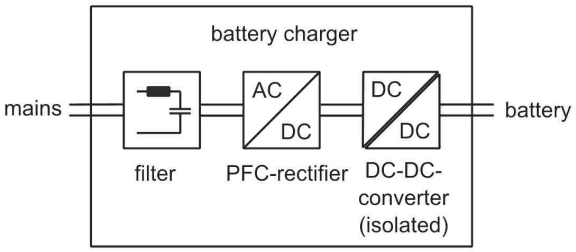


Fig. 0.29: Systemübersicht vom Netz zur Batterie: Filter, PFC-Gleichrichter und isolierender DC-DC-Wandler
System overview from mains towards battery: filter, PFC rectifier and isolated DC/DC converter

The heat to be dissipated comprises the power losses of all subcomponents of the single-phase battery charger (Fig. 0.29). The current is to be drawn from the mains in phase with the voltage which is

topologie die Totem-Pole-Schaltung (Fig. 0.28 (a)). Die Speicherladung von Silizium-Halbleitern spielt dem Vorteil einer geringen Halbleiteranzahl entgegen. Erst durch den WBG-Einsatz weist die Totem-Pole-Schaltung geringste Verluste auf. Unter den DC-DC-Wandlern wurden für diese Anwendung die Dual-Active-Bridge und der LLC-Wandler als vielversprechendste Topologien gefunden. Auf Grund des weiten soft-switching-Bereiches und der näherungsweise sinusförmigen Ströme im Resonanzkreis fiel die Wahl auf den LLC-Wandler (Fig. 0.28 (b)). Zur Validierung der Berechnungen wurde das Batterieladegerät in einem Versuchsaufbau realisiert.

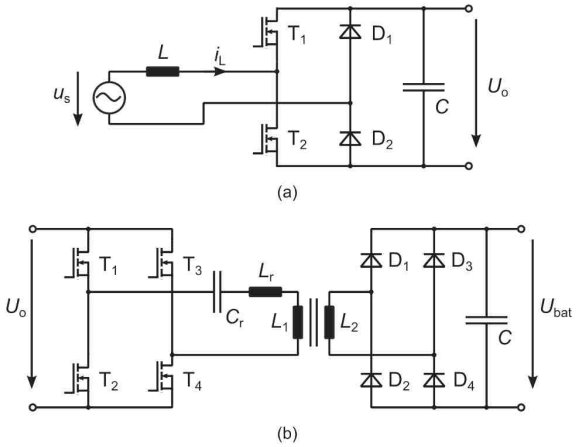


Fig. 0.28: Ausgewählte Schaltungen: für den PFC-Gleichrichter
(a) Totem-Pole-Gleichrichter, für den DC-DC-Wandler
(b) LLC-Wandler
Switching topologies selected for the PFC rectifier
(a) totem-pole rectifier, for the DC/DC converter
(b) LLC converter

done by a PFC rectifier. A filter ensures that the maximum permissible values with respect to current harmonics are not exceeded. Safety regulations require battery and mains to be electrically isolated. For this reason, the PFC rectifier is succeeded by an electrically isolated DC/DC converter. For these two components, topologies have been chosen which are to be described analytically.
The filter unit consists of a series of LC elements. The filter volume can be plotted against attenuation, PFC switching frequency and number of LC elements (Fig. 0.30) to figure out the optimum solution. When using WBG semiconductors, the totem-pole arrangement proved to be the rectifier topology with the lowest losses (Fig. 0.28 (a)). The reverse recovery charge of silicon semiconductors counteracts the benefits derived from the small number of semiconductors. Only with the use of WBG, the totem-pole topology achieves the lowest losses. Among the DC/DC converters, dual active bridge and LLC converters were identified as the most promising topologies. Due to the wide soft-switching range and the approximately sinusoidal currents in the resonance circuit, the LLC converter was selected (Fig. 0.28 (b)). The battery charger was realized in a test setup to validate the calculations by measurements.

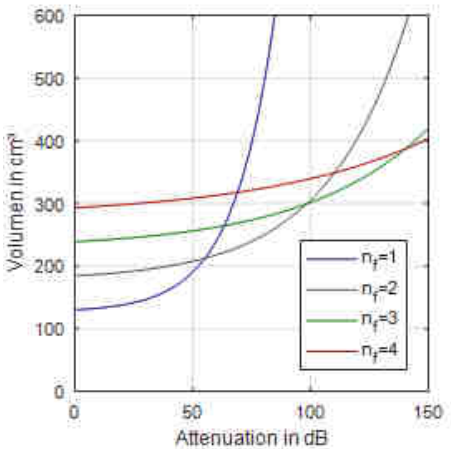


Fig. 0.30: Abhängigkeit des Filtervolumens inkl. Boost-Induktivität von der Dämpfung und der Anzahl der LC-Filterstufen bei einer beispielhaften Schalt-frequenz von 500 kHz (Design der Boost-Induktivität auf 10% zulässigen Stromrippel)
Dependency of the filter volume including boost inductance on the attenuation and number of LC filter stages at 500 Hz switching frequency (boost inductance designed for 10% permissible current ripple

Aggregierte Modelle für die Simulation von dynamischen Vorgängen in elektromechanischen Energiesystemen (AMSES)

von Dipl.-Ing. Malte John und M.Sc. Olga Korolova

Das vom Niedersächsischen Vorab der VolkswagenStiftung geförderte Verbundprojekt AMSES setzt sich mit den Wechselwirkungen aus der Interaktion der Betriebsmittel in einem komplexen Energiesystem auseinander. Unter der Beteiligung von fünf Fachbereichen aus Elektrotechnik und Maschinenbau werden Zeitbereichsmodelle auf Basis von differential-algebraischen Gleichungen erstellt und zu einem Gesamtgleichungssystem verknüpft. Der Beitrag des Fachgebiets Leistungselektronik besteht in einer Modellbibliothek für Vollumrichter in Windenergieanlagen (Fig. 0.31). Dabei unterscheiden sich die Einzelmodelle zum einen in der Anzahl der modellierten nichtlinearen Effekte und zum anderen in der Wahl des Koordinatensystems. Auf Basis des Differentialgleichungssystems wird eine schrittweise Modellreduktion durchgeführt [1]. Das Umrichtermodell wird mit dem Gleichungssystem des Generators gekoppelt und netzseitig mit dem Gesamtmodell verbunden. Die Modellbibliothek ermöglicht es, die Fortpflanzung und Wechselwirkung der Nichtlinearitäten von Umrichter, Generator und Netz zu untersuchen und auf die Ursachen einzelner Effekte zurückzuführen.

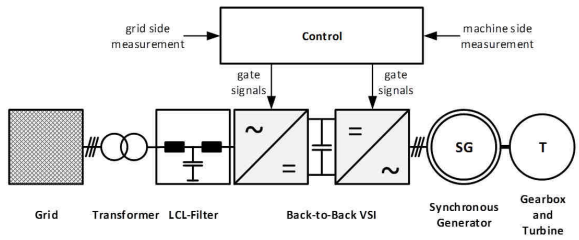


Fig. 0.31: Ersatzschaltbild einer Windenergieanlage
Equivalent circuit diagram of a wind turbine

Um ein tieferes Verständnis der Wechselwirkungen von Netz- und Generatorseite zu ermöglichen, erfolgt in einem weiteren Arbeitspaket die Beschreibung des Umrichters im Frequenzbereich. Dabei wird das nichtlineare Übertragungsverhalten der leistungselektronischen Schalter mithilfe von Schaltfunktionen abgebildet und das Gleichungssystem in den Frequenzbereich transformiert. Die Kopplung der Netz- und Generatorseite wird dabei über die in Fig. 0.32 dargestellten Faltungen

Aggregate Models for the Simulation of Dynamic Processes in Electromechanical Power Systems (AMSES)

by Dipl.-Ing. Malte John and M.Sc. Olga Korolova

The interdisciplinary research project AMSES funded by the Niedersächsisches Vorab program of the Volkswagen Foundation investigates the effects that arise from the interaction of the individual operating resources in a complex power system. In a joint project of five disciplines from electrical engineering and mechanical engineering, time domain models are developed based on differential-algebraic equations and transformed into an overall equation system. The contribution of the Power Electronics division of IAL is the development of a model library for full scale converters used in wind turbines (Fig. 0.31). The individual models vary in the number of simulated nonlinear effects and in the type of coordinate system selected. Based on the ordinary differential equation (ODE) system, a stepwise model reduction is carried out [1]. The converter model is coupled with the generator's ODE system and connected on the grid side to the overall model. Based on the model library, it is possible to analyse the propagation and interaction of nonlinearities of converter, generator and grid, explaining the causes for the single effects. To gain a deeper understanding of the interactions on the grid and generator side, the topic of an additional work package is the description of the converter in the frequency domain. For this purpose, the nonlinear transmission behaviour of the power electronic switches is simulated by means of switching functions. The ODE system is then transformed into frequency domain. The coupling of grid and generator side is simulated by the convolutions shown in Fig. 0.32, using the switching functions (s), which in turn include interactions with converter control (Ctrl.) and pulse width modulation (PWM) [2].

The contribution of the Drive Systems division of IAL is the development of a complex transient model of a generalized electrical machine with different modelling accuracies of parasitic effects, such as magnetic saturation, harmonics in the air gap field and current displacement in a squirrel-cage winding. The generalized machine model is parameterizable for different types of machines: electrically excited synchronous machines, induction machines, synchronous reluctance machines and PM synchronous machines. The models have been validated by comparing the simulation results with the

mit den Schaltfunktionen (s) abgebildet, welche wiederum Wechselwirkungen mit der Umrichterregelung (Ctrl.) und der Pulsdauermodulation (PWM) beinhalten [2]. Der Beitrag des Fachgebietes Antriebssysteme besteht aus einem komplexen transienten Modell einer verallgemeinerten elektrischen Maschine mit der Möglichkeit unterschiedlicher Modellierungstiefe der Parasitäreffekte wie Eisensättigung, Oberwellen des Luftspaltfelds und Stromverdrängung in einer Käfigwicklung. Das verallgemeinerte Maschinenmodell ist für unterschiedliche Maschinentypen parametrierbar: elektrisch erregte Synchronmaschinen, Induktionsmaschinen, synchrone Reluktanzmaschinen und PM-Synchronmaschinen. Zur Modellvalidierung wurden Simulationsergebnisse gezielt mit den Ergebnissen von FEM-Rechnungen sowie Messungen an Prüfständen verglichen. Um eine bessere Recheneffizienz zu erreichen sowie die Kopplung der Modelle mit den Netzmodellen zu ermöglichen, wurden unterschiedliche numerische Aspekte der transienten Simulation von elektrischen Maschinen untersucht. Im Fokus standen die mathematische Formulierung der Sättigungsnichtlinearitäten sowie die Möglichkeiten der vereinfachten Inversion der mit Oberwellen erweiterten Induktivitätsmatrix in den Spannungsgleichungen in Matrizenform. Auch die Simulationseffizienz unter Einsatz von unterschiedlichen numerischen Solvern für verschiedene Modelle unter Berücksichtigung der Stromverdrängung wurde untersucht [3]. Ferner wurden Ansätze zur optimalen Auswahl der Modellierungstiefe für die Stromverdrängung in den Rotorstäben und die Oberwelleneffekte in einem einheitlichen transienten Modell erarbeitet [4].

[1] M. John, A. Mertens, M. Popp, und W. Mathis, Model order reduction for a full scale grid converter for grid simulations, EPE17 ECCE Europe, 2017.

[2] M. John und A. Mertens, Harmonic Domain Model of an Open-Loop Controlled PWM Converter, ISTET, Ilmenau, Germany, 2017.

[3] O. Korolova. M. Popp, W. Mathis and B. Ponick., Performance of Runge-Kutta family numerical solvers for calculation of transient processes in AC machines, Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2017.

[4] O. Korolova, J. de la Torre and B. Ponick Transient modeling of AC machines considering second order effects, ISTET, Ilmenau, Germany, 2017

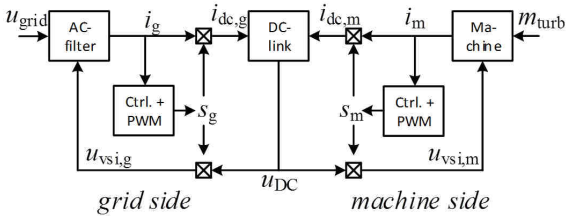


Fig. 0.32: Blockdiagramm zur Veranschaulichung der Wechselwirkungen des Umrichters
Block diagram to visualize converter interaction

results obtained from FEM calculations and from measurements on test benches. To improve the computing efficiency and couple the models with the grid models, different numerical aspects of a transient simulation of electrical machines have been studied. The focus was on the mathematical formulation of saturation nonlinearities as well as on the possibilities of a simplified inversion of the inductance matrix extended with higher harmonics in the voltage equations in a matrix form. Another research issue was to analyse the simulation efficiency by means of different numerical solvers considering current displacement [3]. Moreover, approaches for an optimal selection of the modelling accuracy for the current displacement in rotor bars and the harmonic effects have been developed in a uniform transient model. [4].

Bezahlbare Elektrische REIchweite durch ModularitäT (BEREIT)

von Dipl.-Ing. Felix Müller-Deile und M.Sc. Hannes Heseding

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Verbundprojekts BEREIT wurden modulare und skalierbare Antriebsstrangkonzepte erarbeitet, prototypisch realisiert und am Prüfstand untersucht. Ziel des Projekts war es, die Kosten des Antriebsstrangs eines Plug-In-Hybridfahrzeugs zu senken. Dazu wurde ein Konzept der Längen- und Strangzahlskalierung unter Verwendung eines einheitlichen Stators für permanentmagnet-erregte Synchronmaschinen (PMSM) und Induktionsmaschinen (IM) untersucht. Bei diesem Konzept wird die E-Maschine bei steigender Leistung in diskreten Sprüngen in ihrer Länge skaliert, wobei der Blechschnitt identisch bleibt. Wird die Strangzahl nicht skaliert, steigt der benötigte Strangstrom (bei gleicher Strangspannung) proportional zur Länge bzw. zur Leistung der Maschine. Durch eine Strangzahlskalierung wird der Strangstrom annähernd konstant gehalten, wodurch der Einsatz identischer Halbleitermodule (in unterschiedlicher Anzahl) innerhalb einer Baureihe ermöglicht wird. Durch den Einsatz von PMSM- und IM-Rotoren in einem einheitlichen Stator wird die Modularität des Konzepts weiter erhöht und eine Feinskalierung der Motorleistung erreicht. Eine Erhöhung der Strangzahl beeinflusst jedoch das Betriebsverhalten der E-Maschine und des zugehörigen mehrphasigen Wechselrichters. Mithilfe der Prototypen, die sowohl drei- als auch sechssträngig geschaltet werden können, wurden die Vor- und Nachteile von sechssträngigen gegenüber dreisträngigen Antriebssystemen untersucht. Aufgrund des höheren Hauptwellenwicklungsfaktors der sechssträngigen Wicklung konnten das Drehmoment und die Bemessungsleistung der E-Maschinen im Vergleich zu den dreisträngigen Varianten um etwa 4% erhöht werden. Bei den sechssträngigen E-Maschinen entstehen aufgrund von Sättigung des Blechpakets und durch Nichtlinearitäten in der Ausgangsspannung des Wechselrichters deutlich höhere Oberschwingungsströme fünf- und siebenfacher Grundfrequenz, welche zu erhöhten Verlusten führen können und die Regelung der Grundschwingungsströme erschweren. Aus diesem Grund wurde ein Regel- und Steuerverfahren erarbeitet, mit dem eine deutliche Reduzierung der Oberschwingungsströme dieser Frequenzen erreicht werden konnte (Fig. 0.33).

Der Wechselrichter erzeugt neben der Grundschwingungsspannung zusätzliche hochfrequente

Affordable Electrical Range by Modularity (BEREIT)

by Dipl.-Ing. Felix Müller-Deile and M.Sc. Hannes Heseding

Within the scope of the joint research project BEREIT funded by the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi), modular and scalable drive topologies were developed and prototypes constructed and tested on a test bench. The project's goal was a cost reduction for the drive train components used in plug-in hybrid electric vehicles. For this purpose, we developed a concept of scaling the length and the number of phases using an identical stator in permanent magnet synchronous machines (PMSM) and induction machines (IM). According to the concept, the electric motor is scaled in discrete steps with increasing power in its length, whereas the laminations remain unchanged. If the number of phases is not scaled, the required phase current increases proportional to length and power of the machine. By scaling the number of phases, the power related to one phase is kept nearly constant. The advantage is that (a varying number of) identical semiconductor modules can be applied throughout the whole series of power trains. The use of PMSM and IM rotors integrated in identical stators increases the modularity of the concept, achieving a precise scaling of the motor performance. Nevertheless, increasing the number of phases affects the performance of the electric motor and of the associated multiphase inverter. The pros and cons of six-phase drive systems in comparison to three-phase drive systems were tested with the prototypes, which are switchable from three to six phases. Due to the higher fundamental winding factor in the six-phase winding, torque and rated power of the electric motor could be increased by about 4% compared to the three-phase version. Due to saturation of the core and nonlinearities in the inverter output voltage, six-phase electric motors produce considerably higher harmonic currents of fifth and seventh harmonic order compared to the fundamental frequency which may lead to increased losses and difficulties in the control of the fundamental currents. For this reason, a control method was developed which reduces harmonic currents at these frequencies considerably (Fig. 0.33). Apart from the fundamental voltage, the inverter generates additional high-frequency harmonic voltages which lead to losses in the electric motor. In six-phase electric motors, these losses are higher than in three-phase versions. It could be proved that PWM interleaving of the three-phase subsystems considerably reduces current ripple at the DC link of six-phase in-

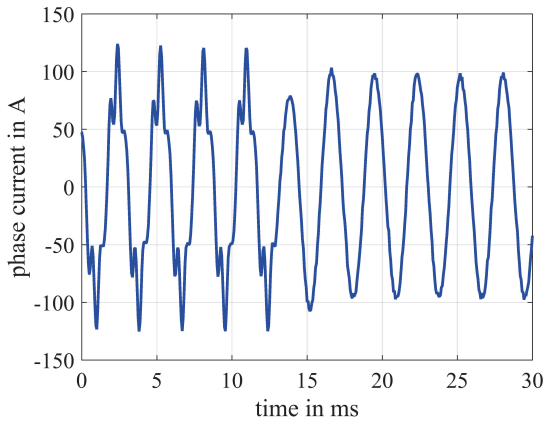


Fig. 0.33: Kompensation der Oberschwingungsströme der sechssträngigen PMSM
Compensation of harmonic currents in six-phase PMSM

Oberschwingungsspannungen, welche zu Oberschwingungsverlusten in der E-Maschine führen. Diese Oberschwingungsverluste sind bei sechssträngigen E-Maschinen höher als bei dreisträngigen. Es konnte nachgewiesen werden, dass bei sechsphasigen Wechselrichtern durch ein Verschieben der PWM-Carriersignale der dreiphasigen Subsysteme (PWM-Interleaving) die Wechselstrombelastung des Zwischenkreiskondensators deutlich reduziert werden kann, wodurch dieser kleiner dimensioniert werden könnte. Durch das PWM-Interleaving steigen die Oberschwingungsverluste in der E-Maschine allerdings deutlich an (Fig. 0.34). Aus diesem Grund sollte das PWM-Interleaving im Fahrzyklus nur selektiv aktiviert werden. Insgesamt konnte gezeigt werden, dass eine modulare Bauweise mit Strangzahlvariation Kostenvorteile bis zu 8% gegenüber separaten Einzellösungen hat, wobei die Energieeffizienz der Antriebssysteme, über die gesamte Baureihe gesehen, annähernd gleichbleibt, sich also effizientsteigernde und vermindernde Faktoren bei sechssträngigen Systemen nahezu aufheben.

verters, leading to the possibility to reduce the size of this component. However, PWM interleaving increases the harmonic losses in the electric motor significantly (Fig. 0.34). For this reason, PWM interleaving should only be activated selectively during the driving cycle.

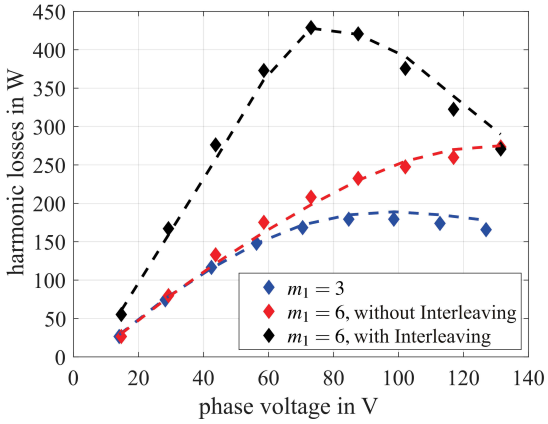


Fig. 0.34: Oberschwingungsverluste durch Wechselrichter-speisung in der PMSM
Harmonic losses in PMSM due to inverter supply

On the whole, it could be shown that a modular design with a varying number of phases yields cost benefits of up to 8% compared to separate individual solutions, while achieving almost constant energy efficiency over the whole series of power trains due to the fact that positive and negative effects of six-phase drive systems compensate each other.

SFB 880 Grundlagen des Hochauftriebs künftiger Verkehrsflugzeuge

von Dipl.-Ing. Jan Müller
und Dipl.-Ing. Gerrit Narjes

Um trotz eines steigenden Luftverkehrsaufkommens die Belastung der Bevölkerung in Flughafennähe durch Lärm und Abgasemissionen zu begrenzen, sollten künftige Verkehrsflugzeuge nicht nur leise und energieeffizient sein, sondern auch wesentlich schneller steigen bzw. sinken können. Der DFG-geförderte Sonderforschungsbereich 880 erforscht dazu u.a. neuartige Hochauftriebssysteme. Hieran beteiligt sich das IAL gemeinsam mit dem Institut für Turbomaschinen und Fluiddynamik mit einem Teilprojekt zu Kompakten elektrischen Kompressoren, dessen Ziel die Entwicklung eines direkt angetriebenen Verdichtersystems ist. Das Verdichtersystem soll innerhalb der Tragfläche nahe den Klappen Luft durch einen Kanal ansaugen, verdichten und über einen Spalt an der Klappe ausblasen, um die Auftriebseigenschaften zu verbessern (siehe Fig. 0.35). Zur Optimierung des Leistungsgewichts wird dieser Luftstrom auch zur Kühlung eingesetzt.

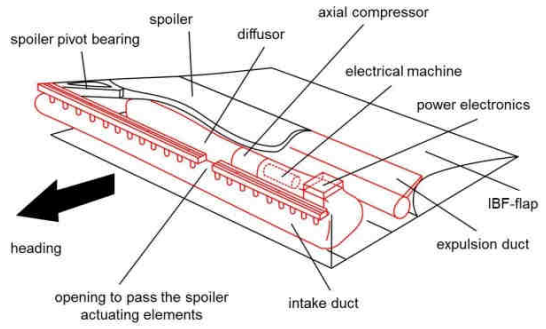


Fig. 0.35: Schematischer Aufbau eines Klappensegments inkl. Kompressorsystem
Schematic of one flap segment incl. the compressor system

In den letzten Jahren wurde das System bis zu einem Prototypen entwickelt und in 2018 auf einem Prüfstand getestet. Fig. 0.36 zeigt eine dreidimensionale, geschnittene Darstellung des vollständigen Kompressorantriebsstrangs. Auf der linken Seite befindet sich die Leistungselektronik am Lufteintritt gefolgt von der E-Maschine, die beide durch den erzeugten Luftstrom gekühlt werden. Die erzwungene Luftkühlung ist ausreichend, da das Hochauftriebssystem auf den Start und die Landung mit einer maximalen Betriebsdauer von 300 s begrenzt ist. Die maximale Verdichterdrehzahl liegt bei 60.000 min^{-1} bei einer Leistung von ca. 80 kW. Die für den transienten Betrieb ausgelegte E-Maschine

CRC 880 Fundamentals of Active High-Lift of Future Commercial Aircraft

by Dipl.-Ing. Jan Müller
and Dipl.-Ing. Gerrit Narjes

To reduce, despite the increasing air traffic volume, the environmental impact of noise and exhaust gas emission in the vicinity of airports, low-noise and energy-efficient aircraft with shorter climb and descent phase are the demands for the future. The focus of the DFG-funded Collaborative Research Centre 880 is, among others, on the development of novel high-lift systems. In cooperation with the Institute of Turbomachinery and Fluid Dynamics, the IAL is doing research work in the subproject Compact Electrical Compressors with the aim to develop a directly driven compressor system. The compressor system, which is located inside the wings close to the flaps, sucks air through an intake duct, compresses the air and expulses it through an opening at the flap in order to improve the high-lift process (see Fig. 0.35). This air flow is also used for component cooling, thus optimizing the power-to-weight ratio. In the last years, the system has been further developed into a prototype, which was then tested on a test bench in 2018. Fig. 0.36 shows a 3D sectional view of the full compressor power train. The power electronics is located at the air intake (left hand side) followed by the electric motor, both being cooled by the produced air flow. The forced air cooling is sufficient, since the high-lift system is limited to a maximum operating time of 300 s during take-off and landing.

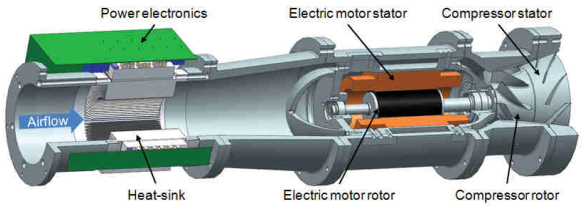


Fig. 0.36: 3D-Schnittbild des Kompressorsystems [1]
3D sectional view of the compressor system [1]

The maximum compressor speed is in the range of 60,000 rpm for an output power of approx. 80 kW. The electric motor designed for transient operation exhibits high power density of 8.9 kW/kg (active part) for the S2 duty type. Since the PMSM operates at high speed, the power electronics requires high output frequencies of up to 1,000 Hz and thus high switching frequencies. Liquid cooling can be avoided by using SiC MOSFET power modules.

weist eine hohe Leistungsdichte von 8,9 kW/kg (Aktivteil) im S2-Betrieb auf. Für die Leistungselektronik werden durch die hohe Drehzahl der PMSM hohe Ausgangs-frequenzen von bis zu 1.000 Hz und damit hohe Schaltfrequenzen benötigt. Um auf eine Flüssigkühlung verzichten zu können, werden SiC-MOSFET-Leistungsmodule eingesetzt, die eine Reduzierung der Verlustleistung und damit die erzwungene Luftkühlung ermöglichen. Darüber hinaus ist die Kühlkörper- und insbesondere die Finnengeometrie optimiert worden. Am Prüfstand konnte ein Wärmewiderstand des Kühlkörpers von Rth,CA von 0,076 K/W mit einem Ersatzlüfter, der mit 490 mş/h nur ca. 12% des finalen Volumenstroms des Verdichters erzeugt, nachgewiesen werden [2]. Die Leistungsmodule sind um 90ř versetzt über den Umfang am Kühlkörper verteilt, was eine Verkopplung der Wärmeströme reduziert. Eine dreidimensionale Leistungsplatine kombiniert den Zwischenkreis inkl. niederinduktiver Verschienung, die Gate-Treiber sowie die benötigten Sicherheitsfunktionen. Durch eine geschickte Platzierung der Zwischenkreiskondensatoren auf der Unterseite der Platine (siehe Fig. 0.37) wird eine Leistungsdichte von 10,8 kW/l erreicht.

[1] Kauth, F.; Narjes, G.; Müller, J.; Ponick, B.; Mertens, A.; Seume, J.: Compact Electrical Compressors for Active Flow Control in Autonomous High-Lift Systems, SFB 880 Fundamentals of high-lift for future commercial aircraft, Biennial Report, 2017

[2] Mueller, J.-K.; Mertens, A.: Power Electronics Design for a direct-driven Turbo Compressor Used as Advanced High-Lift System in Future Aircraft, IEEE Industrial Electronics Society IECON17, Peking, China, 29.10-01.11.2017

This reduces the power losses and thus enables forced air cooling. Furthermore, the heatsink geometry and in particular the fin geometry has been optimized. On the test bench, a thermal resistance of the heatsink Rth,CA of 0.076 K/W could be measured with an additional fan, with 490 mş/h producing only approx. 12% of the compressor's final volume flow [2]. The power modules are shifted by 90ř along the heatsink's circumference which reduces the coupling of the heat flow. A three-dimensional power PCB combines the DC link including low-inductance connection, the gate drivers as well as the necessary safety functions. With the DC-link capacitors located on the PCB's bottom side (see Fig. 0.37), a power density of 10.8 kW/l is achieved.

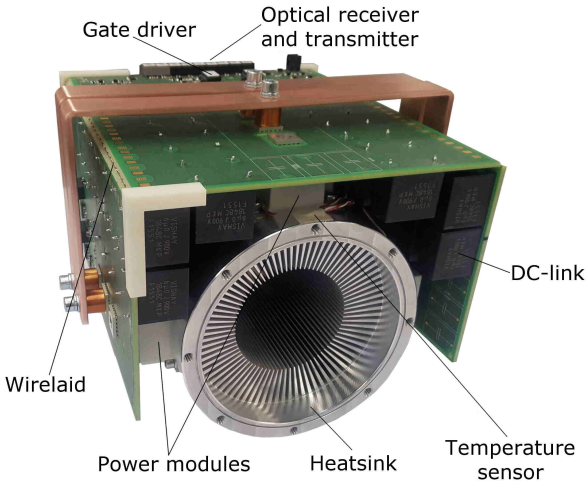


Fig. 0.37: Prototyp der Leistungselektronik
Power electronics prototype

Besondere Aktivitäten am IAL
Special Activities at IAL

Neues in und von FEMAG

von Dr.-Ing. Jörn Steinbrink

Nachdem in der letzten Ausgabe unseres Zweijahresberichtes von einer Periode mit einschneidenden Ereignissen berichtet wurde, steht dieser Bericht im Zeichen der Umsetzung der Neuausrichtung durch das FEMAG-Team und der langfristigen Weiterentwicklung. In den vergangenen Anwendertreffen haben wir die Wünsche der Anwender zu weiteren Funktionen von FEMAG zusammengetragen, diskutiert und initial bewertet. Darüber hinaus erreichen uns tagtäglich Fragen und Anregungen zur Entwicklung des Programms, seiner Schnittstellen und zur Bedienung. Für diese Mitwirkung möchten wir uns ausdrücklich bedanken, und wir wünschen uns, dass die FEMAG-Anwender auch weiterhin so aktiv auf die Unstimmigkeiten hinweisen und Impulse zur Weiterentwicklung geben.

Fig. 0.38: Blick in das Auditorium des Anwendertreffens 2016 in Ingolstadt
User meeting 2016 in Ingolstadt

Um die Entwicklung von FEMAG nun zielgerichtet zu gestalten, leiten uns die Fragen: Welche Funktionalität oder Kompetenz ist für den Nutzer der entscheidende Unterschied von FEMAG zu anderen FE-Programmen? Welche Entwicklung hat für die Anwender den größten Nutzen? Welche Funktionalitäten werden zur Beantwortung der Fragen in der Zukunft von den Nutzern erwartet? Wie können wir mit den uns zur Verfügung stehenden Ressourcen sowohl die kurzfristigen Anwenderfragen bzw. Fehlerkorrekturen als auch die langfristigen Weiterentwicklungen bewältigen?
Einen Auszug aus den Entwicklungsimpulsen und deren Umsetzung zeigen die beiden Ausschnitte

Novelties around FEMAG

by Dr.-Ing. Jörn Steinbrink

After having reported on a period of radical changes in the last issue of our biennial report, the current issue is about the planned restructuring and its implementation by the FEMAG team and the program's long-term development. On the occasion of previous user meetings, we assembled and discussed the users' special requests and specific demands regarding additional FEMAG functions and made an initial ranking. Besides, we are constantly receiving questions and suggestions relating to program enhancements, its interfaces and its operation. At this point, we expressly thank all FEMAG users for their intensive collaboration and would highly appreciate continued feedback regarding discrepancies and new impulses for FEMAG's further development. For a targeted development of FEMAG, we want to find the answers to the following questions: Which features or competencies of FEMAG make to its users the most important difference compared to other FE programs? Which development has the greatest benefits for the users? Which features do users expect for being able to solve the problems of tomorrow? How can we use the resources available to us in order to meet short-term user requests and eliminate any discrepancies successfully and at the same time promote FEMAG's further development in the long run? Below please find an excerpt from the introductory presentation held by the pro-FEMAG team on the occasion of the last user meeting in Mülheim/Ruhr, illustrating the emerging development impetus and its implementation.

Ranking	Impulse	Status 2016	Status 2017
31	Create BCH file also in XML format	femag tools	
15	Enhance script for AC: definition and excitation of windings, calculation with preset frequency, evaluations		cont.
15	Revise documentation (completely, comprehensible, exact)	End of 16	
13	Geometry import and export into standard CAD programs		
12	Ld-Lq ident.: store parameterizable loss values in result matrix		
10	(Complete) documentation of BCH file	Feedback	
10	Time step version of FEMAG: coupling of FEMAG with circuit environment, converter, ...		Beta TS implemented
8	Limit rotation to smallest symmetry unit; sometimes, slot pitch instead of pole pitch sufficient		Stud. proj. still pending
7	Improved calculation of induction machines		with TS
7	Interface to SCILAB or MATLAB analogous to FEMM	femag tools	
6	Double-layer winding with uneven number of turns in OS and US not considered sufficiently -> to be solved	8.3	
6	Enhance script: copy all masks that have been called up	cont.	
5	More examples for FSL programs		
4	More flexible distance between upper magnet and air gap	concrete specification	
4	Refer slot space factor to the gross instead of the net slot area	see docum.	

Fig. 0.41: Workshop Results 2015

With the FEMAG version 8.1 released in 2015 to

Be-wertg.	Anstoß	Status 2016	Status 2017
31	BCH-File zusätzlich als XML erstellen	femag tools	
15	Skript-Vervollständigen für AC: Definition und Bestromung von Wicklungen, Berechnung mit Frequenzvorgabe, Auswertungen		lfd.
15	Dokumentation überarbeiten (vollständig, nachvollziehbar, korrekt)	Ende 16	
13	Geometrieim- und -export in gängige CAD-Programme		
12	Ld-Lq-Ident.: Hinterlegen von parametrisierbaren Verlustwerten in Ergebnismatrix		
10	(Vollständige) Dokumentation des BCH-File	Feedback	
10	Zeitschritt-Version von FEMAG: Kopplung von FEMAG mit Beschaltung, Stromrichter, ...		Beta TS realisiert
8	Beschränkung der Drehung auf kleinste Symmetrieeinheit; z. T. reicht eine Nutteilung statt einer Polteilung		Stud. Arbeit noch offen
7	Bessere Berechnung von Asynchronmaschinen		mit TS
7	Schnittstelle zu SCILAB oder MATLAB analog zu FEMM	femag tools	
6	Zweischichtwicklung mit ungleicher Windungszahl in OS und US wird nicht richtig berücksichtigt -> beheben	8.3	
6	Skript erweitern: Nachbildung aller Aufrufe der Masken	lfd.	
5	Mehr Beispiele für FSL-Programme		
4	Abstand zw. oberem Magnet und Luftspalt flexibler gestalten	konkrete	Spezifikat.
4	Nutfüllfaktor auf Bruttonutfläche statt auf Nettonutfläche beziehen	s. Doku.	

Fig. 0.39: Ergebnisse des Workshops 2015

aus der einführenden Präsentation des proFEMAG-Teams vom letzten Anwendertreffen in Mülheim/R-uhr.

Anstoß / Anregung	Status
Verbesserung der Dokumentation: Handbuch aktualisieren und erweitern	
FEMAG-Homepage: Abschnitt „femagtools" inkl. Installationshinweise	
Wiki und Forum noch keinen Nutzen. Erwartung: fundierte Beiträge vom FEMAG-Team	lfd.
Frühere FEMAG-Versionen unter Windows 10 nicht mehr verwendbar, Bedarf aus firmenspezifischen Gründen (verifizierte Programmversionen und Ergebnisse)	Feedback nötig
FEMAG-DC Rel. 8.1 benötigt größere Anzahl an Iterationen als frühere Versionen und insbesondere auch im Vergleich zu Maxwell.	
FEMAG Rel. 8.1 unter Windows erheblich langsamer als frühere Versionen	
fsl-Befehl zur Ausgabe der Maxwellspannungen und Kraftwellenamplituden, vorteilhaft wäre automatische Erweiterung der Kraftverteilung auf Vollmodell	Q1/18
Möglichkeit der Spannungsvorgabe oder Kopplung mit Schaltungssimulator. Anmerkung: Nicht zwangsläufig transient, auch iterativ mit FEMAG-DC denkbar.	8.4, ohne Rückwirkung
Nichtlineares Materialverhalten besser approximieren	
Berücksichtigung Einfluss mechanischer Spannungen auf B(H)-Kennlinie	
Eisenverlustberechnung auf Basis von Messwerten PvFe(B,f) oder besseres Fitting	
Möglichkeit zur Ausgabe der Plots von Multiple-I/x oder Rel./PM-Sim. in Skript	Q4/18+FEMAG Tools
Identifikation Ld/Lq und Psid/Psiq liefern unterschiedliche Parameterwerte	
Integration von FESI ähnlich wie fsl + FML	
fsl-Befehl zur Stromvorgabe basierend auf poc-Files	Q2/18
FEMAG-DC-EVAL auch als 32 Bit-Version, weil viele Studis oder HS-Einrichtungen alte Betriebssysteme verwenden	nur für 8.1-Version
Funktionsfähigkeit Ld-Lq-Identifikation-Alternativ überprüfen	
therm. Ersatznetzwerk aus dem TH-Modul ableiten	
Magnetverlustberechnung (bei Segmentierung)	lfd.

Fig. 0.40: Anregungen aus dem Anwendertreffen 2016

Mit den seit 2015 erschienenen FEMAG-Versionen 8.1 bis aktuell 8.4 erfolgt eine konsequente Fokussierung auf Stabilität, selektiven Ausbau der Funktionalität (script, fml, femagtools, neue Module ME, TH und TS) und anwendungsorientierte Neuerungen z.B. zur Reduktion der Rechenzeit oder zu verbesserten Ergebnissen durch genauere BH-Kurven-Approximation oder genauere PM-Verlustbestimmung. Weiterführende Details zu den aktuellen Entwicklungen finden Sie auf der Homepage www.profemag.ch im Downloadbereich zusammen mit den aktuellen Programmversionen und den freigegebenen Vorträgen sämtlicher Anwendertreffen. Stöbern Sie dort, sofern Sie es nicht sowieso schon regelmäßig tun, und teilen Sie uns Ihre Anforderungen mit, damit FEMAG auch weiterhin die Antworten auf Ihre Fragen liefern kann.

the latest version 8.4, the focus has been clearly on stability, selective feature enhancements (script, fml, femag tools, the new ME, TH and TS modules) and application-oriented novelties, such as reduced computing time and improved results through better B-H curve approximations or improved PM loss determination. For further details please refer to the FEMAG website www.profemag.ch and visit the download area, including the latest program versions and the released presentations of all user meetings. Catch up on the latest news and tell us your specific demands. That makes FEMAG stay up to date to provide you always with the right solutions to your problems.

Impulse / Suggestions	Status
Improved documentation: update and enhance user manual	
FEMAG homepage: Section "femagtools" incl. installation instructions	
No benefits from wiki and forum yet. Expected: profound contributions by FEMAG team	cont.
Prev. FEMAG versions not supported by Windows 10 any more, requested for company-specific reasons (verified program versions and results)	Feedback required
FEMAG DC Rel. 8.1 requires larger number of iterations than prev. versions and esp. compared to Maxwell.	
FEMAG Rel. 8.1 under Windows much slower than prev. versions	
fsl command for output of Maxwell voltages and force wave amplitudes, automatic enhancement of force distribution to full model would be beneficial	Q1/18
Optional voltage presetting or coupling with switching simulator. Note: not necessarily transient, iterative with FEMAG-DC possible.	8.4, without reaction
Better approximation of non-linear material behaviour	
Consider the effect of mechanical stress on B-H curve	
Iron loss calculation based on measured values PvFe(B,f) or better fitting	
Optional plotting of multiple I/x or rel./PM sim. in script	Q4/18+FEMAG Tools
Ld/Lq and Psid/Psiq identification provide different parameter values	
Integration of FESI similar to fsl + FML	
fsl command for current presetting based on poc files	Q2/18
FEMAG-DC-EVAL also as 32-bit version, because many stud. or univ.inst. use old operating systems	for 8.1 version only
Check functioning of LD-LQ-alternative identification	
Derive therm. equivalent circuit from TH module	
Magnetic loss calculation (in case of segmentation)	cont.

Fig. 0.42: Suggestions from User Meeting 2016

Microgrid-Prüfstand

von Dipl.-Ing. Malte John,
M.Sc. Daniel Herwig,
M.Sc. Marc Dokus

Dieser Prüfstand ermöglicht es, reale Netzkonfigurationen verschiedener Spannungsebenen in einem leistungsskalierten Maßstab nachzubilden. Der Fokus liegt dabei auf Netzen mit einer hohen Durchdringung leistungselektronischer Komponenten. Dafür wird ein Netzverbund aus mehreren Umrichtern im Bereich einiger zehn Kilowatt im Labor aufgebaut. Ziel ist es, Wechselwirkungen zwischen einzelnen leistungselektronischen Systemen sowie passiver Elemente des Netzes untersuchen zu können. Außerdem ermöglicht der Prüfstand die Erprobung alternativer Netzaufbau- und Netzführungsmethoden zukünftiger dezentralisierter Netze. Eine Konzeptübersicht des Prüfstandes ist in Fig. 0.44 dargestellt.
Die passiven Betriebsmittel zwischen den Anlagen werden durch ein modulares Baukastensystem aus Leitungsmodellen abgebildet. Die erste Ausbaustufe besteht aus zehn Kabelmodellen (NA2XSY 3x1x120 mmš) mit einer äquivalenten Länge von 2,1 km bei einer skalierten Nennspannung von 20 kV. Die gleichen Modelle können innerhalb eines Niederspannungsnetzes verwendet werden und entsprechen hierbei dem Typ NAYY 4x150 mmš mit einer äquivalenten Länge von 300 m. Weiterhin wird der Prüfstand zukünftig um lineare und nichtlineare Lasten ergänzt. Zur Abbildung des Netzanschlusspunktes (klassisches öffentliches Netz) wird ein Umrichtersystem als Netzemulator eingesetzt. Dies ermöglicht eine entkoppelte Vorgabe von Netzparametern, wie Frequenz, Oberschwingungen oder Asymmetrien. Die verwendeten Umrichter der Fa. TriPhase sind in der Lage, Matlab/Simulink-Modelle in Echtzeit auszuführen. Dies erlaubt neben der Abbildung des elektrischen Systems auch die Modellierung weiterer Komponenten der Leistungsflusskette. So soll auch der mechanische Antriebsstrang einer Windenergieanlage bei bekanntem Windverlauf an den Rotorblättern in vereinfachter Form emuliert und untersucht werden. Zur Messwerterfassung wird ein dezentrales, synchronisiertes Messsystem mit einer Abtastrate von 10 kHz eingesetzt. Die Daten können digital in einer virtuellen Netzleitstelle zusammengefasst und dargestellt werden. Jeder Messpunkt erfasst dabei dreiphasig Strom und Spannung. Der Prüfstand ist in dieser Ausbaustufe (siehe Fig. 0.43) aus einer Kooperation verschiedener Projekte entstanden. Es ist vorgesehen, den Prüfstand in weiteren Abschnitten kontinuierlich auszubauen.

Microgrid Test Bench

by Dipl.-Ing. Malte John,
M.Sc. Daniel Herwig,
M.Sc. Marc Dokus

The test bench enables the modelling of real grid configurations for a scaled output power at different voltage levels. The focus is on grids with a high penetration of power electronic components. For this purpose, a grid model consisting of several converters in the range of some ten kilowatts has been set up in the laboratory. The aim is to analyse the interactions between the individual power electronic systems as well as between the passive grid elements. Moreover, the test bench can be used to investigate alternative grid configurations and control methods for future distributed grids. An overview of the test bench is shown in Fig. 0.44. The passive components between the units are modelled in hardware, using a modular system of power line models. The initial configuration consists of ten line models (NA2XSY 3x1x120 mmš) with an equivalent length of 2.1 km each and 20 kV scaled output power. The line models can also be used for a low-voltage grid using NAYY 4x150 mmš with an equivalent length of 300 m. Future test bench enhancements will also include linear and nonlinear loads. The grid connection point (classical public mains) is simulated by a converter system emulating the grid. This enables a decoupled setting of the grid parameters, e.g. frequency, harmonics or asymmetries. The TriPhase converters are able to execute Matlab/Simulink models in real time. Apart from the electrical system, modelling of further components in the power flow chain is also possible. For example, the mechanical drive train of a wind turbine could be emulated and analysed in a simplified form for a known wind flow at the rotor blades. A decentralized, synchronized measurement system captures the measured data with a sample rate of 10 kHz, the data being merged and depicted in a virtual system control centre. Three-phase current and voltage measurement is done for each measuring point. The present test bench configuration shown in Fig. 0.43 is the result of several joint projects. Further enhancements of the test bench are planned through future projects.

Fig. 0.43: Konzeptübersicht des Microgrid-Prüfstands am IAL
Overview of the IAL microgrid test bench

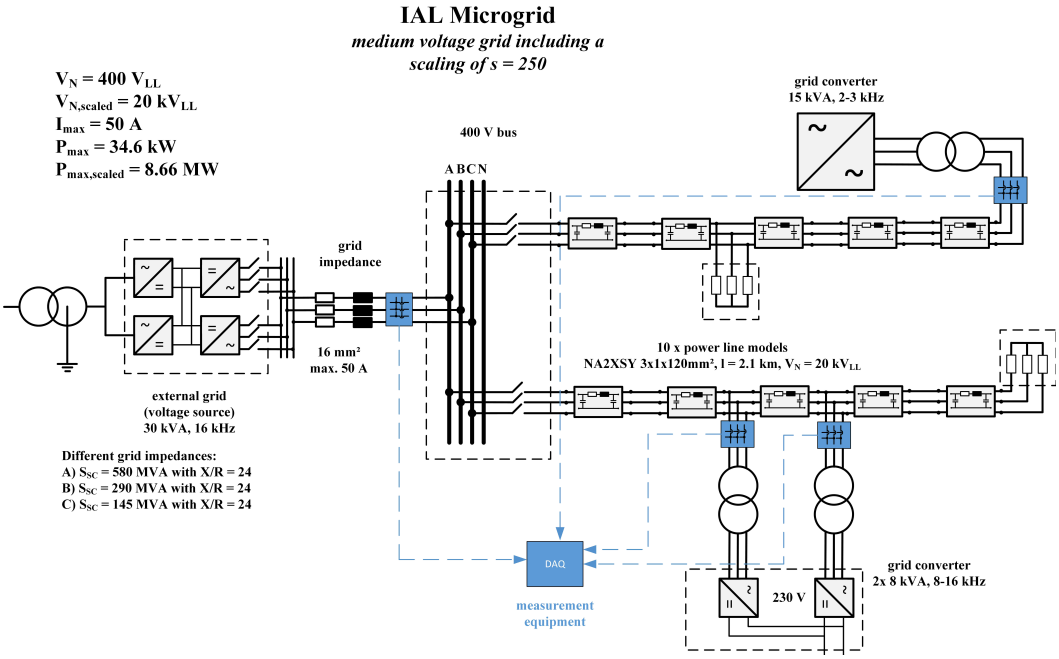


Figure 0.44: Exemplarische Darstellung einer Netzkonfiguration auf Mittelspannungsebene
Example of a medium-voltage grid configuration

HorsePower Hannover

von M.Sc. Benjamin Knebusch

HorsePower Hannover e.V. ist seit 2007 das Formula Student-Team der Leibniz Universität Hannover. Das Team besteht aus momentan ca. 80 Studierenden aus Elektrotechnik, Maschinenbau, Informatik, Mechatronik und Wirtschaftswissenschaften. Im internationalen und interdisziplinären Konstruktionswettbewerb Formula Student geht es darum, innerhalb eines Jahres einen Rennwagen selbst zu entwickeln und zu fertigen. Neben dem Konstruieren und Schrauben gilt es zudem, Sponsoren zu finden, ohne die die Finanzierung und Umsetzung des Projekts nicht möglich wäre. Im Sommer jedes Jahres können sich die Rennwagen dann weltweit auf den Formel-1-Rennstrecken mit den Fahrzeugen konkurrierender Universitäten und Fachhochschulen messen.

Fig. 0.45: Der eH17
eH17 racing car

Das IAL fördert das HorsePower-Team sowohl mit Rat und Tat bei technischen Fragen als auch durch die Möglichkeit, die Infrastruktur des IAL nutzen zu können, um beispielsweise Laboraufbauten oder Prüfstände umzusetzen. Mit dem eH11 baute HorsePower in der Saison 2011 seinen ersten Elektrorennwagen. Zuvor war das Team nur mit Verbrenner-Fahrzeugen am Start. Seit der Saison 2014 wird das Fahrzeug von vier radindividuell ansteuerbaren Elektromotoren angetrieben und verfügt über das erste in Hannover gebaute Kohlefaser-Monocoque. Der eH17 (Fig. 0.45) ist die vierte Ausbaustufe dieses Konzepts und wurde erstmals mit einem kompletten Aerodynamik-Paket ausgerüstet, welches auf der Grundlage studentischer Arbeiten entwickelt wurde. Bei der Formula Student geht es nicht nur um die beste Technik und die schnellsten Rundenzeiten, die in den dynamischen Disziplinen gemessen werden, sondern auch um die sogenannten statischen Disziplinen. Diese fordern dazu auf, für das konstruierte Fahrzeug ein Verkaufsmodell in einem Business-Plan aufzustellen, wobei

HorsePower Hannover

by M.Sc. Benjamin Knebusch

In 2007, HorsePower Hannover e.V. was founded as the Formula Student team of Leibniz Universität Hannover. At present, about 80 students from electrical and mechanical engineering as well as from computer science, mechatronics and economics are actively participating in the project. The goal of the international and interdisciplinary design competition is the design of a racing car that is built by the participating students within a year's time. Fund raising is another major challenge of the competition. Every year in summer, universities from across the globe have the opportunity to compete with each other on Formula One race tracks all over the world. The IAL supports the Hannover HorsePower team not only in technical questions, but also provides the possibility to make use of the institute's infrastructure, for example to realize laboratory setups or test benches. In 2011, HorsePower developed its first electric racing car, the eH11. Previous cars were equipped with internal combustion engines. Since 2014, the racing car has been equipped with four electric motors, controllable for each wheel independently, and with the first carbon fibre monocoque built in Hannover. The eH17 (Fig. 0.45), which is the fourth version of the concept, was equipped with a full aerodynamics package, developed based on student theses. The Formula Student challenge focuses not only on dynamic events, i.e. whose car or lap time is best, but also on so-called static events. These include the drafting of marketing and business plans with the aim to convince a jury of fictitious investors of the presented concept. Moreover, the costs have to be listed up in the so-called cost report, and the decisions made throughout the design phase have to be presented in the engineering design report to an expert jury. In 2017, there started a third competition class of the Formula Student Germany design challenge: the Formula Student Driverless (FSD) competition (Fig. 0.46). The task is to develop and build a racing car that can run autonomously while meeting all regular requirements of the Formula Student competition. HorsePower Hannover has tackled the task already in the first year of the new challenge and modified last year's racing car, the eH16, which can now be run without a driver. This involves new challenges in addition to the tasks already known by the students running a self-developed racing car. Apart from the increasing complexity of the vehicle software, the new racing car has to be equipped with additional actuators to be able to control the steering and brake system as well as the drive train autonomously. In 2017, HorsePower Hannover reached place 6 in the FSD and place 24 in the FSE competition.

eine Jury aus fiktiven Investoren vom erarbeiteten Konzept überzeugt werden muss. Daneben müssen eine Kostenaufstellung für das Fahrzeug, der sogenannte Cost Report, erstellt und die im Laufe der Entwicklung getroffenen Entscheidungen in einem Design Report vor einer Expertenjury dargelegt werden. Seit dem Jahr 2017 ist noch eine dritte Wettbewerbsvariante bei der Formula Student Germany hinzugekommen: Die Formula Student Driverless (FSD) (Fig. 0.46). Hierbei besteht die Aufgabe in der Konzeption und Umsetzung eines voll autonom fahrenden Fahrzeugs, welches sonst den herkömmlichen Regularien der Formula Student genügt. HorsePower Hannover hat sich dieser Aufgabe bereits in der ersten Saison des Wettbewerbs gestellt und das Letztjahresfahrzeug, den eH16, als autonomes Fahrzeug umgerüstet. Zu den bereits bekannten Aufgaben beim Betrieb eines selbst entwickelten Rennfahrzeugs sind neue Herausforderungen hinzugekommen. Neben der steigenden Komplexität der Fahrzeugsoftware wird das Fahrzeug nun mit weiteren Aktuatoren ausgerüstet, um Lenkung, Bremse und Antrieb fahrerlos ansteuern zu können. HorsePower Hannover platzierte sich in 2017 auf den Rängen 6 für die FSD und 24 für die FSE.

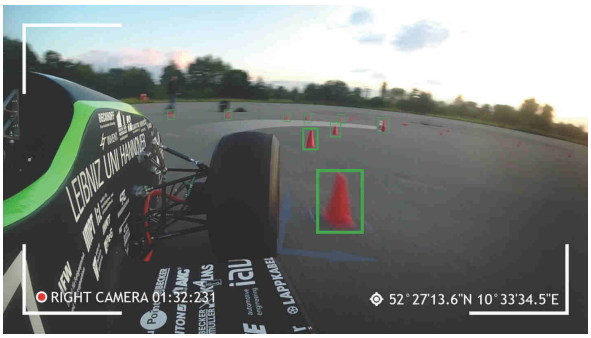


Fig. 0.46: Formula Student Driverless Wettbewerb
Formula Student Driverless competition

Großprüfstände am IAL GeCoLab und AutomotiveLab

von Dr.-Ing. Jörn Steinbrink

Die experimentelle Ausstattung des IAL reicht von Versuchen für die studentische Ausbildung über kleine und große, aber zeitlich begrenzt eingesetzte Versuchsaufbauten zur Validierung der Forschungsarbeiten der wissenschaftlichen Mitarbeiter bis hin zu flexiblen Prüfständen für den langfristigen Einsatz. Zu den Letztgenannten zählen das AutomotiveLab und das GeCoLab. Mit diesem Beitrag soll ein Überblick über die Möglichkeiten an beiden Standorten des IAL gegeben werden.

Fig. 0.47: Außenansicht des GeCoLab und des Testzentrums Tragstrukturen (Foto: Stricker Architekten)
Exterior view of the GeCoLab and the Test Centre for Support Structures (Photo: Stricker Architekten)

Fig. 0.48: Pressetermin der Professoren des IAL gemeinsam mit dem Präsidenten der Leibniz Universität Hannover bei der Eröffnungsveranstaltung des GeCoLab
Press conference of the IAL professors together with the LUH president on the occasion of the opening event of the GeCoLab

Die technischen Eckdaten des GeCoLab am Standort in Marienwerder wurden bereits im letzten Zweijahresbericht vorgestellt und werden hier nur knapp

Large-Scale Test Benches at IAL GeCoLab and AutomotiveLab

by Dr.-Ing. Jörn Steinbrink

IAL's laboratory premises include the equipment for student experiments carried out as part of academic teaching, small and large test setups temporarily used by the institute's research associates to validate their research work as well as two large-scale test benches, namely the AutomotiveLab and the GeCoLab, for a flexible use in long-term projects. These pages give you a short overview of IAL's two test facilities.

Fig. 0.52: Fachvorträge zur Windenergie
Specialist lectures on wind energy

Fig. 0.53: Fachvorträge zur Wasserkraft
Specialist lectures on hydropower

The basic technical parameters of the GeCoLab located in Marienwerder have already been given in our last biennial report and will therefore be mentioned at this point just in brief. The GeCoLab is designed for machine and converter testing up to about 1.5 MW. The lab has a direct 10kV connection which is transformed to 690 V primarily available in the lab. To supply the auxiliary devices, there are further voltage levels available. The most powerful one is the 400V level with approx. 275 kW. The system is designed for a flexible use with changing machines and converters under test. The speed range can be varied by means of an adapter gearing. At 1.5 MW, speeds from 300 to 2,000 min^{-1} are currently possible. With the permanent magnet synchronous

wiederholt. Das GeCoLab ist für Versuche an Maschinen und Umrichtern im Bereich bis etwa 1,5 MW konzipiert und verfügt über einen direkten 10kV-Anschluss, welcher über einen Transformator auf die in der Versuchseinrichtung primär zur Verfügung stehende Spannung von 690 V übersetzt wird. Darüber hinaus stehen für Versorgungszwecke von Hilfseinrichtungen verschiedene andere Spannungen zur Verfügung, z.B. die 400V-Ebene mit ca. 275 kW. Konzipiert ist die Anlage für einen flexiblen Einsatz mit wechselnden Prüflingen, sowohl für Maschinen als auch für Umrichter. Über Anpassgetriebe kann der Drehzahlbereich variiert werden, wobei aktuell bei 1,5 MW Drehzahlen zwischen 300 und 2.000 min^{-1} erreicht werden können. Mit der permanent erregten Synchronmaschine kann ein maximales Drehmoment von 40.000 Nm bereitgestellt werden. Ergänzt wurde die Ausstattung durch einen mobilen Kurzschlussschalter, bei dem selektiv pro Phase die Schaltaugenblicke mit beliebiger Phasenlage vorgegeben und die Kurzschlussströme präzise gemessen werden können. In den vergangenen Versuchskampagnen wurden Experimente an elektrisch erregten Synchronmaschinen, permanent erregten Synchronmaschinen und doppelt gespeisten Induktionsmaschinen durchgeführt.

Fig. 0.49: Experimentalmaschinen des GeCoLab
Test machines of the GeCoLab

Am Hauptstandort des IAL im Welfenschloss stehen für die Speisung des Labors verschiedene Drehspannungssysteme von 115 bis 690 V mit insgesamt 850 kVA Einspeiseleistung zur Verfügung. Außerdem steht eine Gleichspannungsversorgung mit ca. 85KW mit verschiedenen Gleichspannungsebenen zur Verfügung. Aus dieser Grundversorgung können die verschiedenen Laborplätze gespeist und im gesamten Laborbereich miteinander vernetzt werden. In das System können auch verschiedene Maschinensätze einspeisen, die sowohl als variable Gleich- oder auch als Wechselspannungsversorgung bzw. -last dienen können. Neben dieser flexiblen Art der Bereitstellung eines Netzes mit variabler Frequenz und Spannungshöhe können

machine, a maximum torque of 40,000 Nm can be achieved. The equipment was enhanced by a mobile circuit breaker, enabling a preselection of the switching instants for any phase angle and a precise measurement of the short-circuit currents. In previous measurement campaigns, tests were made on electrically excited synchronous machines, permanent magnet synchronous machines and doubly-fed induction machines.

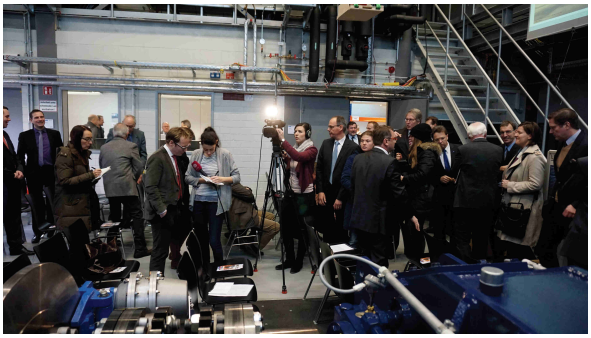


Fig. 0.54: Interview des Vertreters des niedersächsischen MWK
Interview of the representative of the Lower Saxony Ministry for Science and Culture

At IAL's main premises in the Guelph Palace of Leibniz Universität Hannover, the laboratory's power supply is provided by various three-phase systems between 115 and 690 V with an overall input power of 850 kVA. There is also a DC power supply available with approx. 85 KW on different DC voltage levels. This basic power system supplies every single workplace, creating a networked laboratory environment. Additionally, several machine sets can feed into the system, serving either as a variable DC or as an AC supply and load, respectively. Apart from such flexible grid supply with variable voltage and frequency, analogous power amplifiers with 10 KW per phase can be used as a universal power source for all applications up to approx. 30 kHz to impress voltage or current without the need for converter-fed systems. In the last years, a larger test bench for automotive applications with two separate motor-generator sets has been set up. Each load unit consisting of e-machine and drive converter can be tested via a DC link on a test converter and a test machine at max. 90 KW continuous power and max. 12,000 min^{-1} speed. In case no test converter is available, the machine under test can be supplied by a flexibly usable (three- or six-phase) test bench converter. Thanks to easily integrable measurement equipment, the test setup can be automated in a short time, being able to handle large data volumes. At the moment, an electrically excited synchronous machine is tested on one of the test benches. On the second test bench, a six-phase PMSM is currently under test.

auch analoge Leistungsverstärker mit 10 KW je Phase spannungs- oder stromeinprägend als eine universelle Quelle für Anwendungen bis ca. 30 kHz eingesetzt werden, ohne auf umrichtergespeiste Systeme zurückzugreifen. Ein größerer Verbund ist ein in den letzten Jahren entstandener Prüfstand für Automotive-Anwendungen mit zwei Prüfplätzen, bei dem jeweils eine Belastungseinheit aus E-Maschine und Antriebsumrichter über einen Gleichstromzwischenkreis mit einem Prüflingsumrichter und einer Prüflingsmaschine mit Dauerleistungen bis zu 90 KW und Drehzahlen bis zu 12.000 min^{-1} untersucht werden können. Sollte kein Prüflingsumrichter bereitstehen, kann die zu untersuchende Maschine mit einem flexibel nutzbaren Prüfstandsumrichter (3- oder auch 6-phasig) versorgt werden. Der Aufbau wird durch leicht einbindbare Messtechnik schnell automatisierbar und kann mit großen Datenmengen umgehen. Aktuell befindet sich eine elektrisch erregte Synchronmaschine auf dem Prüfstand. An dem anderen Prüfplatz wird aktuell eine 6-strängige PMSM untersucht.

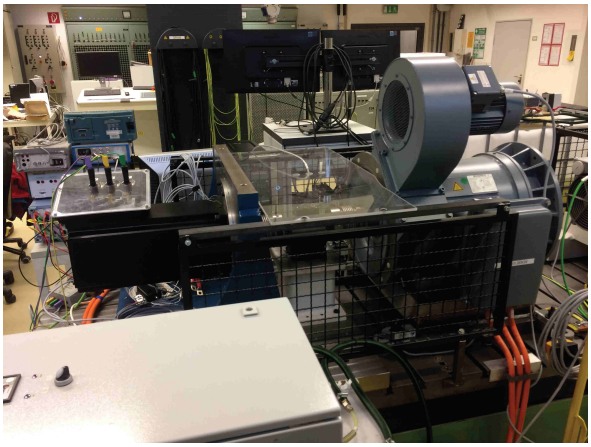


Fig. 0.50: Versuchsaufbau im AutomotiveLab mit einer PMSM
Test setup in the AutomotiveLab with a PMSM

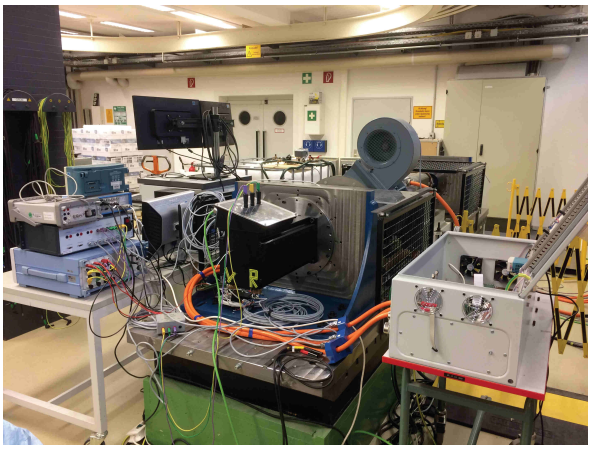


Fig. 0.55: AutomotiveLab mit Universalňumrichter und Messgeräten
AutomotiveLab with universal converter and measurement devices

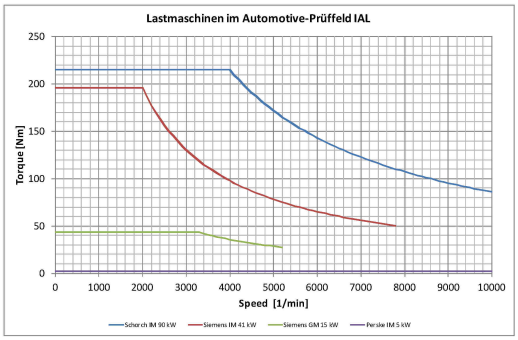


Fig. 0.56: Grenzkennlinien der Lastmaschinen im AutomotiveLab
Maximum curves of the load machines in the AutomotiveLab

Kenndaten GeCoLab

- Bemessungsspannung bis zu 690 V
- Permanenterregte Synchronmaschine mit zugehörigem Vollumrichter [PN = 1,2 MW, nN = 375 min^{-1} (0 - 750 min^{-1})]
- Doppeltgespeiste Asynchronmaschine mit zugehörigem Windumrichter [PN = 2,08 MW, nN = 1.780 min^{-1}]
- Umrichterbasierte Netznachbildung [SN = 4,4 MVA; Unsymmetrie, Frequenz und Harmonische frei einstellbar]
- maximales Komponentengewicht 20 t
- Spannfeldgrundfläche 10 m x 4,3 m

Kenndaten AutomotiveLab

- Bemessungsspannung bis zu 400 V (AC), 750 V (DC)
- Zwei Belastungsmaschinen mit zugehörigem Vollumrichter [PN = 90 kW, nN = 4.000 min^{-1} (0 12.000 min^{-1}) und PN = 41 kW, nN = 2.000 min^{-1} (0 8.000 min^{-1})]
- Gleichstromzwischenkreis
- Flexible und schnelle Montage an Prüfwinkeln
- Kühlwasseranschlüsse mit verschiedenen Systemen

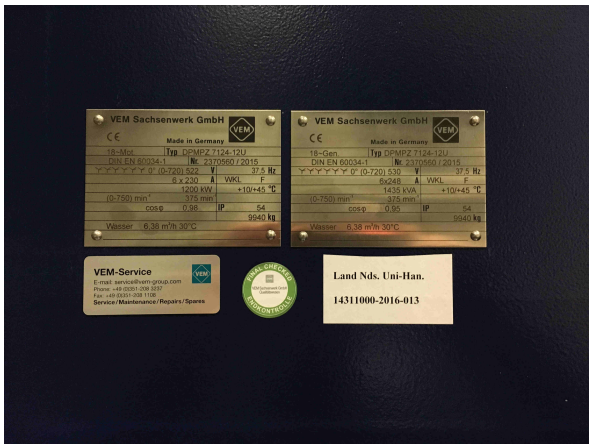


Fig. 0.51: Ein Prüfling im GeCoLab
Sample machine/converter under test in the GeCoLab

Equipment parameters GeCoLab

- rated voltage up to 690 V
- permanent magnet synchronous machine with respective full converter [PN = 1.2 MW, nN = 375 min^{-1} (0 - 750 min^{-1})]
- doubly-fed induction machine with respective wind converter [PN = 2.08 MW, nN = 1,780 min^{-1}]
- converter-based grid emulation [SN = 4.4 MVA; unbalance, freely adjustable frequency and harmonics]
- maximum component weight 20 t
- base area of span 10 m x 4.3 m

Equipment parameters AutomotiveLab

- rated voltage up to 400 V (AC), 750 V (DC)
- two load machines with respective full converter [PN = 90 kW, nN = 4,000 min^{-1} (0 12,000 min^{-1}) and PN = 41 kW, nN = 2,000 min^{-1} (0 8,000 min^{-1})]
- DC link
- Flexible and fast mounting to measuring angles
- Cooling water connections to various systems

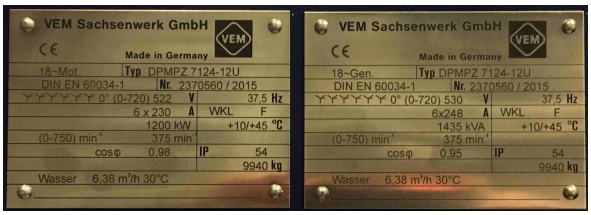


Fig. 0.57: Typenschild der PMSM im GeCoLab
Rating plate of the PMSM used in the GeCoLab

Lehre am IAL | Teaching at IAL

Lehrveranstaltungen

Im Bereich der Lehre sind einige Änderungen eine besondere Erwähnung wert. Zum einen werden Lehraufträge in unserer Fakultät wegen der damit verbundenen Auswirkungen auf die Auslastung zunehmend kritisch gesehen und auf das Notwendigste beschränkt. Das führte dazu, dass die Vorlesung Leistungshalbleiter und Ansteuerungen wieder allein von Prof. Mertens gehalten wird. Unser Dank gilt Herrn Dr. Kanschat von Infineon für die Bereicherung dieser Vorlesung in den vergangenen Jahren durch seine praxisnahen Beiträge. Wir bleiben verbunden, da eine Exkursion zur Modulfertigung von Infineon in Warstein nach wie vor zum festen Programm gehört. Zum zweiten hat sich durch eine Vorgabe aus der Zertifizierung unserer Studiengänge eine Umstellung ergeben. Module müssen nun mindestens 5 Leistungspunkte umfassen, während bisher eine zweistündige Vorlesung mit einer einstündigen Übung und Klausur auf 4 Leistungspunkte kam. Der zusätzliche Leistungspunkt wird ab 2017 durch zwei zum Themenbereich der Vorlesung passende und für alle Hörer verpflichtende Laborversuche verdient sofern das Testat erteilt wird. Dadurch entfallen in Zukunft die meisten unserer Oberstufenlabore, die je 8 Versuche umfassten. Wir hoffen, dass die Studierenden durch die nunmehr verpflichtende Teilnahme an den Laboren eine klarere Vorstellung von der Materie bekommen und den Stoff dadurch besser begreifen. Die damit verbundenen Umstellungen und Ergänzungen unserer Laborversuche schultern die wissenschaftlichen Mitarbeiter, allen voran die Laborleiter; dafür unseren herzlichsten Dank. Nicht zuletzt wird unser Vorlesungsangebot ab 2018 natürlich durch die neuen Juniorprofessoren bereichert, deren neue Veranstaltungen bereits in diesem Bericht zu finden sind.

Lectures

At this point, we would like to mention some changes in the field of academic teaching. Due to their impact on the utilization rate, guest lectureships are more and more seen as critical, so that our faculty has reduced them to a minimum. This is the reason why the lecture Power Semiconductors and Gate Drives is now held again by Prof Mertens alone. We sincerely thank Dr Kanschat of Infineon for enriching this lecture with his contributions from practice during the last years. Nevertheless, we will keep in touch: An integral part of our curriculum is an excursion to Infineon in Warstein and a visit of the module production. Moreover, altered certification requirements of our degree courses have led to some changes. Modules must now cover at least 5 credit points. In the past, a two-hour lecture plus one-hour exercise plus exam added up to 4 credit points. Since 2017, students have to earn the additional credit point by two obligatory labs in a subject area related to the lecture - lab attestation required. In future, this will replace most of our senior labs with eight experiments each. We hope that the obligatory attendance of labs will give students a clearer idea and better grasp of the subject they study. The changes and enhancements of our labs going along with this development are shouldered by our scientific staff and in the first place by our two lab supervisors; thank you very much to everybody! Last but not least, since the beginning of 2018, our curriculum is also enhanced by our new junior professors; their new lectures are already presented in detail in this report.

Grundlagen der elektromagnetischen Energiewandlung

(3. Semester), V2, Ü2
Vorlesung: Prof. Dr.-Ing. B. Ponick

Inhalt
Arten von Energiewandlern, Überblick über die verschiedenen Ausführungsformen und das Leistungsspektrum von elektrischen Maschinen und ihre wirtschaftliche Bedeutung.
Stationäres Betriebsverhalten von Gleichstrommaschinen: Aufbau, Induktion durch Drehung, Herleitung der Induktionsverteilung im Luftspalt aus Zonenplan, Strombelags- und Felderregerkurve, mechanische Kräfte, Wicklungsarten, Schaltungsarten, Drehmoment-Drehzahl-Kennlinien, Drehzahlstellung, Kommutierung, Seg-mentspannungskurve.
Verallgemeinerte Theorie von Mehrphasenmaschinen: Entstehung und Überlagerung der Wechselfelder der einzelnen Stränge, Ermittlung der zugehörigen Reaktanzen, Einführung der Oberwellenstreuung, Gesetz über die Aufspaltung der Luftspaltleistung, Drehmomentgleichung.
Analytische Theorie von Vollpol-Synchronmaschinen: Aufbau, Ersatzschaltbild, Spannungsgleichung, Leerlauf- und Kurzschluss-Kennlinie, Vorgänge bei der Synchronisation, Betrieb als über- oder untererregter Phasenschieber, Einfluss der Ankerrückwirkung, Zeigerbild, Stromortskurve, Drehmomentgleichung, Grenzen des stabilen Betriebs, Besonderheiten des Motorbetriebs.
Analytische Theorie von Induktionsmaschinen: Aufbau, Ersatzschaltbild, Spannungsgleichungen, Stromortskurve, Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie, Schleifring- und Käfigläufer, Stromverdrängungsläufer, Ausblick auf polumschaltbare Motoren, Anlasshilfen, Wicklungserwärmung beim Anlauf sowie Einphasen-Motoren.
Einführung in die Drehzahlstellung von Induktions- und Synchronmaschinen mittels Frequenzumrichtern.

Basics of Electromagnetical Power Conversion

(3rd term), V2, U2
Lecture: Prof. Dr.-Ing. B. Ponick

Contents
Types of electromagnetic power converters, overview of different types and power spectrum of electrical machines and their economic significance.
Steady-state performance of DC machines: design, induction via rotation, flux distribution in the air gap derived from winding diagram, distribution of ampere-turns and m.m.f curve; voltage equation; torque equation; types of windings, methods of connection, torque-speed characteristics, speed control, commutation, segment-to-segment voltage.
Generalized theory of polyphase machines: development and superimposition of alternating fields of the single phases, determination of the corresponding reactances, law concerning air-gap power splitting, torque equation.
Analytical theory of synchronous machines with cylindrical rotor: design, equivalent circuit diagram, voltage equation, no-load and short-circuit characteristic, synchronization process, over- or underexcited phase shift operation, influence of armature reaction, phasor diagram, current diagram, torque equation, limits of stable operation, special considerations for motor operation.
Analytical theory of induction machines: design, equivalent circuit diagram, voltage equations, current locus diagram, torque-speed characteristic, slip-ring and cage rotors, deep-bar cage motors, prospects of pole-changing motors, starting methods, temperature rise in the windings during start-up and single-phase motors.
Introduction to speed control of induction and synchronous machines via frequency converters.

Elektrische Antriebe

(4. Semester), V2, Ü1, L1
Vorlesung: Prof. Dr.-Ing. A. Mertens

Inhalt
Der Kurs bietet eine Einführung in elektrische Antriebe, die als mechatronisches System aus Aktoren, Sensoren, einer Steuerungselektronik und leistungselektronischen Stellgliedern aufgebaut sind. Basierend auf den elektromagnetischen Aktoren aus dem Kurs "Grundlagen der elektromagnetischen Energiewandlung", werden Kenntnisse über Aufbau und Varianten von elektrischen Antrieben für verschiedene Einsatzzwecke vermittelt. Anhand von praktischen Anwendungsbeispielen werden verschiedene Lösungen vorgestellt und ihre Eigenschaften miteinander verglichen. Dabei wird auch ein erster Überblick über die Regelung von elektrischen Antrieben gegeben.

Electric Drives

(4th term), V2, U1, L1
Lecture: Prof. Dr.-Ing. A. Mertens

Contents
The lecture offers an introduction into electric drives which, as a mechatronic system, consist of actuators, sensors, control electronics and power electronic control elements. Based on the electromagnetical actuators introduced in the lecture "Basics of Electromagnetical Power Conversion", knowledge of the design and different types of electric drives is provided for various fields of application. Different drive solutions are presented and their features are compared using specific examples, as they appear in practice. At the same time, a brief overview of the control of electric drives is given.

Berechnung elektrischer Maschinen

(5. Semester), V2, Ü1, L1
Vorlesung: Prof. Dr.-Ing. B. Ponick

Inhalt
Synchronmaschinen: Konstruktiver Aufbau und Kühlmethoden; Betriebsverhalten von Schenkelpolmaschinen im stationären Betrieb: Zeigerdiagramm, Ersatzschaltbild, Stromortskurve, Spannungsgleichungen, Potier-Dreiecke; permanent-erregte Synchronmotoren; synchrone Reluktanzmotoren; unsymmetrische Belastung von Synchrongeneratoren.
Einführung in die Drehfeldtheorie (Darstellung der Strombelags- und Feldkurve als unendliche Fourier-Reihen der räumlichen Wellen), zum Begriff der doppeltverketteten Streuung, Schrägung.
Elektromagnetischer Entwurf.
Theorie der Wicklungen: Entwurfsgesetze und Berechnung der Wicklungsfaktoren für Ganzloch- und Bruchlochwicklungen, strangverschachtelte Wicklungen, polumschaltbare Wicklungen, Zahnspulenwicklungen, Görges-Diagramme zur Bestimmung der Felderregerkurve und des Koeffizienten der doppeltverketteten Streuung. Parametrische Felder aufgrund von Leitwertschwankungen (z.B. Sättigungs-, Exzentrizitäts- und Nutungsfelder). Theorie der Stromverdrängung in Käfigen; Felddämpfung durch Käfig- und Schleifringläufer; Felddämpfung durch parallele Wicklungszweige der Ständerwicklung.
Tangential gerichtete mechanische Kräfte (allgemeines Bildungsgesetz, asynchrone und synchrone Oberwellendrehmomente); radial gerichtete mechanische Kräfte (Erzeugung des magnetisch erregten Lärms und mechanischer Schwingungen, einseitig magnetischer Zug und sein Einfluss auf die biegekritische Drehzahl der Welle).
Verlustarten; zusätzliche Verluste durch Oberwellen.

Theory of Electrical Machines

(5th term), V2, U1, L1
Lecture: Prof. Dr.-Ing. B. Ponick

Contents
Synchronous machines: design and cooling methods; performance of salient-pole machines in steady-state operation: phasor diagram, equivalent circuit diagram, locus diagram, voltage equations, Potier diagram; permanent magnet synchronous motors; synchronous reluctance motors; operation of synchronous generators with unsymmetrical load.
Introduction into rotating field theory, harmonic leakage, skewing. Electromagnetic design of polyphase machines.
Theory of windings: design laws and calculation of winding factors for integer-slot and fractional-slot windings, imbricated windings and change-pole windings; Goerges polygon for determination of the m.m.f. curve and the harmonic leakage coefficient.
Parametric fields based on fluctuations of the magnetic harmonic conductivity of the air gap (e.g. saturation, eccentricity and slotting fields).
Current displacement in rotor cages; field damping by cage and slip-ring rotors; field damping by parallel paths of the stator winding.
Tangential mechanical forces (generation, asynchronous and synchronous harmonic torques); radial mechanical forces (generation of magnetically excited noise and mechanical vibrations, unbalanced magnetic pull and its effect on the lateral critical speed of the shaft).
Types of losses; additional losses caused by spatial harmonics.

Elektrische Klein-, Servo- und Fahrzeugantriebe

(5. bzw. 7. Semester), V2, Ü1, L1
Vorlesung: Prof. Dr.-Ing. B. Ponick

Inhalt
Kostengünstige bzw. hochwertige Ausführungen, Übersicht über fremd- und selbstgeführte Motoren, grundsätzliche Konstruktionsmöglichkeiten, permanentmagnetische Werkstoffe.
Permanenterregte Gleichstrommotoren: Ausführungen (Walzen-, Scheiben-, Glockenläufer), Anwendungen, Magnetwerkstoffe, Betriebsverhalten, Drehzahlstellung.
Universalmotoren: Aufbau, Anwendungen, Betriebsverhalten, elektrische und elektronische Drehzahlstellung, Kommutierung.
Wechselstrom-Induktionsmotoren: Aufbau, Anwendungen, Wicklungsarten, Ausführungen (Kondensator-, Widerstandshilfsstrang-, Spaltpolmotor), Betriebsverhalten (verallgemeinerte Symmetrische Komponenten, Leitwertortskurve), Drehzahlstellung.
Wechselstrom-Synchronmaschinen: Aufbau (Ständer mit Nuten, ausgeprägten bzw. Klau-en-Polen), Motoren mit Magnet-, Hysterese- und Reluktanzläufer.
Grundlagen der Servoantriebe (Gleichstrom-, Induktions- und Synchron-Servomotoren). Fahrzeugantriebe: Klauenpol-Generatoren (Fahrrad, Kfz), Fahrmotoren (Arten, Besonderheiten, Energieeffizienz), Hilfsantriebe.

Small Electrical Motors, Servo and Vehicle Drives

(5th or 7th term), V2, U1, L1
Lecture: Prof. Dr.-Ing. B. Ponick

Contents
Low-priced and high-quality designs, overview of externally commutated and self-commutated motors, basic design concepts, permanent magnet materials.
Permanent magnet DC motors: designs (drum-type, disc-type and bell-shaped rotors), applications, magnet materials, performance, speed control.
Universal motors; design, applications, performance, electric and electronic speed control, commutation.
Single-phase induction motors: design, applications, winding types, designs (capacitor motor, resistance and auxiliary winding motor, split-pole motor), performance (generalized symmetrical components, permeance locus diagram), speed control.
Single-phase synchronous machines: design (stator with slots, distinct poles or claw poles), motors with permanent magnet, hysteresis and reluctance rotor.
Basics of servo drives (DC, induction and synchronous servo motors).
Vehicle drives: claw-pole generators (bicycles, motor vehicles), traction motors (types, specific features, energy efficiency), auxiliary motors.

Elektrische Klein- und Servoantriebe *

(3. Semester im Masterstudiengang) V2, Ü1, L1
Vorlesung: Jun.-Prof. Dr.-Ing. A. Ebrahimi

Inhalt
Grundlagen des Elektromagnetismus, Maxwellsche Gleichungen, Biot-Savart-Gesetz, Faradaysches Gesetz, Lorentzkraft, Grundlagen der elektromechanischen Energiewandlung.
Magnetisches Ersatzschaltbild für die Flussberechnung im magnetischen Kreis, Durchflutungsgesetz, permanentmagnetische Werkstoffe, ferromagnetische Werkstoffe, nichtlineare BH-Kennlinien, Hysterese- und Wirbelstromverluste.
Permanentmagneterregte Gleichstrommaschine, fremderregte Gleichstrommaschine, Reihenschlussmaschine, Universalmotoren, Ersatzschaltbilder, Arbeitspunktberechnung, Schleifen- und Wellenwicklungen, Ankerrückwirkung.
Grundlagen der Drehfeldtheorie, Drehstrom-Synchronmaschinen, permanentmagneterregte Synchronmaschinen, bürstenlose Gleichstrommotoren.
Grundlagen der Regelung elektrischer Maschinen, Leistungselektronik, Pulsweitenmodulation, Grundlagen von Getrieben und Kupplungen für den Einsatz in mechatronischen Systemen, Grundlagen der Sensorik.
Auslegung eines mechatronischen Systems, biomechanische Lastberechnung, elektromechanische Antriebsauslegung, Auswahl der Komponenten.

* wird auf Englisch abgehalten

Small Electrical Motors and Servo Drives *

(3rd term in master course) V2, U1, L1
Lecture: Jun.-Prof. Dr.-Ing. A. Ebrahimi

Contents
Fundamentals of electromagnetism, Maxwell's equations, Biot-Savart law, Faraday's law of induction, Lorentz force, fundamentals of electromechanical energy conversion.
Magnetic equivalent circuit for flux calculation in magnetic structures, Ampère's circuital law, permanent magnet materials, ferromagnetic materials, non-linear BH curves, hysteresis and eddy current losses.
Permanent magnet DC motor, separately excited DC motor, series wound DC motors, universal motors, equivalent circuits and load calculation, lap and wave windings, armature reaction.
Fundamentals of the rotating field theory, three-phase synchronous motor, permanent magnet synchronous motor, BLDC motors.
Basics of control of electrical machines, basics of power electronic devices, pulse width modulation, basics of gearing and mechanical components in mechatronic systems, basics of sensory systems.
Design of a mechatronic device, biomechani-cal calculation, electromechanical drive calculation, selection of motor, gearing, battery, power electronics and sensory systems.

* held in English language

Elektrische Antriebssysteme

(4., 6. bzw. 8. Semester), V2, Ü1, L1
Vorlesung: Prof. Dr.-Ing. B. Ponick

Inhalt
Betriebsverhalten von Induktionsmaschinen unter Berücksichtigung des Ständerwicklungswiderstands.
Besonderheiten der verschiedenen Antriebsarten beim Einschalten und beim Hochlauf: Betrachtung der Stoßgrößen, der Erwärmung und der Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie einschl. Sattelmomentbildung; Anlasshilfen.
Elektrische Bremsverfahren bei den unterschiedlichen Maschinenarten: Gegenstrombremsen, Gleichstrombremsen, generatorisches Nutzbremsen.
Drehzahlstellung bei Induktions- und Synchronmotoren: Erläuterung und Vergleich verschiedener Antriebssysteme bezüglich zusätzlicher Verluste, Erzeugung von Pendelmomenten und Kosten.
Erwärmung und Kühlung: Kühlarten, Betriebsarten, Anforderungen an die Energieeffizienz, Ermittlung der stationären und der transienten Wicklungserwärmung.
Einführung in die Berechnungsverfahren der symmetrischen Komponenten für Augenblickswerte und der Park-Transformation (Spannungsgleichungen, Augenblickswert des elektromagnetischen Drehmomentes) zur Simulation transienter Vorgänge. Nachbildung des mechanischen Wellenstranges (mehrgliedrige Schwinger, Betrachtungen zur mechanischen Dämpfung), Berücksichtigung der transienten Stromverdrängung; Diskussion der wichtigsten Ausgleichsvorgänge in Induktions- und Synchronmaschinen (Einschalten, symmetrische und unsymmetrische Klemmenkurzschlüsse, Spannungs-Wiederkehr, Netzumschaltung bzw. Fehlsynchronisation); Reaktanzen und Zeitkonstanten von Synchronmaschinen.
Konstruktive Einzelheiten: Bauformen und Kühlungsarten, explosionsgeschützte Maschinen, gegenseitige Beeinflussung von Kupplungs- und Lagerungsarten; Entstehung und Vermeidung von Wellenspannungen und Lagerströmen.
Betrachtungen zur Geräuschentwicklung von Antriebssystemen und ihrer Beurteilung.

Electrical Drive Systems

(4th, 6th or 8th term), V2, U1, L1
Lecture: Prof. Dr.-Ing. B. Ponick

Contents
Performance of induction machines considering the stator winding resistance.
Special considerations for start-up and acceleration of induction and synchronous motors: inrush characteristics, current and torque peaks, temperature rise during start-up and torque-speed characteristics.
Electric braking methods for induction machines: reverse field braking, DC braking, regenerative braking.
Speed control in induction and synchronous machines: description and comparison of different types of drive systems with regard to additional losses, generation of pulsation torques and cost.
Temperature rise and cooling: cooling methods, operating modes, demands on energy efficiency, determination of steady-state and transient temperature rise in the windings.
Introduction into the calculation scheme of symmetrical components for instantaneous values and the Park transformation (voltage equations, instantaneous value of electromagnetic torque) for simulation of transient phenomena. Simulation of mechanical shafting, influence of mechanical damping, modeling of transient current displacement in the rotor cage; discussion of the most important transient phenomena in induction and synchronous machines (starting, symmetrical and unsymmetrical short circuits, voltage recovery, transfer of bus-bar or incorrect synchronization); reactances and time constants of synchronous machines.
Details of mechanical design: types of construction and cooling methods, explosion-proof machines, mutual effects of different coupling and bearing assemblies; generation and avoidance of shaft voltages and bearing currents.
Investigation and evaluation of acoustic noise emissions.

Leistungselektronik I

(5. Semester), V2, Ü1, L1
Vorlesung: Prof. Dr.-Ing. A. Mertens

Inhalt
Aufgabe und Prinzip der Leistungselektronik (LE), Anwendungsfelder der LE, Bauelemente der LE, Verlustleistung und Kühlung. Netzgeführte Stromrichter: Gesteuerte und ungesteuerte Gleichrichter für Wechsel- und Drehstromsysteme, Kommutierung, Netzrückwirkungen.
Selbstgeführte Stromrichter: Gleichstromsteller, Puls-Wechselrichter mit eingeprägter Spannung, Steuerverfahren und Modulation. Stromrichtersysteme: Umkehrstromrichter, höherpulsige netzgeführte Stromrichter, Pulsumrichter mit Spannungszwischenkreis.

Empfohlene Vorkenntnisse: Grundlagen der Elektrotechnik

Power Electronics I

(5th term), V2, U1, L1
Lecture: Prof. Dr.-Ing. A. Mertens

Contents
Tasks and principles of power electronics, fields of application, components, power losses and cooling. Line-commutated power converters: controlled and uncontrolled rectifiers and converters for single and three-phase AC systems, commutation, mains interactions.
Self-commutated power converters: buck and boost DC to DC converters, three-phase voltage-source inverters, pulse with modulation and control.
Power converter systems: cyclo converters, line-commutated converters with higher number of pulses, PWM voltage-source AC to AC converters.

Recommended previous knowledge: Basics of Electrical Engineering

Leistungselektronik II

(6. bzw. 8. Semester), V2, Ü1, L1
Vorlesung: Prof. Dr.-Ing. A. Mertens

Inhalt
Pulswechselrichter: Raumzeiger-Darstellung, Raumzeigermodulation, Optimierte Pulsmuster, nichtideale Eigenschaften von Pulswechselrichtern und AbhilfemaSSnahmen.
Schwingkreise in der Leistungselektronik: Grundlagen, Kommutierungsschaltungen, Schaltentlastungen, Schwingkreiswechselrichter und Quasi-Resonanz-Stromrichter.
Schaltnetzteile: Transformatoren, Durchflusswandler, Sperrwandler.
Selbstgeführte Umrichter für hohe Leistungen: Mehrpunkt-Wechselrichter, Umrichter mit Stromzwischenkreis.

Empfohlene Vorkenntnisse: Grundlagen der Elektrotechnik, Leistungselektronik I

Power Electronics II

(6th or 8th term), V2, U1, L1
Lecture: Prof. Dr.-Ing. A. Mertens

Contents
Three-phase voltage-source inverters: space vector representation, space vector modulation, optimized pulse patterns, non-ideal characteristics of voltage-source inverters and corrective measures.
Oscillating circuits in power electronics: basics, commutation circuits, snubber networks, resonant and quasi resonant converters.
Isolated DC to DC converters: transformers.
Forward converter, flyback converter, bridge converter.
Self-commutated converters for high power: multilevel inverters, current-source inverters.

Recommended previous knowledge: Basics of Electrical Engineering, Power Electronics I

Einführung in das deutsche und europäische Energierecht

(5. Semester), V2
Vorlesung: Hon.-Prof. Dr. jur. K. Gent, M.L.E.

Inhalt
Der Energiemarkt ist ein spezieller Markt. Aufgrund der europäischen Vorgaben, die mit dem EnWG 2005 in nationales Recht umgesetzt wurden, ist dieser Markt weitgehend reguliert. Die Teilnehmer werden mit den europäischen und nationalen Energie-Rechtsgrundlagen vertraut gemacht, es werden mögliche Umsetzungsdefizite aufgezeigt sowie die energienetzbezogenen Ansprüche und Verpflichtungen erläutert. Die Vorlesung wird dabei wesentlich durch die gemeinsame Erarbeitung von Lösungen zu aktuellen Praxisfällen geprägt.
Vorlesungsziel ist es, den Teilnehmern die Fähigkeiten zu vermitteln, sich in diesen besonderen Markt einzuarbeiten.

Introduction into German and European Energy Law

(5th term), V2
Lecture: Hon.-Prof. Dr. jur. K. Gent, M.L.E.

Contents
The energy market is a very specific one. In accordance with the European regulations implemented by the EnWG 2005 into German law, this market is regulated to a large extent. Students will be taught about European and national "Energy Law". Possible deficiencies in the implementation of European into national law are shown, and requirements and obligations related to energy supply are explained. The lecture basically focuses on developing solutions for case scenarios currently found in practice.
Goal of this lecture is to provide students with the knowledge necessary to become familiar with this specific market.

Leistungshalbleiter und Ansteuerungen

(5. bzw. 7. Semester), V2, Ü1, L1
Vorlesung: Prof. Dr.-Ing. A. Mertens

Lernziel:
Verständnis der Zusammenhänge zwischen dem strukturellen Aufbau der Leistungshalbleiter-Bauelemente und ihren Betriebseigenschaften. Darauf aufbauend soll der Einfluss der zu schaltenden Last, der Ansteuerung und der Beschaltung auf das Betriebsverhalten der Leistungshalbleiter an Beispielen verdeutlicht werden.

Stoffplan:

- p-s-n-Übergang
- Raumladungszone und Sperrverhalten; Sperrschichtkapazität
- Durchlassverhalten; Trägerspeichereffekt bei bipolaren Bauelementen
- Zusammenhänge zwischen den geometrischen Parametern und den elektrischen Grenzdaten
- Dynamische Vorgänge beim Ein- und Abschalten
- Bipolartransistor
- Thyristor
- Aufbau von modernen MOSFETs und IGBTs
- Ansteuerung und Schaltverhalten von MOSFETs, IGBTs und IGCTs
- Integrierte Treiberschaltungen

Die Übung wird, z.T. von praktischen Experimenten begleitet.

Power Semiconductors and Gate Drives

(5th or 7th term), V2, U1, L1
Lecture: Prof. Dr.-Ing. A. Mertens

Learning Target:
Comprehension of the relation between the structural design of power semiconductor components and their performance characteristics. Based on this, the influence of the load to be switched, of the gate drive and of the circuit environment on the performance of power semiconductors shall be pointed out by means of examples.

Contents:

- p-s-n-junction
- Space charge region and blocking behaviour; junction capacitance
- Conduction behaviour; stored charge in case of bipolar components
- Relation between the geometric parameters and the electrical limits
- Dynamic behaviour when switching on and off
- Bipolar transistor
- Thyristor
- Structure of modern MOSFETs and IGBTs
- Gate drive and switching performance of MOSFETs, IGBTs and IGCTs
- Integrated gate drive circuits

The exercise is partly accompanied by practical experiments.

Regelung elektrischer Drehfeldmaschinen

(6. bzw. 8. Semester), V2, Ü1, L1
Vorlesung: Prof. Dr.-Ing. A. Mertens

Lernziel
Die Studierenden sollen das dynamische Verhalten von geregelten Antrieben kennenlernen, die Prinzipien der feldorientierten Regelung für elektrische Drehfeldantriebe verstehen und Kenntnisse über die Eigenschaften der verschiedenen Verfahren erlangen. Dazu wird als erstes der komplette Regelkreis eines Gleichstromantriebs betrachtet. Schwerpunkt der Vorlesung sind Antriebe mit Asynchronmaschinen. Antriebe mit Synchronmaschinen werden ebenfalls betrachtet.

Stoffplan:

- Dynamisches Verhalten der ungeregelten Gleichstrommaschine
- Drehmoment- und Drehzahlregelung der Gleichstrommaschine
- Lageregelung
- Regelungstechnisches Modell der Drehfeldmaschinen
- Prinzip der Feldorientierung
- Feldorientierte Regelung der Asynchronmaschine
- Reduzierte Modelle der Asynchronmaschine
- Regelverfahren ohne Drehzahlgeber
- Feldorientierte Regelung der Synchronmaschine

In der Übung, die teilweise mit Rechnerunterstützung angeboten wird, werden die Studierenden zunächst mit der Anwendung der Tools Matlab und Simulink vertraut gemacht. Die Übungsbeispiele werden anhand von Simulatio-nen bearbeitet, die von den Studierenden selbst am PC durchgeführt werden. Dabei werden die in der Vorlesung dargestellten Zusammenhänge durch eigene Erfahrung vertieft.

Notwendige Vorkenntnisse: Grundlagen der elektromagnetischen Energiewandlung (Elektrotechniker) oder Elektrische Antriebe (Mechatroniker)

Empfohlene Vorkenntnisse:
Leistungselektronik I und Elektrische Antriebssysteme

Control of Electrical Three-phase Machines

(6th or 8th term), V2, U1, L1
Lecture: Prof. Dr.-Ing. A. Mertens

Learning target
Students shall get to know the dynamic behaviour of controlled drives, understand the principles of field-oriented control for electrical three-phase drives as well as learn about the properties of the different methods. First of all, the complete control loop of a DC drive is investigated. The lecture focuses on drives with asynchronous machines. Drives with synchronous machines will also be considered.

Contents:

- Dynamic behaviour of uncontrolled DC machines
- Torque and speed control of DC machines
- Positioning control
- Dynamic model of three-phase machines
- Principle of field orientation
- Field-oriented control of asynchronous machines
- Reduced models of asynchronous machines
- Control methods without speed sensor
- Field-oriented control of synchronous machines

In the exercise, which is partly computer-assisted, the students are first of all introduced into the application of the tools Matlab and Simulink. Exercise examples are treated by simulations carried out on the computer by the students themselves, thus increasing their knowledge achieved in the lecture by own experiences.

Necessary previous knowledge: Basics of Electromagnetical Power Conversion (electrical engineers) or Electric Drives (mechatronic engineers)

Recommended previous knowledge: Power Electronics I and Electrical Drive Systems

Elektrische Bahnen und Fahrzeugantriebe

(6. bzw. 8. Semester), V2
Vorlesung: Dr.-Ing. G. Möller

Inhalt
In der Vorlesung werden sowohl die Grundlagen elektrischer Bahnen als auch Aspekte von elektrischen Fahrzeugantrieben behandelt.
Es wird eine Übersicht über den aktuellen Stand der Technik gegeben, wobei der Schwerpunkt auf der elektrischen Antriebsausrüstung liegt. Die Grundzüge der Auslegung von Bahnfahrzeugen von den Anforderungen bis zur kompletten Dimensionierung werden erläutert. Das Gebiet umfasst dabei Fahrzeuge von der Straßenbahn bis zum Hochgeschwindigkeitsbereich. Weiterhin wird die elektrische Infrastruktur im Bahnbereich erklärt. Im Bereich der Fahrzeugantriebe wird auf die technischen Lösungen bei Hybridantrieben wie z.B. serienhybrid oder parallelhybrid eingegangen.
Als Grundlage werden Vorwissen auf den Gebieten Leistungselektronik und elektrische Antriebstechnik vorausgesetzt.

Electrical Traction and Vehicle Drives

(6th or 8th term), V2
Lecture: Dr.-Ing. G. Möller

Contents
The lecture deals with the basics of electrical traction and aspects concerning electrical vehicle drives.
It is given a survey of the state-of-the-art focusing on electric traction equipment systems. Further on, the basics of electrical traction design are discussed from their requirements to their complete dimensioning. The scope to be dealt with reaches from tramways to high-speed trains. Further topics are the electrical infrastructure in the field of electrical traction and technical solutions for hybrid vehicle drives (e.g. serial hybrid or parallel hybrid).
Basic knowledge in the field of power electronics and electric drive technology is required.

Passive Komponenten der Leistungselektronik

(1./3. Semester im Masterstudiengang) V2, U1, L1
Vorlesung: Jun.-Prof. Dr.-Ing. J. Friebe

Lernziel
Die Studierenden bekommen Kenntnisse über passive Komponenten leistungselektronischer Wandlerstufen sowie der grundlegenden Berechnungsmethoden und Auslegungsstrategien. Nach erfolgreichem Abschluss können sie selbstständig passive Komponenten für verschiedene Applikationen vergleichen, auslegen und bewerten. Hierzu zählen induktive Komponenten wie Speicherdrosseln und Transformatoren, verschiedene Kondensatortypen, grundlegende Aufbau- und Verbindungstechnik, parasitäre Eigenschaften der Komponenten und der grundsätzlichen Filterauslegung für leistungselektronische Wandlerstufen.

Stoffplan:

- Berechnungsmethoden, Auslegungsstrategien, Beispiele magnetischer Komponenten
- Kondensatoren, Anwendungen, Typen, Vor- und Nachteile, typische Einsatzgebiete
- Grundsätzliche Filterauslegung für Frequenzen unterhalb 30MHz (leitungsgebunden)
- Aufbau- und Verbindungstechnik in der Leistungselektronik
- Thermisches Management leistungselektronischer Umrichter

Jeder Studierende wählt eine Applikation/Anwendung aus, die parallel zur Vorlesung in der Übung weiterentwickelt wird. Ferner werden in der Laborübung dazugehörige Komponenten ausgewählt und aufgebaut. Als Simulationssoftware wird LT-Spice verwendet.

Notwendige Vorkenntnisse:
Leistungselektronik I

Hinweis: Idealerweise wird die Veranstaltung parallel zu Leistungselektronik II gehört.

Passive Components in Power Electronics

(1st/3rd term in master course) V2, U1, L1

Lecture: Jun.-Prof. Dr.-Ing. J. Friebe

Learning Target
The students gain knowledge about passive components of power electronic converter stages and fundamental calculation methods and design strategies. After successful completion, they are able to compare, design and evaluate passive components for various applications on their own. This includes inductive components such as inductors and transformers, various types of capacitors, basic power electronics packaging, parasitic component properties, fundamental filter design for power electronic converter stages.

Contents:

- Calculation methods, design strategies, examples of magnetic components
- Capacitors, applications, types, pros and cons, typical fields of application
- Basic filter design for frequencies below 30MHz (conducted)
- Power electronics packaging
- Thermal management of power electronic converters

Every student chooses an application and develops its components during the exercise in parallel to the lecture. In the laboratory exercise, the corresponding components are selected and built up. The simulation software used is LT-Spice.

Necessary previous knowledge: Power Electronics I

It is recommended to attend the lecture in parallel with Power Electronics II.

Wasserkraftgeneratoren

(3. Semester im Masterstudiengang) V2, Ü1, L1
Vorlesung: Jun.-Prof. Dr.-Ing. A. Ebrahimi

Inhalt
Klassifizierung von Wasserkraftwerken, globale Kapazität, Trends und Kosten, Hydropower-Technologien, hydraulische Berechnung eines Kraftwerkes, Pumpspeicher-Kraftwerke, hydraulischer Kurzschluss, Aktions- und Reaktionsturbinen, Bestimmung von Geschwindigkeitsdreiecken und Momentberechnung.
Hydrogeneratoren, Aufbau des Rotors, Dämpferwicklungen, Luftkanäle, Ständerblechpaket, Druckplatte und Druckfinger, Wicklungstechnologien, Röbelstab.
Physikalisches Modell eines Wasserkraftgenerators, dq-Transformation, transientes und subtransientes Verhalten, Zeigerdiagram, Stromortskurve, Leerlauf- und Kurzschlusskennlinien.
Analytische Modellierung des Generators, Flussdichteverteilung im Luftspalt und Nutungseffekt, Carterscher Faktor, Einfluss der Kühlkanäle auf die aktive Länge, magnetische Spannung im Zahn und Ständerjoch, Streufluss im Luftspalt, Nutquerfluss, Zahnstreufluss, Pollückenstreufluss, Stirnraumfluss und Streuinduktivitäten im Stirnraum.
Zusatzverluste in Hydrogeneratoren, Wirbelstromverluste in der Druckplatte, Ummagnetisierungsverluste im Polschuh, Harmonische mit der Ordnungszahl 3, Wirbelströme in den Dämpferwicklungen, Wirbelströme in der Ständerwicklung, Stromverdrängungs- und Näherungseffekt, Auslegung des Röbelstabs.
Magnetische Geräusche und Schwingungen in Hydrogeneratoren, Radialkräfte im Luftspalt, Blechpaketschwingungen, Verformung des Ständerblechpakets, statische und dynamische Exzentrizität, Radial- und Tangentialkräfte in der Nut.
Auslegung von Hydrogeneratoren, Ausnutzungsfaktor, Gleichung des Spannungstensors, mechanische, elektrische, magnetische und thermische Ausnutzung des Generators.
Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten von Hydrogeneratoren, Verunreinigung der Ständerbohrung, Magnetsinn von Termiten etc.

Hydrogenerators

(3rd term in master course) V2, U1, L1
Lecture: Jun.-Prof. Dr.-Ing. A. Ebrahimi

Contents
Classification of hydropower plants by type, global capacity and trends of hydropower plants, hydropower technologies, pumped storage hydropower plants, hydroelectric power generation and hydraulic calculations, reaction and impulse turbines, velocity triangle and torque calculation.
Hydrogenerators, rotor structure, damper windings, air ducts, stator core, clamping plate, pressing fingers, windings, Roebel bars.
Physical model of a hydrogenerator, dq-transformation, transient and subtransient inductances, phasor diagram, current locus curve, no-load and short-circuit characteristics.
Analytical modelling of hydrogenerators, magnetic flux density distributed in the air gap and slotting, Carter's factor, equivalent core length, magnetic voltage of tooth and yoke, leakage fluxes not crossing the air gap, slot leakage inductances, tooth tip leakage inductances, leakage flux in the pole gap, end winding leakage inductances.
Additional losses in hydrogenerators, clamping plate losses, pole shoe surface losses, third-order harmonic losses, additional losses in the damper windings, eddy current losses in the stator winding, skin and proximity effect, double sided skin effect, design of the Roebel bar.
Magnetic noise and vibrations in hydrogenerators, radial air gap forces with centric rotor, stator core oscillations, deformation of the stator core, static and dynamic eccentricity, forces on the slot conductors.
Design of hydrogenerators, machine constant formulation, stress tensor equation, mechanical, electrical, magnetic and thermal loadability.
Inspection and maintenance of hydrogenerators, stator bore contamination, magnetic termites, etc.

Labor Leistungselektronik

Das Leistungselektroniklabor umfasst acht Versuche, die von Studenten in kleinen Gruppen durchgeführt werden. Diese acht Versuche decken einen GroSSteil der Themengebiete der Vorlesungen Leistungselektronik I und Leistungselektronik II ab. Sie dienen der Vertiefung des theoretisch gewonnenen Wissens und dem Erlernen des praktischen Umgangs mit Umrichtern und Messgeräten.
Bei der im Labor eingesetzten Hardware handelt es sich in der Regel um Industrieumrichter. Diese sind so erweitert worden, dass alle erforderlichen Messsignale leicht zugänglich sind. Mit diesen Signalen können verschiedene Eigenschaften der Umrichter überprüft werden. So werden in einigen Versuchen die Halbleiter und ihr Verhalten untersucht. Andere Versuche beschäftigen sich mit dem Betriebsverhalten von netzgeführten Umrichtern, wie zum Beispiel Wechselstromsteller oder Drehstrombrückenschaltungen. Selbstgeführte Umrichter und deren Steuerverfahren werden in drei Versuchen behandelt.
Digitale Simulationssysteme werden in der Elektrotechnik zur Untersuchung von Schaltungen und Bauelementen verwendet. In einem Versuch werden die Studenten am Beispiel einer sechspulsigen Thyristorbrücke schrittweise an die Möglichkeiten der Simulation zur Darstellung elektrischer Vorgänge herangeführt.

Laboratory Exercise on "Power Electronics"

The power electronics lab consists of 8 experiments which are carried out by the students in small groups. These experiments largely cover the contents of the two lectures Power Electronics I and II. They serve for deepening the theoretical knowledge and learning how to handle converters and measuring tools in practice.
In general, industrial converters are used in these experiments. They are modified in the way that all necessary measuring signals are easily accessible. These signals are used to check various converter properties. Some experiments deal with semiconductors and their behaviour. Other experiments deal with the performance of line-commutated converters, as for ex. AC power controllers or three-phase bridge configurations. Self-commutated converters and their control methods are subject of three further experiments.
Digital simulation systems are used in electrical engineering for examining circuits and components. In one experiment, the students learn step by step about the possibilities of simulation in order to describe electrical processes using a 6-pulse thyristor bridge as an example.

Labor „Elektrische Maschinen“

- Gleichstrommotoren
- Universalmotor
- Vollpol-Synchronmotor (Betriebskennlinien)
- Schenkelpol-Synchronmaschine (Reaktanzen und StoSSkurzschluss)
- Drehstrom-Induktionsmotor (Betriebskennlinien)
- Selbsterregter Drehstrom - Asynchrongenerator
- Induktionsmotor mit Ständer- und Läuferunsymmetrie
- Wechselstrom-Induktionsmotor

Im Labor Elektrische Maschinen und Elektrische Antriebstechnik soll das Betriebsverhalten verschiedener am Netz betriebener elektrischer Maschinen praktisch untersucht und mit der Theorie verglichen werden. Zur Messung elektrischer (z.B. Strom, Spannung und Leistung) und mechanischer GröSSen (z.B. Drehmoment und Drehzahl) sollen verschiedene Messmethoden eingesetzt und auch der Umgang mit unterschiedlichen Messgeräten geschult werden. Neben dem stationären Betriebsverhalten im fehlerfreien Betrieb wird auch das Verhalten bei Fehlern und Unsymmetrien in der Netzversorgung untersucht.

Laboratory Exercise on „Electrical Machines“

- DC motors
- Universal motor
- Synchronous motor with cylindrical rotor (operating characteristics)
- Salient-pole synchronous machine (reactances and sudden short circuit)
- Three-phase induction motor (operating characteristics)
- Self-excited three-phase induction generator
- Induction motor with stator and rotor unbalance
- Single-phase induction motor

Goal of the lab on „Electrical Machines “ and „Electric Drives “ is to examine by means of experiments the performance of different mains-operated electrical machines and compare them to theory. Various measuring methods are presented in order to determine electrical (e.g. current, voltage and power) and mechanical characteristics (e.g. torque and speed); the handling of different measuring instruments is practised, too. Besides the steady-state performance during smooth running, it is also tested how motors behave in case of malfunctions or unbalances in the power supply.

Labor „Elektrische Antriebssysteme “

- Gleichstrom - Reihenschlussmotor am Gleichstrom - Pulswandler (Chopper)
- Elektronisch kommutierte Motoren
- Permanentmagneterreger Servoantrieb
- Drehstrom-Induktionsmotor mit Käfigläufer am Pulsumrichter
- Steuer- und Regelverfahren von Pulsumrichter mit Käfigläufer-Induktionsmotor
- Drehzahlvariabler Drehstrom - Asynchrongenerator mit Schleifringläufer
- Untersynchrone Stromrichterkaskade
- Schrittmotor

Die Versuche des Labors Elektrische Antriebssysteme befassen sich mit dem Verhalten von stromrichtergespeisten bzw. elektronisch betriebenen elektrischen Maschinen. Es wird das gesamte Antriebssystem bestehend aus Motor und Stromrichter untersucht. Die Versuche sollen zeigen, wie das Betriebsverhalten von klassischen elektrischen Maschinen durch moderne leistungselektronische Komponenten beeinflusst werden kann. Des Weiteren werden moderne elektronisch betriebene Motoren und deren Steuerung bzw. Regelung untersucht.
Wie beim Labor Elektrische Maschinen werden auch hier unterschiedliche Messmethoden und -geräte zur Bestimmung der elektrischen und mechanischen Eigenschaften des Antriebssystems eingesetzt.

Laboratory Exercise on „Electrical Drive Systems “

- Series wound DC motor fed by DC pulse-controlled converter (chopper)
- Electronically commutated motors
- Permanent magnet synchronous servo motor
- Three-phase cage induction motor fed by pulse-controlled converter
- Control methods of pulse-controlled converters for cage induction motor
- Variable speed three-phase induction generator with wound rotor
- Synchronous motor fed by current-source inverter (LCI)
- Stepping motor

The experiments in the lab on "Electrical Drive Systems" deal with the behaviour of converter-fed and electronically controlled electrical machines. The whole drive system, i.e. the motor and the converter, is examined. The experiments shall prove how the performance of conventional electrical machines can be influenced by modern power electronic components. In addition, modern B.L.D.C. motors and their control system are investigated.
As in the lab Electrical Machines, different measuring methods and instruments are used to determine electrical and mechanical characteristics of the drive systems.

Studentische Arbeiten 2016/17/18
Studentst' Theses 2016/17/18

Studienarbeiten
Short Theses

2017

Brockhage, Torben:
Optimierung einer Messplatine zur Zustandsüberwachung von IGBT-Modulen hinsichtlich Kosten und Temperaturstabilität
Cost and Temperature Stability Optimization of a Measurement Board for Condition Monitoring of an IGBT-Module

2018

Ding, Junyu:
Erweiterung eines Verlustmodells zur Berechnung von Ummagnetisierungsverlusten im Zeitbereich für elektrisch erregte Synchronmaschinen
Extension of a Time Core Loss Model for Analysis of Hysteresis and Eddy Current Losses in Electrically Excited Synchronous Machines

Bachelorarbeiten
Bachelor Theses

2016

Alper, Aykul:
Identifikation von Verlustmechanismen im Verbundschwinger
Identification of Loss Mechanisms in Piezoelectric Transducers

Azimi, Mazidollah:
Thermische Simulation und Dimensionierung des Kühlsystems eines Antriebssystems mit motorintegriertem Umrichter
Thermal Simulation and Dimensioning of a Cooling System for Use in a Drive System with Motor integrated Converter

Bieber, Maximilian:
Automatisierung eines thermischen Messsystems für Kühlkörperuntersuchungen
Automation of a Thermal Test Setup for Investigations of Heat Sinks

Brand, Jennifer:
Analytischer Ansatz zur Berechnung der stationären Stromverteilung für fehlerhafte Betriebszustände von elektrisch erregten Synchronmaschinen
Analytical Approach for the Calculation of the Steady-State Current Distribution of Electrically Excited Synchronous Machines in Case of Faulty Operation Condition

Buff, Nico:
Entwurf und Fertigung einer Konstantstromsenke zur Bestimmung der Ersatzschaltbildparameter von Akkumulatoren
Design and Assembly of a Constant Current Sink for Determination of Equivalent Circuit Parameter in Accumulators

Cavus, Fatih:
Analytische Berechnung der subtransienten Reaktanzen für eine Vollpolsynchronmaschine mit ungleichmäßig verteilten Dämpfernuten
Analytical Calculation of Subtransient Reactances for the Round-Rotor Synchronous Machine with Non-equidistantly Distributed Damper Slots

Dierks, Rebecca:
Einfluss eines nicht-idealen Netzes auf die Regelung eines Dreiphasen-Spannungszwischenkreis-Umrichters
Influences of a Non-Ideal Grid on the Control of a Three-Phase Voltage-Source Converter

Fauth, Leon Maximilian:
Implementierung und Evaluierung eines dreiphasigen Wechselrichters als Netzemulator
Implementation and Evaluation of a Three-phase AC Converter as Grid Emulator

Frankl, Sebastian:
Untersuchung und Auslegung eines bauraumoptimierten du/dt-Filters für einen motorintegrierten SiC-Wechselrichter
Investigation and Design of a Space-Optimized du/dt Filter for a Motor-Integrated SiC Inverter

Goecke, Lukas:
Untersuchung lebensdauerverlängernder Maßnahmen für Rotorumrichter doppelt gespeister Asynchronmaschinen in Windenergieanlagen
Investigation of Lifetime Prolonging Measures for Rotor-Side Converters of Doubly-Fed Induction Generators in Wind Turbines

Hannover, Philipp:
Implementierung und Evaluation einer Maschinenregelung für permanenterregte Synchronmaschinen mit PXI-Systemen von National Instruments
Implementation and Evaluation of a Control for Permanent Magnet Machines with PXI-Systems by National Instruments

Heide, Daniel:
Messung des Stirnraumfelds eines Schenkelpolmotors mit Hallsensoren
End-Region Field Measurement of Salient Pole Synchronous Machines Using Hall-Sensors

Hollmann, Jan:
Implementierung einer feldorientierten Regelung für eine 6-strängige permanentmagneterregte Synchronmaschine
Implementation of a Field-Oriented Control of a Six Phase Permanent Magnet Synchronous Machine

Hullmann, Max:
Berechnung axialer Rückstellkräfte in permanentmagneterregten Ringgeneratoren
Calculation of Axial Displacement Forces in Permanent Magnet Ring Generators

Jamschidi-Rudbari, Sam:
Analyische Berechnung des THD-Faktors für eine Vollpolsynchronmaschine mit ungleichmäßig verteilten Dämpfernuten
Analytical Calculation of the THD-factor for the Round-rotor Synchronous Machine with Non-equidistantly Distributed Damper Slots

Kaiser, René:
Optimierung des Kühldesigns von luftgekühlten Ladegeräten für Elektrofahrzeuge
Optimization of Cooling Systems for Battery Chargers in Electric Vehicles

Kalla, Matthias:
Vergleich und Validierung von Netzsynchronisationsverfahren für umrichtergespeiste Erzeugungsanlagen im Hinblick auf die Netzanschlussbedingungen
Comparison and Validation of Grid-Synchronisation Methods for Inverter-Fed Generation Units with Regard to the Grid Connection Requirements

Kämper, Anne:
Design und Optimierung eines Kühlkörpers für eine erzwungene Luftkühlung zur Steigerung des Auftriebs künftiger Verkehrsflugzeuge
Design and Optimization of a Forced Air Cooled Heat Sink for an Active High-Lift System in Future Commercial Aircraft

Kerkmann, Eike:
Erweiterung eines Systemsimulationsmodells für geberlose Regelungsverfahren
Extension of a System Simulation Model for Self-Sensing Control Methods

Kirchner, Torsten:
Messung der Einzelverluste und des thermischen Verhaltens einer mehrsträngigen permanentmagneterregten Synchronmaschine
Measurement of Separate Losses and Thermal Behaviour of a Multiphase Permanent Magnet Synchronous Machine

Kriebel, Benjamin:
Design, Aufbau und Inbetriebnahme eines dreiphasigen Gleichspannungswandler mit Siliziumkarbid - Leistungshalbleitern
Design, Construction and Operation of a Three-Phase DC-DC Converter with Silicon Carbide Semiconductors

Krzikalla, Stefan:
Aufbau und messtechnische Untersuchung eines Übertragerprototyps mit Ferritkern
Construction and Technical Study of a Rotary Transformer Prototype with Ferrite Core

Lengsfeld, Sebastian:
Modellierung der mechanischen Komponenten und der elektromechanischen Systemkopplung eines elektronisch betriebenen Kompressors
Modelling of the Mechanical Components and the Electromechanical Coupling of an Electrically Driven Compressor

Pioch, Vivien:
Untersuchung der Auswirkungen von Zahnspulenwicklungsvarianten auf das Betriebsverhalten permanenterregter Synchronmaschinen
Investigation of the effects of different types of tooth-wound coils on the performance of permanent magnet synchronous machines

Riesner, Jan:
Magnetische Simulation und Dimensionierung einer permanenterregten Synchronmaschine für ein Antriebssystem mit motorintegriertem Umrichter
Magnetic Simulation and Dimensioning of a Permanent Magnet Synchronous Machine for Use in a Drive System with Motor-integrated Converter

Suchan, Anton:
Entwicklung einer Toolkette zur automatisierten Berechnung der Entmagnetisierungsfestigkeit von permanentmagneterregten Synchronmaschinen
Development of a Tool Chain for the Automated Calculation of the Demagnetization Strength of Permanent Magnet Synchronous Machines

Zajonc, Maximilian:
Entwicklung eines thermischen Simulationsmodells zur Untersuchung axial unsymmetrischer Temperaturverteilungen in elektrischen Maschinen
Development of a Thermal Simulation Model to Investigate Axially Asymmetric Temperature Distributions in Electrical Machines

2017

Chabi, Ahmed:
Inbetriebnahme einer Messplatine und Auswertung von Messdaten zur Zustandsüberwachung eines IGBT-Moduls
Implementing a Measurement Board and Evaluation of Measurement Data for Condition Monitoring of an IGBT Module

Dreyer, Malte:
Bestimmung der Stromverteilung von Vollpolsynchronmaschinen mit fehlenden Spulen in der Ständerwicklung
Determination of the Current Distribution of Synchronous Machines with Cylindrical Rotor in Case of Missing Coils in the Stator Winding

Ebersberger, Janine:
Analytische und numerische Berechnung von Stab- und Teilleiterinduktivitäten in Wasserkraftgeneratoren
Analytical and Numerical Calculation of Bar and Sub-Conductor Inductances in Hydro-Generators

Frey, Pauline:
Erweiterung eines analytischen Wärmequellennetzwerks für elektrisch erregte Synchronmaschinen und Vergleich des Wärmeflusses mit numerischen Berechnungen
Enhancement of an Analytical Thermal Network for an Electrically Excited Synchronous Machine and Comparison with Numerical Computations

Hartung, Herbert:
Elektromagnetische Dimensionierung und Simulation eines permanenterregten Linearmotors für kurze Fahrwege
Electromagnetic Dimensioning and Simulation of a Permanent Magnet Linear Motor for Short Driving Distance

Heil, Manuel David:
Auslegung, Modellierung, Aufbau und Inbetriebnahme eines Vollbrücken-Gleichspannungswandlers mit neuartigen SiC-Halbleitern
Design, Modeling, Construction and Operation of a Full Bridge DC-DC Converter with Silicon Carbide Semiconductors

Jünemann, Lennart:
Ansteuerung eines permanentmagneterregten Linearmotors ohne Positionsrückführung
Control of a Linear Permanent Magnet Motor Without Position Feedback

Kostka, Benedikt:
Simulation und Validierung der Betriebsmodi eines dreiphasigen Gleichspannungswandlers für Offshore Anwendungen
Simulation and Validation of Operating Modes of a Three-Phase Single Active Bridge DC/DC Converter for Offshore Applications

Nguyen, Dang Duc:
Berechnung der zusätzlichen Verluste durch Umrichterspeisung in Induktionsmaschinen
Calculation of the Additional Losses due to Converter Operation in Induction Machines

Papakonstantinou, Stephanos:
Validierung und Weiterentwicklung eines Geräuschberechnungsprogramms für rotierende elektrische Maschinen
Validation and Further Development of a Noise Calculation Program for Rotating Electric Machines

Ramirez Lerch, Pascal:
Aufbau und Test eines Halbbrückenumrichters
Design and Tests of a Half-Bridge Converter

Rochlitz, Adrian:
Untersuchung zur Regelung von permanentmagneterregten Synchronmaschinen mit FPGA-basierter Stromerfassung
Studies on Control of Permanent Magnet Synchronous Machines using an FPGA-based Current Sensing

Schaumburg, Joscha:
Beschreibung der nichtlinearen Eigenschaften von Frequenzumrichtern
Modeling of the Nonlinear Behaviour of Voltage Source Converters

Schepe, Constantin:
Regelung eines Pulswechselrichters zur Emulation von Netzkomponenten in einem Labornetz
Control of a Voltage Source Inverter for Emulation of Grid Components in a Laboratory Grid

Schütte, Nico:
Filterdesign eines einphasigen GaN-PFC-Gleichrichters in Totem-Pole-Topologie
Filter Design for a Single-Phase, GaN-based PFC Rectifier in Totem-Pole Configuration

Stahl, Laureen:
Auswirkungen verschiedener nicht-idealer Maschineneigenschaften auf den Umrichterbetrieb eines doppelt gespeisten Asynchrongenerators
Impact of Various Non-ideal Characteristics of a Doubly-Fed Induction Generator on its Converter Operation

Strilka, Johannes:
Strukturmechanische Untersuchung elektrisch erregter Synchronmaschinen für den Einsatz als Traktionsantrieb in Elektrofahrzeugen
Structural Analysis of an Electrically Excited Synchronous Machine for Use as Traction Drive in Electric Vehicles

Wenzel, Johannes:
Vergleich von zeitdiskretem Schaltermodell und zeitkontinuierlichem Mittelwertmodell eines dreiphasigen Netzumrichters für Windenergieanlagen
Comparison of a Time-Discrete Switching Model and a Time-Continuous Average Model of a Three Phase Grid Converter for Wind Power Plants

2018

Asatrian, Taron:
Automatisierte Erstellung von strukturmechanischen Finite-Elemente-Modellen von elektrischen Maschinen für die Modalanalyse
Automated Generation of Structural Mechanical Finite Element Models of Electrical Machines for a Modal Analysis

Azimov, Togrul:
Entwurf eines studentischen Laborversuchs zu Wechselstromstellern
Design of Student Laboratory Experiment for A.C. Voltage Controller

Behrendt, Cara-Nastasja:
Modellierung des Einflusses von Wicklungsvarianten auf das Hochfrequenzverhalten von elektrischen Maschinen
Investigation of Coil Winding Technology Influences on the High Frequency Behaviour of Electric Machines

Bozionek Jan Niklas:
Untersuchung verschiedener Magnettopologien für den Einsatz in permanentmagneterregten Synchronmaschinen mit hoher Drehmomentdichte
Analysis of Different Topologies of Permanent Magnets for Permanent Magnet Synchronous Machines with High Torque Density

Eisold, Mirko:
Verfahren zur Berechnung von Wirbelstromverlusten im Rotor von permanentmagneterregten Synchronmaschinen mit Umrichterspeisung
Calculation Method for Rotor Eddy Current Losses of Inverter-Fed Permanent Magnet Synchronous Machines

Eschenmann, Leander:
Untersuchung von Wicklungskonzepten für universell einsetzbare Motorspindeln
Analysis of Winding Concepts for Universal Motor Spindles

Fendel, Kristina:
Entwicklung und Analyse von oszillierenden Lamellen zur Konvektionsunterstützung
Development and Analysis of Oscillating Blades for Improved Convection

Gleich, Anton:
Dreiphasiger PFC-Gleichrichter im stationären Ladegerät für Elektrofahrzeuge
Three-Phase PFC Rectifier in Stationary Battery Chargers for Electric Vehicles

Hagedorn, Maximilian:
Entwicklung und Implementierung einer FPGA-basierten Leistungsmessung für einen dreiphasigen Pulswechselrichter durch Überabtastung der Messwerte
Development and Implementation of an FPGA-based Power Measurement for a Three-Phase Pulse Inverter by Oversampling the Measured Values

Henkenjohann, Jonas:
Oberschwingungsverhalten von nichtlinearen Lasten in Niederspannungs-Microgrids
Harmonic Distortion of Nonlinear Loads in Low-Voltage Microgrids

Kifel, Dennis:
Kriterien zur akustischen Bewertung elektrischer Traktionsantriebe
Criteria for the Acoustic Rating of Electrical Traction Drives

Kriaa, Skander:
Parameterstudie zum Einfluss von 3D Effekten auf das ausquellende Luftspaltfeld von Hydrogeneratoren
Analysis of 3D Effects on the Magnetic Air Gap Flux Leakage in Hydro Generators

Langfermann, Markus:
Untersuchung der mechanischen und elektromagnetischen Eigenschaften unterschiedlicher Kurzschlusskäfigkonfigurationen für den Einsatz in einer Hochdrehzahl - Induktionsmaschine
Study of the Mechanical and Electromagnetic Behaviour of Different Squirrel Cage Configurations for an High-speed induction Machine

Mhiri, Marwen:
Entwicklung einer universellen Umrichter-Steuerungsplattform
Development of a Versatile Converter Control Platform

Niu, Jinlu:
Numerische Untersuchung des Einflusses von Materialeigenschaften und Geometrie der Druckplatte auf Verluste und Feldverhältnisse im Stirnraum von Hydrogeneratoren
Numerical Analysis of the Clamping Plate Geometry and Material Properties on the Losses and Magnetic Field in the End Region of Hydro Generators

Pusicha, Daniel:
Berechnung der Luftspaltleitwerte für ein magnetisches Ersatznetzwerk zur Parameterfindung von Schenkelpolsynchronmaschinen
Calculation of the Magnetic Permeance in the Air Gap to Create a Magnetic Equivalent Circuit for Parameter Identification of Salient Pole Synchronous Machines

Ridder, Andreas:
Auswirkungen der Grenzdrehmomentanforderung auf den Fahrzykluswirkungsgrad von elektrisch erregten Synchronmaschinen für den Einsatz als Traktionsantrieb im Elektrofahrzeug
Impact of the Peak Torque Requirement on the Driving Cycle Efficiency at Electrically Excited Synchronous Machines for Automotive Traction Application in an Electric Vehicle

Schubert, Marius Paul:
Dimensionierung und Aufbau eines Antriebsstrangs für einen semiautonomen Lastenroboter mit omnidirektionalem Antrieb
Design and Assembly of a Drive Train for a semi-autonomous Storage Robot with an Omni-directional Drive

Stiller, Franziska:
Entwicklung eines Servolenksystems für autonom fahrende Rennfahrzeuge
Development of a Power Steering System for Autonomous Racecar Vehicles

Wienken, Jürgen:
Untersuchung von elektrisch erregten Synchronmaschinen mit mehr als drei Strängen für die Anwendung als Traktionsantrieb in Elektrofahrzeugen
Investigation of Electrically Excited Synchronous Machines with more than Three Phases for Use as Traction Drive in Electric Vehicles

Diplomarbeiten
Diploma Theses

2016

David, Bela:
Vorausberechnung von Wirbelstromverlusten in segmentierten Permanentmagneten
Prediction of Eddy-current Losses in Segmented Permanent Magnets

Neumann, Birger:
Untersuchung von Inselnetzen in Kombination mit einem HVDC Diodengleichrichter zur Anbindung von Offshorewindparks
Investigation of Island Networks in Combination with a HV DC Diode Rectifier for Connection of Offshore Wind Parks

2017

Aqabat, Rafeq:
Dimensionierung und Untersuchung eines Kurzschlussrings für einen wicklungskopflosen Turbogenerator
Design and Investigation of a Short-Circuit Ring for a Turbo Generator without Winding Overhang

Hamburg, Christian:
Entwicklung eines Verfahrens zur Ermittlung der frequenzabhängigen Impedanz elektrischer Maschinen für die Elektromobilität
Development of a Method to Determine the Frequency-dependent Impedance of Electrical Machines for Electromobility

Masterarbeiten
Master Theses

2016

Andresen, Jan:
Untersuchung von steuerungs- und regelungstechnischen Maßnahmen zur aktiven Reduktion von Stördrehmomenten in elektrischen Maschinen
Investigation of Control Methods for Active Reduction of Torque Disturbances in Electrical Machines

Bothen, Nils:
Optimierung eines berührungslosen Übertragers mit Elektroblechkern
Optimization of a Rotary Transformer with Electrical Steel Core

Büger, Christoph:
"Follow-the-Leader"-Steuerung für einen binären, schlangenartigen Roboter mit einer kontinuierlich aktuierten Endeffektorplattform
"Follow-the-Leader" Control Algorithm for a Binary Snake-like Robot with a Continuously Actuated End-Effector Platform

Dokus, Marc:
Development and Characterization of a Low-Cost Power Hardware-in-the-Loop Test Bench for Grid Studies

Herwig, Daniel:
Untersuchung und Realisierung von Messchaltungen zur Bestimmung der Sperrschichttemperatur im IGBT mit thermosensitiven Parametern
Examination and Realisation of Measurement Circuits to Determine the Junction Temperature of IGBTs with Thermosensitive Parameters

Honkomp, Tobias:
Untersuchung von fehlertoleranten Zwischenkreisverschaltungen für mehrphasige Antriebswechselrichter
Investigation of Fault-Tolerant DC Link Interconnections for Multi-Phase Traction Inverters

Knöchelmann, Elias:
Reduktion des Energieverbrauchs elektrisch gekoppelter Anlagen mit Zwischenkreiskapazitäten durch optimierte Bewegungs- und Ablaufplanung
Reduction of Energy Consumption of Electrically Coupled Systems with DC Link Capacity by Motion and Process Optimization

Königsberg, Jan:
Vergleich zweier FEM-Programme am Beispiel der Berechnung von Id-Iq-Kennfeldern permanenterregter Synchronmaschinen
Comparison of Two FEM Programs for the Calculation of Id-Iq-characteristics of Permanent Magnet Synchronous Machines

Kühnel, Kornelius:
Aufbau und Inbetriebnahme eines Versuchsstands zur elektrischen und thermischen Charakterisierung von Leistungsinduktivitäten
Design and Implementation of a Test Bench for Electrical and Thermal Characterization of Power Inductors

Lewetzki, Phillip:
Aufbau eines HIL-Systems der Aerodynamik und des Triebstrangs einer Windenergieanlage zur Untersuchung des angeschlossenen Generatorsystems
Design of a HIL System Including the Aerodynamics and the Drivetrain of a Wind Turbine for the Laboratory Examination of the Attached Generator System

Lindemann, Georg:
Untersuchungen zur Regelung von permanentmagneterregten Synchronmaschinen mit FPGA gestützter Überabtastung der Stromerfassung
Studies on Control of Permanent Magnet Synchronous Machines using an FPGA-based Current Oversampling

Matthies, David:
Modellierung eines Vollumrichters für Windenergieanlagen im Frequenzbereich
Frequency Domain Modeling of a Back-to-Back Converter for Wind Turbines

Meier, Christoph:
Dimensionierung von berührungslosen Übertragern mit einem Magnetkern aus weichmagnetischem Pulververbundwerkstoff
Designing of Rotary Transformers with Soft Magnetic Composite Core

Neufeld, Alexander:
Aufbau und Inbetriebnahme eines Prüfstands zur Validierung von Regelstrategien einer doppelt gespeisten Asynchronmaschine als Generator einer Windenergieanlage
Design and Setup of a Test Bench for Validation of Control Strategies of a Doubly-Fed Induction Machine as Generator of a Wind Turbine

Nguyen, ManhCuong:
Regelstrategien für einen elektronisch betriebenen Kompressor
Control Strategies for an Electrically Operated Compressor

Papenhoff, Sebastian:
Bewertung und Optimierung von Roboterzellen in Abhängigkeit von ökonomischen und prozessrelevanten Gütekriterien
Evaluation and Optimization of Robot Cells with Respect to Economic and Process Relevant Criteria

Redlich, Jürgen:
Synchronmaschinen für Traktionsantriebe mit sehr hoher Drehmomentdichte
Synchronous Machines for Traction Drives with Very High Torque Density

Reiter, Stephan:
Regelung des Kaskadierten H-Brücken Umrichters
Control of the Cascaded H-Bridge Converter

Romanowski, Daniel:
Validierung eines thermischen Modells einer mehrsträngigen permanentmagneterregten Synchronmaschine mittels Messung der Einzelverluste
Validation of a Thermal Model of a Multiphase Permanent Magnet Synchronous Machine Using Measurement of Separate Losses

Sheng, Dawei:
Modellierung einer Induktionsmaschine mit Berücksichtigung von Anisotropien
Modeling of an Induction Machine in Consideration of Anisotropies

Spyridonidis, Ioannis:
Erweiterung des Gleichungssystems einer im Ständer unsymmetrischen Schenkelpolsynchronmaschine um die Dämpferwicklung
Enhancement of the System of Equations of a Salient Pole Synchronous Machine with Unsymmetrical Stator Winding by the Damper Winding

Vu, Minh Tam:
Auslegung und Aufbau einer Messschaltung mit anschließender Charakterisierung eines neuartigen JFETs aus Siliziumcarbid
Design and Evaluation of a Measure Unit with Characterization of Novel Semiconductors from Silicon Carbide

Wieditz, Lukas:
Untersuchung anisotropiebasierter Verfahren zur Drehzahlschätzung für Induktionsmaschinen
Analysis of Anisotropy-based Methods for Speed Estimation of Induction Machines

Yu, Dairong:
Komplexitätsreduktion des "Follow-the-Leader"-Algorithmus für einen schlangenartigen Roboter
Complexity Reduction of the "Follow-the-Leader" Control Technique for a Snake-like Robot

Zhang, Boqie:
Implementierung und Evaluation eines dreiphasigen Frequenzumrichters als Maschinenemulator
Implementation and Evaluation of Machine Emulator on Three-Phase Power Converter Platform

Zhou, Kexing:
Statistische und modellbasierte Verfahren für das Condition Monitoring von Servoantrieben
Statistics- and Model-Based Methods for Condition Monitoring of Servo Drives

2017

Berger, Alexej:
Cloud-basierte Schadenvorhersage elektrisch angetriebener Mechaniken durch Verfahren des maschinellen Lernens
Cloud-based Fault Recognition in Servo Drive Mechanics using Machine Learning Methods

Fricke, Jan:
Untersuchung von Gallium-Nitrid-Leistungshalbleitern zum Einsatz in Ladegeräten für Elektrofahrzeuge
Analysis of Gallium-Nitride Power Semiconductors for Battery Chargers in Electric Vehicles

Gong, Yixin:
Untersuchung der Identifikation von Systemparametern für ein Verfahren zur drehzahlgeberlosen Regelung einer Induktionsmaschine
Analysis of the Identification of System Parameters for a Sensor-less Control Method of an Induction Machine

Hoffmann, Alexander:
Drehgeberlose Regelung einer permanenterregten Synchronmaschine für Untertage-Anwendungen
Self-Sensing Control of Permanent Magnet Synchronous Machines for Downhole Applications

Hovestadt, Lars:
Erweiterung eines Batteriemodells und Implementierung in ein Batterie-Management-System
Extension of a Battery Model and Implementation in a Battery-Management System

Kong, Junyu:
Nichtlineares Frequenzbereichsmodell eines gesteuerten Pulswechselrichters mit motorischer Last
Nonlinear Frequency Domain Model of an Open-Loop Controlled PWM-Converter Drive System

Luo, Jiejie:
Entwurf und Umsetzung einer variablen Ablaufsteuerung für einen ereignisdiskreten Handhabungsprozess
Design and Implementation of a Variable Sequence Control for an Automated Material Handling Process

Örnek, Bayram:
Implementierung einer geberlosen Regelung einer Hochdrehzahl-PMSM auf einem FPGA für einen SiC-Wechselrichter
Implementation of High-Speed PMSM Sensorless Control on an FPGA for Use in a SiC Inverter

Ridder, Jörn:
Überwachung ereignisdiskreter Handhabungsprozesse mittels automatisch detektierter Zustandsautomaten
Condition Monitoring of Event-Discrete Handling Processes via Automatic State Machine Detection

Riechmann, Lars:
Untersuchung der transienten Vorgänge bei elektrisch erregten und bei permanentmagneterregten Synchronmaschinen unter Berücksichtigung der parasitären Effekte
Investigation of the Transient Processes in Electrically and Permanent Magnet Excited Synchronous Machines Considering the Parasitic Effects

Rother, Dennis:
Ansteuerung eines einphasigen Batterieladegerätes für den Einsatz im Elektrofahrzeug
Implementation of Single-Phase Battery Charger Control for Electric Vehicle Application

Stahl, Patrick:
Evaluation der Pfadfolgegenauigkeit eines hyperredundanten, elektromagnetisch aktuierten Roboters
Evaluation of the Path Following Accuracy of a Hyper-Redundant, Electromagnetically Actuated Robot

Yu, Ran:
Component Design and Implementation of a SiC Inverter for an Active High-Lift System in Future Commercial Aircraft

Yu, Yichi:
Untersuchung eines Rotordesigns mit zusätzlicher, kurzgeschlossener Wicklung für die positionsgeberlose Regelung von Induktionsmaschinen
Analysis of a Rotor Design with Additional, Short-Circuited Coil for "Self-Sensing" Control of Induction Machines

2018

Abdelaal, Mostafa Ahmed:
Investigation of the Transient Processes in the Asynchronous Machine with the Squirrel Cage Rotor and the Doubly-Fed Asynchronous Machine Considering the Parasitic Effects

Abulibdeh, Hazim:
Geberlose Regelung von PMSM mit FPGA-basierter Stromerfassung und hochdynamischer Totzeitkompensation
Sensorless Control of PM Synchronous Machines using FPGA-based Current Sensing and High Dynamic Dead-Time Compensation

Brinker, Tobias:
Dimensionierung und Aufbau eines SiC-Wechselrichters als Demonstrator zur Vermessung der Wirkung und Effizienz von Ausgangsfiltern für Traktionsantriebe
SiC Inverter Design as a Demonstrator for Output Filter Efficiency Measurement in Traction Drive Applications

De La Torre Cubillo, Juan:
Development of Intelligent Modelling Methods of the Electrical Machine Transients Considering Saturation and Higher Spatial Harmonic Effects with Respect to their Numerical Performance

Dierks, Rebecca:
Untersuchung des "Low-Frequency Mode" für modulare Multilevel-Umrichter
Investigation of "Low-Frequency Mode" for Modular Multilevel Converters

England, Marc:
Dimensionierungstool zur automatischen Erstellung von tabellarischen Belegungsplänen für elektrische Maschinen
Tool for the Dimensioning of Automatically Created Tabular Terminal Diagrams for Electrical Machines

Fauth, Leon:
Untersuchung und Erweiterung eines Zustandsüberwachungskonzepts für IGBT-Module unter Verwendung der Einschaltzeit
Examination and Modification of a Condition Monitoring Concept for IGBT Modules by Evaluating the Turn-On Time

Goecke, Lukas:
Analyse des statischen und des dynamischen Betriebsverhaltens eines linearen Hybridschrittmotors für Gurtförderer
Analysis of the Static and Dynamic Performance of a Linear Hybrid Stepper Motor for Belt Conveyors

Harfoush, Yasser:
Core Optimization for High Frequency Ferrite Inductors and Transformers

Heide, Daniel:
Untersuchung zur Eignung von Vollpol-Synchronmaschinen für den Einsatz in Traktionsantrieben
Investigation of Cylindrical Synchronous Motors for Use in Traction Drives

Henschel, Rasmus:
Modellierung und Identifikation der Antriebssysteme eines Industrieroboters
Modeling and Identification of Industrial Robot Drive Systems

Hijazi, Mohamad:
Auswirkungen der Wicklungsausführung auf das Betriebsverhalten von sechssträngigen elektrisch erregten Synchronmaschinen für den Einsatz als Traktionsantrieb in Elektrofahrzeugen
Effects of the Winding Design on the Operating Behaviour of a Six-Phase Salient-Pole Synchronous Machine for Use as a Traction Drive for Automotive Applications

Himker, Niklas:
Entwicklung und Untersuchung einer Leistungsmessung für eine PMSM basierend auf einer im FPGA implementierten Regelung mit Überabtastung der Ströme
Development and Analysis of a Power Measurement for a PMSM based on an FPGA-implemented Control Loop with Oversampling of the Currents

Hollmann, Jan:
Akustische Vorausberechnung einer elektrisch erregten Synchronmaschine für neuartige Elektrofahrzeuge
Acoustic Calculation of an Electrical Synchronous Machine for New Electrical Vehicles

Huang, Yang:
Vorausberechnung und Unterdrückung von Wirbelstromeffekten auf der Rotoroberfläche von permanentmagneterregten Synchronmaschinen
Eddy Current Effect Calculation and Suppression on Rotor Surfaces of Permanent Magnet Synchronous Machines

Hullmann, Max:
Unterdrückung von Wirbelstromeffekten auf der Rotoroberfläche von permanentmagneterregten Synchronmaschinen mithilfe additiver Fertigungsverfahren
Suppression of Eddy Current Effects on the Rotor Surface of Permanent Magnet Synchronous Machines by Means of Additive Manufacturing Technologies

Kaiser, René:
Vor- und Nachteile von Achs- und Direktantrieben bei der Verwendung von Schenkelpolsynchronmaschinen als Traktionsantriebe für Elektrofahrzeuge
Advantages and Disadvantages of Axle Drives and Direct Drives Regarding the Use of Electrically Excited Synchronous Machines for Traction Drives in Electric Vehicles

Kalla, Matthias:
Wechselseitige Anregungen und Resonanzen von Turbogeneratoren und dem Stromnetz
Mutual Excitations and Resonances of Turbogenerators and the Power Grid

Keuter, Ralf:
Untersuchung von Schrägung in additiv gefertigten Rotoren permanentmagneterregter Synchronmaschinen
Investigation of Skewing in Additively Manufactured Rotors of Permanent Magnet Synchronous Machines

Klante, Fabian:
Aufbau und Ansteuerung eines semi-autonomen Lastenroboters mit omni-direktionalem Antrieb
Design and Control of a Semi-Autonomous Robot with an Omni-Directional Drive

Koy, Robin:
Analytische Berechnung von Ummagnetisierungsverlusten in permanenterregten Synchronmaschinen
Analytical Calculation of Core Losses in Permanent Magnet Synchronous Machines

Li, Jing:
Dimensionierung eines Moduls des kaskadierten H-Brücken-Umrichters mit verteilten Energiespeichern
Design of a Module for Cascaded H-Bridge converters in Battery Energy Storage System Application

Lou, Chenghao:
Modellierung und Optimierung von Ausgangsfilterns für SiC-Wechselrichter als Traktionsantrieb
Output Filter Modelling and Optimization for SiC Traction Drive Inverters

Pabst, Malte:
Entwicklung eines einphasigen SiC-Batterieladegerätes mit LLC-Resonanzwandler für den Einsatz im Elektrofahrzeug
Development of a Single-Phase SiC Battery Charger with LLC Resonance Converter Operating in an Electric Vehicle

Petridis, Dimitrios:
Entwicklung eines autonomen Mess- und Regelungsprozesses für die Ausrichtung an Oberflächen
Development of an Autonomous Measurement and Control Process for the Alignment on Surfaces

Pille, Jasper:
Untersuchung eines Verfahrens zur Flusslageschätzung für Induktionsmaschinen mit geschlossenen Rotornuten bei kleinen Drehzahlen
Analysis of a Method for Flux Position Estimation of Induction Machines with Closed Rotor Slots at Low Speeds

Racaj, Shkumbin:
Implementierung einer Netzleitwarte für ein Microgrid-Teststand
Implementation of a Central Control and Data Acquisition Unit for a Microgrid Test Bench

Schöppner, Nils:
Methoden zur Analyse der Stabilität umrichterdominierter Netze
Stability Analysis of Converter Dominated Grids

Shan, Weipeng:
FEM-Untersuchungen für Induktionsmaschinen mit einer kurzgeschlossenen Zusatzwicklung im Rotor
FEM Analysis for Induction Machines with an Additional Short-Circuited Rotor Coil

Stallmann, Frederik:
Entwicklung von Regelungsverfahren für dreiphasige und mehrphasige Antriebssysteme im Automotive-Bereich mit dem Schwerpunkt der Ausfallsicherheit
Development of Motor Controls for Three-Phase and Multiphase Electric Actuators in the Automotive Sector with Focus on Reliability

Stockbrügger, Jan Ole:
Methoden zur indirekten Bestimmung der Rotortemperatur von Induktionsmaschinen mit Käfigläufer
Methods for an Indirect Determination of the Rotor Temperature of Induction Machines

Vasquez, Pedro:
Optimierung eines luftgekühlten Ladegerätes mit Wide-Bandgap-Halbleitern für Elektrofahrzeuge
Optimization of an Air-Cooled Battery Charger with Wide Bandgap Semiconductors in Electric Vehicles

Vogel, Arne Hendrik:
Experimentelle Validierung von Zeit- und Frequenzbereichsmodellen zur Untersuchung der Interaktion von Netz- und Maschinenumrichter
Experimental Validation of Time Domain Models and Frequency Domain Models for Investigating the Interaction of Grid Converter and Machine Converter

Xie, Yu:
Untersuchung verschiedener Modulationsarten für Modulare Multilevel Umrichter
Investigation of Various Modulation Techniques for Modular Multilevel Converters

Xing, Zitong:
Modellierung des Erdungspfads eines elektrischen Fahrzeugantriebs
Ground System Modelling in Electric Vehicle Powertrains

Zajonc, Maximilian:
Untersuchung der mechanischen und elektromagnetischen Eigenschaften unterschiedlicher Rotorkonfigurationen für den Einsatz in Hochdrehzahl-PMSM
Study of the Mechanical and Electromagnetic Behaviour of Different Rotor Configurations for an High Speed PMSM

Zode, Daniel:
Nichtlineares Frequenzbereichsmodell eines stromgeregelten Pulswechselrichters mit linearer Last
Nonlinear Frequency Domain Model of a Closed-Loop Current Controlled PWM Converter with Linear Load

Dissertationen 2016/17/18
Dissertations 2016/17/18

Das Stirnraumfeld und sein Einfluss auf Schlingströme bei Schenkelpolsynchronmaschinen

von Dr.-Ing. Eva Maria Bresemann

Aufgrund der großen Leistung von Wasserkraftgeneratoren fallen trotz hoher Wirkungsgrade Verlustleistungen bis zu mehreren Megawatt an. Die entstehende Wärme muss über aufwendige und kostspielige konstruktive Lösungen zur Kühlung abgeführt werden. Daher ist es wünschenswert, diese Verluste zu reduzieren. Als Voraussetzung, um Wege und Methoden zur Reduzierung erarbeiten zu können, ist eine genaue Berechnung dieser Verluste notwendig. In der vorliegenden Arbeit wird eine verbesserte Berechnung des Stirnraumfelds ausgearbeitet, um genauere Kenntnisse der Schlingströme und der Schlingstromverluste zu erlangen. Figur 0.58 zeigt einen Stab im Stirnraum mit einem Stabstrom und mit vier Teilleitern. Ein tangential ausgerichtetes magnetisches Feld im Stirnraum induziert eine Spannung zwischen den lila eingefärbten Teilleitern. Diese Spannung treibt den Schlingstrom.

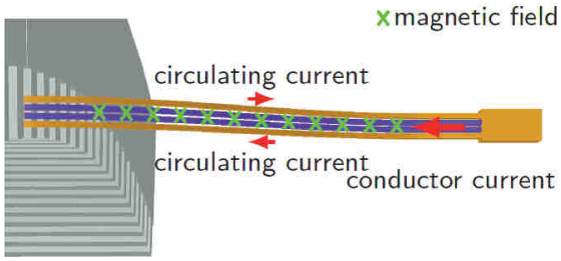


Fig. 0.58: Stab im Stirnraum
Bar in the end winding region

Es werden zunächst verschiedene Einflüsse von Maschinengeometrien und -parametern anhand von FEM-Simulationen analysiert. AnschlieSSend werden bestehende analytische Berechnungsverfahren mit der FEM-Simulation verglichen und erweitert sowie neu kombiniert. Mit diesen Erweiterungen werden verschiedene Polendausführungen, Sättigungseffekte und die innere Phasenverschiebung besser bzw. zum ersten Mal bei der Berechnung des Stirnraumfelds berücksichtigt. Die des Felds in der Pollücke und im Stirnraum ist in Fig. 0.59 anhand von Li-

Magnetic Field of the End Winding Region and the Influence of Circulating Currents of Salient Pole Synchronous Machines

by Dr.-Ing. Eva Maria Bresemann

Due to the high power rating of hydrogenerators, losses range in megawatt dimensions despite very good efficiencies. Produced heat has to be dissipated with costly and complicated cooling systems. Therefore, it is preferable to reduce these losses. Prior to achieving this, these losses have to be calculated precisely. In this thesis, an improved method of field calculation of the end winding region is developed in order to get a better understanding of the current distribution in a bar and the resulting losses. A bar with the conductor current is shown in Fig. 0.58. The bar has four subconductors. A tangential magnetic end winding field induces voltage in the violet subconductors. Due to this, a circulating current is formed. Firstly, the effects of different machine parameters and layouts are determined by FEM simulations. Then existing analytic calculation methods are compared to the FEM simulations, extended and combined in different ways. These enhanced methods lead to improved calculations and understandings of the influence of the pole end geometry, the saturation effects and the inner phase shift on the magnetic field in the end winding region. The characteristic of the magnetic field is shown in Fig. 0.59. It is illustrated by lines with the same magnetic flux density. This new calculation method is validated via measurements. When determining the losses, the focus is on the influence of the end winding geometry, the bending direction and the inner phase shift.

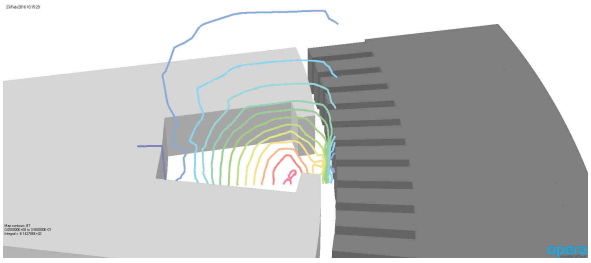


Fig. 0.59: Magnetisches Feld
Characteristic of the magnetic field

nien gleicher magnetischer Induktion skizziert. Das neue Berechnungsverfahren wird anhand von Messungen validiert. Bei der Verlustberechnung werden im Besonderen der Einfluss der Wicklungskopfgeometrie und die Abkröpfrichtung sowie die innere Phasenverschiebung untersucht.

Elektrisch erregte Synchronmaschinen als Fahrantriebe

von Dr.-Ing. André Brune

Die elektrisch erregte Synchronmaschine (ESM) als Fahrantrieb für Hybrid- und Elektrofahrzeuge zeichnet sich bei geeigneter Dimensionierung vor allem durch einen hohen Antriebswirkungsgrad und eine besonders hohe Kurzzeitspitzenleistung aus. Darüber hinaus werden keine kritischen Rohstoffe benötigt, bei denen Verfügbarkeitsengpässe und damit deutliche Preisrisiken zu befürchten sind. Zur zeiteffizienten und ganzheitlichen Vorausberechnung und Optimierung des elektromagnetischen und thermischen Verhaltens der ESM werden in der vorliegenden Dissertation neu erarbeitete Methoden detailliert vorgestellt und bewertet. Diese Berechnungsmethoden stellen eine Verbesserung gegenüber dem Stand der Technik dar, sodass auch hoch ausgenutzte und somit deutlich von Sättigungseffekten beeinflusste ESM mit einer hohen Vorausberechnungsqualität dimensioniert werden können. Mit dem analytisch und numerisch gekoppelten Ansatz lassen sich die relevanten elektromagnetischen Bewertungskriterien, wie beispielsweise der Antriebswirkungsgrad, die Ströme und Spannungen und die Einzelverluste in vollständigen Drehmoment-Drehzahl-Kennfeldern ermitteln (siehe Fig.0.60). Die Einzelverluste dienen wiederum als Eingangsgrößen für die thermische Modellierung der ESM. Für die betrachtete Hohlwellenkühlung werden ein verbesserter Ansatz basierend auf einem thermischen Netzwerkmodell (siehe Fig.0.61) sowie ein neu erarbeitetes Verfahren mittels Lösung der zweidimensionalen Wärmeleitungsgleichung dargelegt. Damit ist es möglich, die Hot-Spot-Temperatur der Erregerwicklung und die mittlere Erregerwicklungstemperatur treffsicher vorauszuberechnen. Neben dem methodischen Kern werden des Weiteren die charakteristischen Eigenschaften der ESM bei der grundlegenden Betrachtung des Verhaltens an der Grenzkennlinie (GKL) beleuchtet. Durch die verschiedenen vorgestellten Beschreibungsvarianten der GKL mit geschlossenen analytischen Gleichungen, mit numerisch erzeugten graphischen Kontur-darstellungen und mit der Darstellung von Stromortskurven wird ein wertvoller Beitrag zum Verständnis der ESM als Fahrantrieb geleistet. Die Ergebnisse des Berechnungsverfahrens für die elektromagnetischen Eigenschaften wurden durch Messdaten an zwei Schenkelpol-Synchronmaschinen (SPSM), einem eigens dafür dimensionierten und aufgebauten Prototyp sowie einer in Serie gefertigten SPSM überprüft. Die

Electrically Excited Synchronous Machines as Traction Drives

by Dr.-Ing. André Brune

When suitably designed for the use as traction machine in hybrid and electric vehicles, the electrically excited synchronous machine (ESM) is characterized by a high efficiency of the whole drive system with particularly high short-term peak performance. In addition, no critical raw materials are needed where difficulties in the sourcing and thus significant price risks are to be feared. To better enable time-efficient and holistic prediction and optimization of the ESM's electromagnetic and thermal characteristics, newly developed methods are presented and evaluated in the present dissertation. These calculation methods represent an improvement compared to the state of the art, so that even highly utilized ESM, which are significantly affected by saturation effects, can be designed with a high degree of accuracy. Using an analytically and numerically coupled approach, the relevant electromagnetic design criteria, e.g. the drive efficiency, currents and voltages and the different loss parts (arbitrarily detailed by the different loss types and by the local distribution in the electrical machine), can be determined in complete torque-speed maps (see Fig.0.60). The individual losses are used as an input for the thermal modelling of the ESM. This model considers a hollow shaft cooling concept and provides detailed thermal analysis of the field winding based on an improved thermal network model (see Fig.0.61) as well as a newly developed method, which includes a solution to the two-dimensional heat equation. Together, these methods offer an enhanced approach, where it is possible to predict the hot spot temperature and the average temperature of the field winding. In addition to this systematic work, the ESM is further characterized fundamentally considering the behaviour at the limiting curve (GKL). A variety of approaches is utilized to describe the behaviour at the GKL. These include closed analytic equations, numerically generated contour plots, and graphical representation by means of the current locus curve. Together, these different representation methods provide a valuable contribution to the understanding of the ESM as a traction motor. The electromagnetic results of the calculation method were validated with data from measurements made on two salient-pole synchronous machines (SPSM), an especially built prototype and a SPSM from mass production, which were both operated on a machine test bench. The deviations between the measurement and the simulation results are small and show the benefit

geringen Abweichungen zwischen den Mess- und den Simulationsergebnissen sind zufriedenstellend und belegen die Validität der erarbeiteten Berechnungsmethodik. Die Besonderheiten der ESM, wie unter anderem die hohe Scheinleistungsausnutzung (hohe Spitzenleistung) und das Verhalten des Maximaldrehmoments im MTPA-Bereich, wurden eindeutig durch die Messdaten belegt.

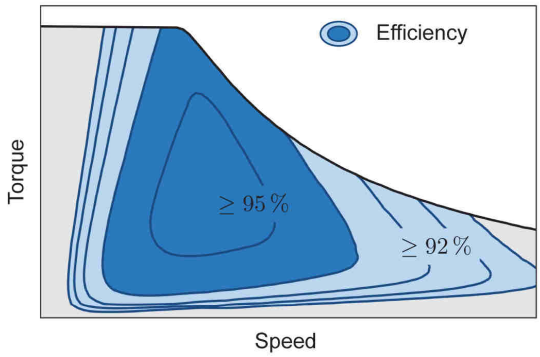


Fig. 0.60: Typisches Wirkungsgradkennfeld einer ESM
Typical efficiency map of an ESM

Zur Überprüfung der thermischen Simulationsergebnisse wurde ein Teilmodell des Schenkelpolläufers des SPSM-Prototypen aufgebaut und auf einem thermischen Prüfstand mit Nachbildung der Hohlwellen-kühlung untersucht. Aus dem Abgleich von Messergebnissen und Ergebnissen der Vorausberechnung konnte ein wichtiger thermischer Parameter, die wirksame thermische Leitfähigkeit zwischen der Erregerwicklung und dem Polkern bestimmt werden. Sowohl die stationären Endtemperaturen als auch die transienten Temperaturverläufe zeigen eine hohe Übereinstimmung zu den Simulationsergebnissen. Die vorgestellte Berechnungsmethodik für ESM wird für den industriellen Einsatz empfohlen, damit darauf aufbauend die Vor- und Nachteile der ESM mit möglichst gleichwertiger Voraussagegenauigkeit zu permanentmagneterregten Synchronmaschinen und Induktionsmaschinen quantifiziert.

of the developed calculation method. The special behaviour of the ESM, such as the high apparent power utilization (high peak power) and the typical properties of the peak torque in the MTPA range (as a part of the limiting curve) are clearly validated by the measured results. To validate the thermal simulation results, a partial model of the salient-pole rotor of the SPSM prototype was built. Tests were conducted on a thermal test stand with an emulated hollow shaft cooling. The effective thermal conductivity between the field winding and the pole core is determined using this apparatus. This metric represents an important thermal parameter of the system. Both the steady-state and transient temperature curves show a high degree of agreement with the simulation results. The presented calculation methods for ESM are recommended for industrial use, where the advantages and disadvantages of the ESM can be quantified with the same prediction accuracy as is possible for permanent magnet synchronous machines and induction machines.

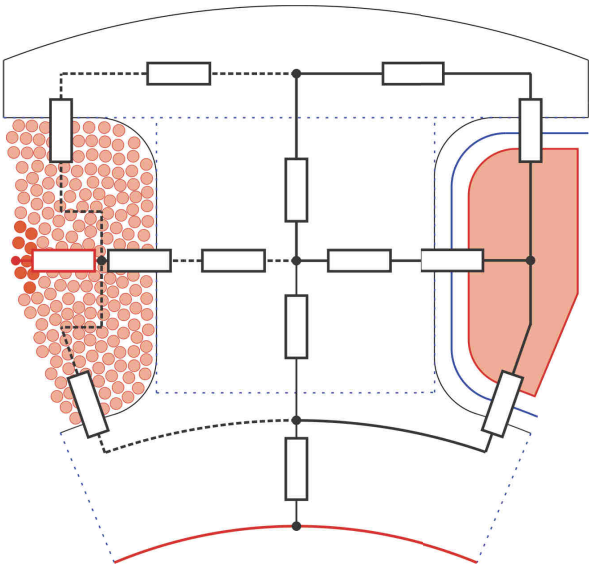


Fig. 0.61: Wärmequellennetzwerk für Polwicklungen mit Darstellung des thermischen Hot-Spots
Thermal network model of the field winding with representation of the thermal hot spot

Gestaltung und Analyse elektromagnetischer Kippaktoren

von Dr.-Ing. Michael Dörbaum

In dieser Arbeit wird die Gestaltung bistabiler elektromagnetischer Kippaktoren (EKA) erforscht, die sich so aneinanderreihen lassen, dass ein voll aktuiertes Endoskop entsteht. Mit dem vorgestellten Konzept eines hyperredundanten Biegeaktors, wie in Fig. 0.63 gezeigt, ist es möglich, den bisher widersprüchlichen Anforderungen an übliche Endoskope aus hoher Flexibilität bei gleichzeitig hoher Steifigkeit zu begegnen. Ein EKA kann durch eine Kippbewegung aktiv zwischen zwei festen Positionen wechseln. Diese mechanische Bewegung wird durch ein elektromagnetisch bewirktes Drehmoment angetrieben. In der Anwendung ist geplant, die Biegeaktorkette nach dem sogenannten Follow-The-Leader-Prinzip zu betreiben. Dieses Prinzip erfordert es, jeden Kippvorgang individuell nach der Belastung über die Bestromungsdauer der Spule zu steuern. Dafür werden sehr schnell rechnende Modelle des Kippvorgangs benötigt. Als Vorbereitung für diese Modelle erfolgt eine Analyse des Betriebsverhaltens und dabei insbesondere der Größen, die einen Einfluss auf das Drehmoment haben. Das Drehmoment ist eine Folge der Gestaltung des Magnetkreises und damit der Konstruktion. Der Magnetkreis wird numerisch detailliert untersucht und es werden verschiedene Bauformen vorgestellt. Der magnetische Fluss ist eine Folge einer elektrischen Durchflutung in den Spulen. Die elektrische Durchflutung ist dabei abhängig vom elektrischen System, das sich ändert aufgrund von Kondensatorentladung, temperaturabhängigen Widerständen und induzierter Spannung durch Bewegung. Diese Zusammenhänge der physikalischen Domäne sind in Fig. 0.62 gezeigt. Die Analyse des Betriebsverhaltens ist die Basis für die hier vorgestellte zeiteffiziente Berechnungsmethodik einer Kette aus vielen hintereinandergereihten elektromagnetischen Kippaktoren. In der Berechnungsmethodik lassen sich die Wechselwirkungen von Elektronik, Elektromagnetik, Mechanik und Thermik gleichermaßen berücksichtigen. Mit Hilfe dieser Berechnungsmethodik können EKA-Ketten mit beliebiger Anzahl an EKA-Elementen im Betrieb berechnet werden. Die Validierung mit gemessenen Kippvorgängen zeigte dabei, dass sich mit der beschriebenen Methodik bereits ohne zusätzliches Parameterfitting die Kippdauer mit einer Abweichung von maximal 15 % bei geringem zeitlichen Aufwand im Voraus berechnen lassen.

Design and Analysis of Electromagnetic Tilting Actuators

by Dr.-Ing. Michael Dörbaum

This thesis studies the design and the behaviour of bi-stable electromagnetic tilting actuators (ETA). A serial chain of these actuators can be used as a medical or industrial endoscope. With the concept presented here, it is possible to unite flexibility and high stiffness in one shaft. An ETA is able to switch between defined positions through a tilting movement. The mechanical movement is driven by an electromagnetic torque, which is powered by a magnetomotive force (MMF) in the coils of the ETA. The tilting torque is mainly influenced by the design of the magnetic path within the ETA cores. The mechanic and electromagnetic design is included in Chapter 3 of this thesis. An ETA chain is operated using a Follow the Leader control. Therefore, very fast calculation methods are necessary to evaluate power-on durations and subsequently influence the tilting process itself. In Chapter 4 of this thesis, the physical effects are analyzed while operating and calculation methods are elaborated. Since very high currents are used for tilting, the electric network calculation includes a thermal model to consider the thermally driven asymmetric increase of resistivity as well. The analysis of the operational characteristic of the ETA is the basis of the time-efficient combined modelling in Chapter 5. Using this combined calculation, a complete tilting process of one or more ETA can be calculated in advance considering the chain configuration and external forces. Using this method, optimized power-on durations can be evaluated, for which the tilting process itself is successful and no unintended impulsive forces are devolved into the chain. The validation with measurements has proved the accuracy of the initial model (without parameter fitting) to a deviation of 15 %, mostly with a very small calculation time effort.

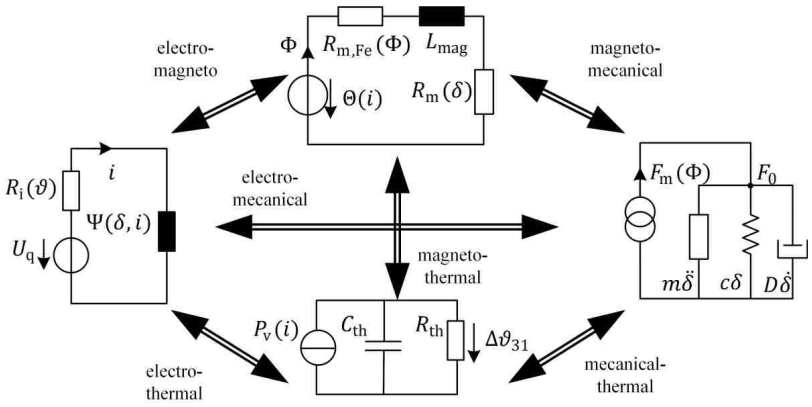


Figure 0.62: Vereinfachte Darstellung der wichtigsten Zusammenhänge der energetischen Teilbereiche eines Elektromagneten
Physical domains with simplified representative networks concerned by the fast calculation model

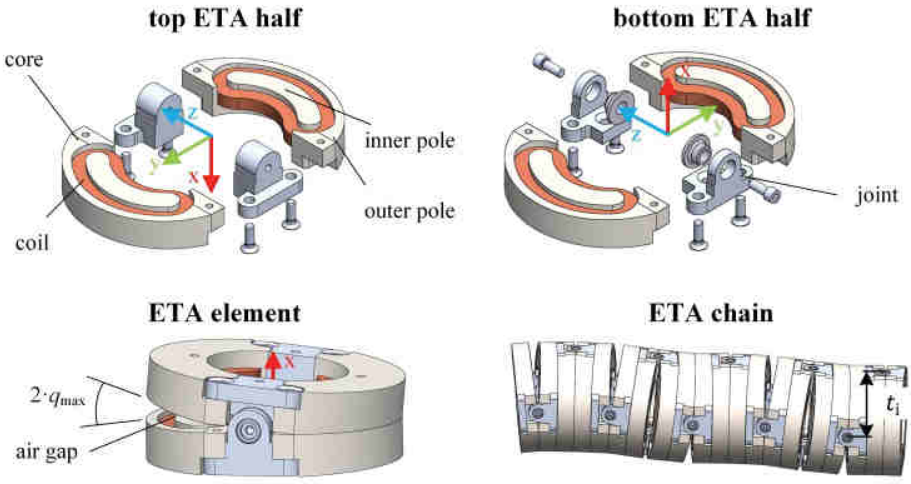


Figure 0.63: Explosionszeichnung zweier EKA-Hälften, Zeichnung eines zusammengesetzten EKA-Elements und einer Biegeaktorkette aus $n_{EKA} = 10$ EKA Elementen
Construction of two ETA halves, one ETA element and an ETA chain composed of 10 single ETA elements

Dimensionierung motorintegrierter elektromagnetischer Aktoren zur Dämpfung von Rotorschwingungen

von Dr.-Ing. Jakub Emmrich

Durch selbsterregte Schwingungen während der mechanischen Bearbeitung im Bereich der Hochgeschwindigkeitszerspanung (High-Speed Cutting) werden Produktqualität und Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems gemindert. Aus der Literatur bekannte Ansätze verfolgen das Ziel, mittels einer aktiven Dämpfung diese Effekte zu verhindern oder zumindest zu reduzieren, um eine höhere Prozessstabilität zu erreichen. Hierbei werden unter anderem elektromagnetische Lager oder Aktoren eingesetzt. Im Fokus der vorliegenden Arbeit steht die Vorgehensweise zur Dimensionierung eines elektromagnetischen Aktors. Dieser kann ohne wesentliche Änderungen an der Konstruktion der Motorspindel vollständig in deren Aktivteil integriert werden, um Schwingungen bis zu einer Frequenz von 1500 Hz aktiv zu dämpfen. Neben der Ausarbeitung zweier möglicher Konzepte wird mit einem nichtlinearen analytischen Berechnungsmodell jeweils eine Parameteranalyse zur Bestimmung der optimalen geometrischen und elektrischen Größen zur Erzielung einer für das gegebene Bauvolumen maximalen Kraft durchgeführt. Unter Nutzung von Finite-Elemente-Simulationsprogrammen werden die gewonnenen Ergebnisse validiert und deren Abweichungen bewertet. Auf Grund der hohen Anforderungen hinsichtlich der notwendigen Kräfte von bis zu 800 N wird insbesondere der Einfluss von fertigungs- und montagetechnischen Aspekten aufgezeigt und berücksichtigt. Abschließend werden die konstruktiven Einzelheiten und Herausforderungen von zwei auf Basis der analytischen und numerischen Modellierung gefertigten Prototypen bzw. Demonstratoren im Detail erläutert. Die ebenfalls in diesem Rahmen durchgeführten Kraftmessungen werden mit den Ergebnissen der theoretischen Berechnungen verglichen und die Grenzen sowie das Optimierungspotenzial der Aktordimensionierung benannt.

Dimensioning of Motor-Integrated Electromagnetic Actuators for Rotor Vibration Damping

by Dr.-Ing. Jakub Emmrich

Self-excited vibrations occurring during a machining process in high-speed cutting applications reduce the product quality and performance of the overall system. The aim of approaches known from literature is to prevent or at least reduce these effects with an active damping system, in order to achieve a higher process stability. For example, this is realized by the use of electromagnetic bearings or actuators.

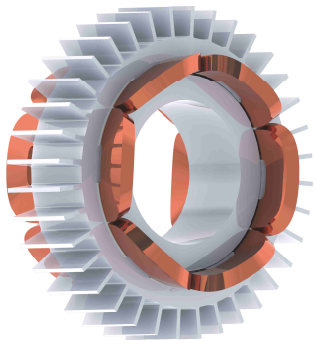


Fig. 0.65: CAD-Modell des Aktorprototyps
CAD model of the actuator prototype

This thesis focusses on the dimensioning of an electromagnetic actuator, which can be integrated into the active component of a motor spindle without the need for major design changes and which is capable of damping vibrations with a frequency of up to 1500 Hz. For that purpose, two actuator concepts are evaluated with a non-linear analytic calculation model to identify the optimal geometric and electric parameters and to maximize the attractive force for the designed space within the spindle motor. The analytic models are validated with finite element simulation software, and the deviation of the results is discussed. Due to the required forces of up to 800 N, particular attention is paid to the influence of production and assembly aspects. Finally, the structural details and challenges of two prototypes, manufactured based on the analytic and numeric modelling of the two actuator concepts, are described in detail. The corresponding force measurements are compared to the theoretical calculations, and the limits and potential optimizations for the design process are presented.

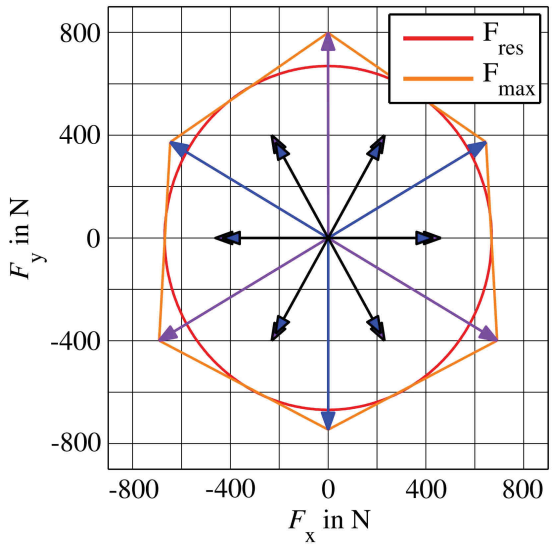


Fig. 0.64: Kraftvektoren und resultierende Kraftamplituden
Force vectors and resulting force amplitudes

Umrichterregelung für Windenergieanlagen in schwachen Netzen mit Resonanzen

von Dr.-Ing. Felix Fuchs

Diese Arbeit ist ein Beitrag im Bereich der Netzintegration von Windenergieanlagen in schwache Netze mit Resonanzen (Netzresonanzen). Netzresonanzen können durch kapazitive Elemente im Netz hervorgerufen werden (beispielsweise Kabel- oder Leistungsfaktorkorrektur-Kapazitäten). Es wird der Einfluss solcher Netzresonanzen auf ein Standard-Windenergieanlagensystem analysiert. Dabei werden stabilitätskritische Netzresonanzen identifiziert und Methoden zur Stabilisierung der Regelung entwickelt. Den Netzanschlussbedingungen für hochfrequente Ströme entsprechend wird ein komplett neues 2-MW-Netzumrichter-System ausgelegt, wobei darauf geachtet wird, dass es sich um industrieübliche Designs handelt. Betrachtet werden parallel geschaltete Niederspannungs-2-Level-Umrichter (üblich in Windenergieanlagen). In Windenergieanlagen sind zwei Arten von Netzfiltern üblich: LCL- oder Saugkreisfilter. Beide werden in dieser Arbeit ausgelegt und untersucht. So ist ein direkter Vergleich möglich auch hinsichtlich der Sensitivität bzgl. Netzresonanzen. Beide Filtertopologien beinhalten Resonanzen, welche angeregt werden können. Dies kann zu einer Instabilität der Regelung führen. Hier werden zwei Lösungen verfolgt: Passive Dämpfungsschaltungen oder eine aktive Dämpfung durch die Regelung. In dieser Arbeit werden beide Methoden analysiert. Insbesondere werden verschiedene passive Dämpfungsmethoden verglichen. Es wird festgestellt, dass deutlich unterschiedliche Filterauslegungen für schwache und starke Netze notwendig sind (als Konsequenz aus den Netzanschlussbedingungen). Aus diesem Grund werden zwei unterschiedliche LCL-/Saugkreisfilter ausgelegt, zum einen für ein starkes Netz mit einem Kurzschlussleistungsverhältnis des Netzes zur Anlagenleistung von größer als 50 und zum anderen für 10-50. Mit dem Ziel ein Standard-Netzumrichter-System einer Windenergieanlage auszulegen wird in dieser Arbeit die komplette dq-Strom-Regelung für alle ausgelegten Filter entworfen. Da jede Messung die Kosten erhöht und eine Messung des Umrichterstroms aus Sicherheitsgründen immer installiert sein muss, wird der Umrichterstrom (und nicht der Netzstrom) geregelt. Es wird erklärt, weshalb das symmetrische Optimum und nicht das Betragsoptimum die richtige Wahl für das Startdesign der Stromregler ist. Ein weiterer Fokus liegt auf Messfiltern. Hier wird herausgefunden, dass ein Tiefpassfiltern der

Converter Control for Wind Turbines when Operating in Weak Grids Containing Resonances

by Dr.-Ing. Felix Fuchs

This thesis is a contribution with respect to grid integration of wind turbines in weak grids containing resonances (grid resonances). Grid resonances can be evoked by capacitive elements in the grid (for example cable or power factor correction capacitances). The influence of grid resonances on a standard wind turbine converter control system is analysed. Stability critical grid resonances are identified, and methods to stabilise the control are developed. According to harmonic grid codes, a completely new 2 MW grid converter system is designed (being close to commercial wind turbine systems). The standard system, low-voltage two-level paralleled converters, is analysed. Two different grid filter systems are common in wind turbine converters: LCL or trap filters. Both are designed and analysed in this thesis. In this way, there is a comparison which system is more sensitive to grid resonances. Both filter types contain resonances which can be excited and which could lead to control instability. Therefore, two solutions are pursued: passive damping circuits or active damping by control. In this thesis, both methods are analysed. In particular, different passive damping approaches are compared. It is found that completely different filter designs are necessary for stiff and weak grids (as a result of the grid codes). Due to this fact, two different LCL/trap filters are designed, one for the stiff grid with a short circuit power ratio (SCR) of grid to turbine of higher than 50, and another one for an SCR of 10-50. Working towards the design of a standard turbine grid converter system, a complete dq current control is set up for all filter topologies. As every measurement installed increases the costs, and due to the fact that a converter current measurement is always implemented for safety reasons, the converter current (and not the grid current) is controlled in this work. An explanation that the symmetrical optimum and not the technical optimum is the right choice for a start design of the current controller is presented. Another focus is on measurement filters. It is found that a low pass filtering of the grid voltage prevents aliasing and increases the current control bandwidth. A model for the (medium-voltage) grid, containing a resonance, is developed. This leads to the definition of a variable LCL-type grid resonance. Then, for all designed converter controls, a transfer function stability analysis varying the grid resonance is performed. It is found that specific

Netzspannung Aliasing verhindert und die Stromregelungsbandbreite erhöht. Es wird ein Modell für ein Mittelspannungsnetz mit einer Resonanz entwickelt, das letztlich einem LCL-Schaltkreis gleicht. Im nächsten Schritt wird für alle entworfenen Regelungen eine Stabilitätsanalyse mit variierender Netzresonanz durchgeführt. Das Resultat ist, dass spezifische Netzresonanzen mit einer sogenannten -180°- Frequenz des offenen Stromregelkreises stabilitätskritisch sein können. Es wird gezeigt, dass nur mit einem neuen PI-Design auch hier stabile Regelungen erreicht werden können. Für die angepassten PI-Regler wird weiterhin die in den Netzanschlussbedingungen geforderte Dynamik eingehalten. Die Filterauslegung, die Reglerauslegung und die Stabilitätsanalyse werden mit einem Per Unit übertragenen Laborsystem validiert. Dies wird für alle vier Filtertopologien durchgeführt. Verglichen mit dem 2-MW-System werden im Laborsystem deutlich niedrigere X/R-Verhältnisse IV der passiven Komponenten vorgefunden. Dies führt zu einer größeren Dämpfung und daher zu anderen Stabilitätsergebnissen. Als Lösung wird die Wurzelortskurvendarstellung ange-wendet. Mit der kritischem PI-Verstärkung (der niedrigsten PI-Verstärkung, die zu Instabilität führt) wird der Einfluss auf die Stabilität von verschiedenen Netzresonanzen demonstriert. In dieser Arbeit werden alle Daten zur Verfügung gestellt, um eine direkte Nachbildung der Ergebnisse zu ermöglichen. Der Autor freut sich über Diskussionen und/oder Kommentare.

grid resonances, with resonance frequency near -180 crossing frequency of the open current control loop, can be stability critical. It is shown that the control can be stabilised only with a new PI design. For the redesigned controls, the necessary current control bandwidth originating from the grid codes is still met. The filter design, control design and stability analysis results are validated with a p.u.-transformed laboratory setup. This is performed for all four designed filter topologies. Compared to the 2 MW system, significant lower X/R ratios are found for the passive elements. This leads to a higher system damping and therefore to different stability results. As solution, the root locus analysis is applied. Using the critical PI gain (lowest gain leading to instability), the stability influence of several grid resonances is demonstrated. In this thesis, all data is provided enabling a reproduction of the results. The author is looking forward to discussion and/or comments.

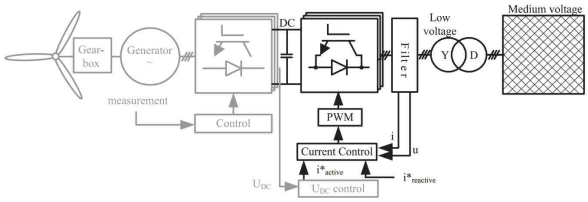


Fig. 0.66: Vereinfachte Darstellung (schwarz) eines Windenergieanlagensystems
Simplification (black) of the wind turbine system for grid studies

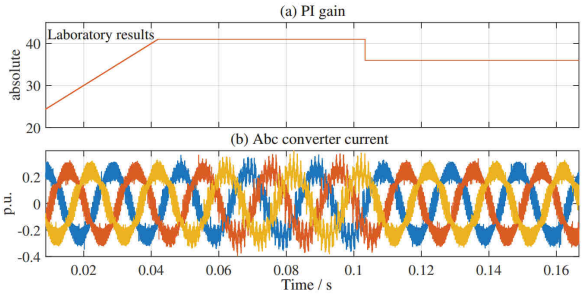


Fig. 0.67: Messung der kritischen Stabilität für ein starkes Netz durch Verwendung eines Saugkreisfilters mit aktiver Dämpfung
Critical stability test for the strong grid trap system with active damping

Optimiertes multifunktionales bidirektionales Ladegerät für Elektrofahrzeuge

von Dr.-Ing. Marco Jung

Von erneuerbaren Energien geladene Elektrofahrzeuge können signifikant zur Reduktion des CO2-AusstoSSes und zur Netzstabilität beitragen. Um die zukünftig notwendigen Netzdienstleistungen, wie Wirk- und Blindleistungsaufnahme und -abgabe, abbilden zu können, sind bidirektionale Energieflüsse erforderlich. Hierbei kann die Fahrzeugbatterie als mobiler Speicher dienen und das Ladegerät die Dienstleistung erbringen. Heutige E-Fahrzeuge sehen meist eine einphasige kabelgebundene Ladung vor. Neue Entwicklungen und Forschungsvorhaben lassen auch eine dreiphasige, sowie eine kontaktlose, induktive Ladung der Fahrzeugbatterie zu. Die hier vorliegende Arbeit mit dem Titel: Optimiertes multifunktionales bidirektionales Ladegerät für Elektrofahrzeuge zeigt eine Lösung für ein On-Board-Batterieladegerät mit Rückspeisefunktion auf, das eine einphasige und dreiphasige kabelgebundene Netzanbindung sowie die Ankopplung von kabellosen, induktiven Energieübertragungssystemen ermöglicht. Durch die Mehrfachnutzung der leistungselektronischen Komponenten können die Kosten, das Volumen und das Gewicht verringert werden. Zusätzlich werden Verfahren zur Optimierung hinsichtlich Materialeinsatz und Effizienz der leistungselektronischen Systemkomponenten aufgezeigt und anhand eines Demonstrators verifiziert.

Optimized Multifunctional Bidirectional Charger for Electric Vehicles

by Dr.-Ing. Marco Jung

When electric vehicles are charged from renewable energies, they can contribute significantly to the reduction of CO2 emissions and grid stability. To provide future ancillary services, like active and reactive power, bidirectional energy flows are required. Here, the vehicle battery serves as a „mobile energy storage“, and the charger provides the services. Today’s electric vehicles usually provide a single-phase wired charge. New developments and research projects also allow for a three-phase and a contactless inductive charging of the vehicle battery. This work with the title "Optimized multifunctional bidirectional charger for electric vehicles" presents a solution for a bidirectional on-board battery charger, which allows a single-phase and three-phase wired grid connection, and the connection of a wireless, inductive power transfer system is possible. Due to the multiple uses of the components, the cost, volume and weight can be reduced. In addition, optimization strategies in terms of power density and efficiency of the power electronic system components are presented and verified on the basis of a demonstrator.

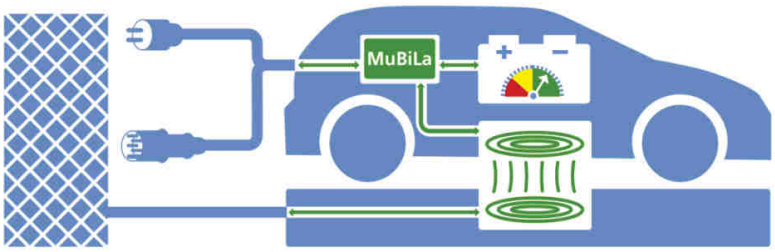


Figure 0.68: Konzept des multifunktionalen bidirektionalen Ladegerätes für Elektrofahrzeuge (MuBiLa)
Concept of the multifunctional bidirectional charger for electric vehicles (MuBiLa)

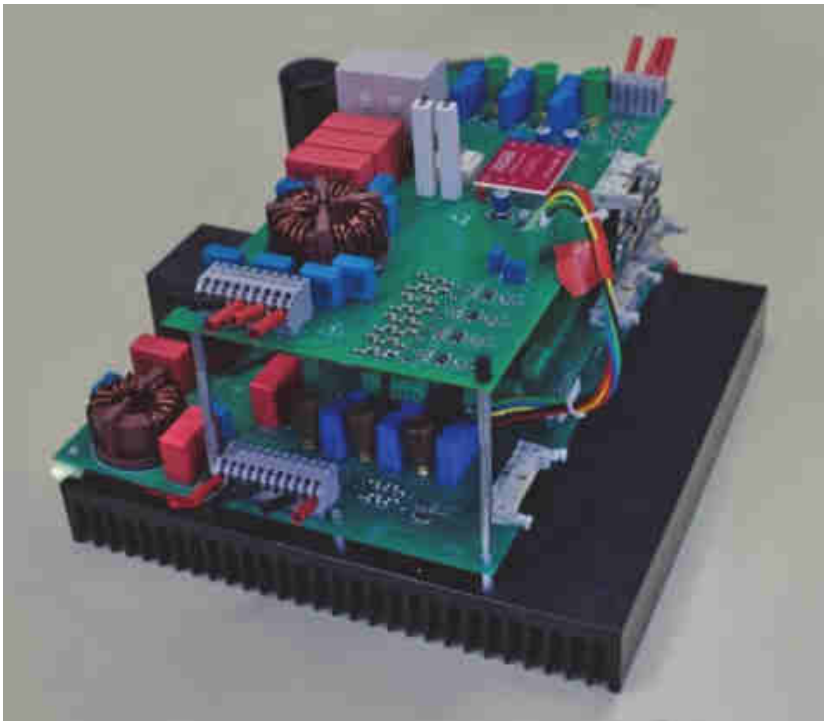


Figure 0.69: Demonstrator des multifunktionalen bidirektionalen Ladegerätes für Elektrofahrzeuge
Demonstrator of the multifunctional bidirectional charger for electric vehicles

Untersuchung der Stromverdrängung im Ständer hoch ausgenutzter elektrischer Maschinen

von Dr.-Ing. Christoph Junginger

Die vorliegende Arbeit zeigt, dass das etablierte, über hundert Jahre alte, analytische Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Stromverdrängung mit seiner Annahme eines reinen Nutquerfeldes für hoch ausgenutzte elektrische Maschinen mit flachen Massivleitern nicht ausreicht. Die Arbeit legt dar, dass es durch zusätzliche Effekte zu einer signifikanten Beeinflussung der resultierenden Stromverdrängung kommen kann. Mit der magnetischen Sättigung, der nebeneinanderliegenden Anordnung von zwei zu verschiedenen Strängen gehörenden Spulenseiten in einer Nut und der Wechselwirkung mit dem Luftspaltfeld werden drei wesentliche Ursachen für zusätzliche Stromverdrängungseffekte identifiziert und behandelt, welche mit den im Stand der Technik beschriebenen Methoden keine ausreichende Berücksichtigung finden. Für die magnetische Sättigung und die nebeneinanderliegende Anordnung von zwei zu verschiedenen Strängen gehörenden Spulen-seiten in der Nut werden die Zusammenhänge in analytischer Form dargestellt.

Fig. 0.70: Schnitt des Versuchsstators mit gegossenen Spulen
Cross-section of the test stator with cast coils

In der Arbeit werden in weiten Teilen Untersuchungen mittels Finite-Elemente-Rechnungen durchgeführt, um zusätzliche Stromverdrängungsursachen zu bestimmen. Dazu wird zunächst eine geeignete Form für die Auswertung der Finite-Elemente-Simulationen entwickelt, da es bisher noch keine etablierte Methode für diese Anwendung gibt. Aus den Betrachtungen werden nach Möglichkeit analytische Ansätze zur Bestimmung der Stromverdrän-

Study of the Current Displacement in the Stator of Highly Utilized Electrical Machines

by Dr.-Ing. Christoph Junginger

The present thesis shows that the established analytical calculation method for the determination of the current displacement is not adequate for highly utilized electrical machines with flat solid conductors. It is more than one hundred years old and assumes a pure cross magnetic field in the slot. The thesis states that additional effects can have a significant influence on the resulting current displacement. Three essential causes for additional current displacement effects are identified: the magnetic saturation, the side-by-side arrangement of two coil sides in the slot, which belong to different phases, and the interaction with the magnetic field of the air gap. Those causes are taken into consideration in the presented calculations in contrast to the state of the art techniques. The correlations are presented in an analytical way for the magnetic saturation and the side-by-side arrangement of two coil sides in the slot, which belong to different phases.

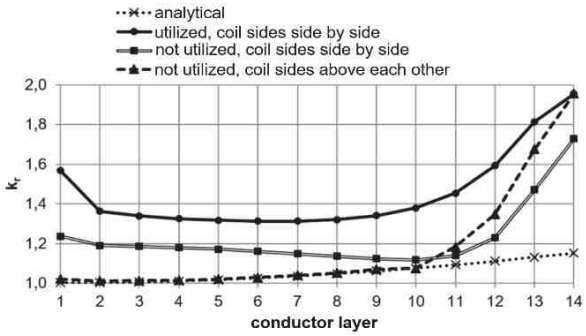


Fig. 0.71: Gegenüberstellung der analytisch ermittelten kr-Faktoren zu drei mittels FEM berechneten Varianten
Comparison of the analytically determined kr-factors for three variants calculated by FEM

In major sections of this thesis, interpretations of finite element analysis are conducted to determine additional causes for current displacement. Therefore, an appropriate way for an evaluation of the finite element analysis is developed. There has been no technique for this application so far. Analytical approaches for the determination of the current displacement are derived as far as possible from the observations. The analytical calculation enables the determination of the AC losses actually appearing at an early stage of the design process. The introduced methods complement the common analyti-

gung abgeleitet. Die analytische Berechnung ermöglicht es, bereits im frühen Auslegungsprozess die tatsächlich auftretenden Wechselstromverluste zu bestimmen. Die vorgestellten Methoden ergänzen das gängige analytische Verfahren. Die entwickelten Methoden werden mit Hilfe von numerischen Vergleichsrechnungen und Messungen am Prüfstand auf Plausibilität geprüft.

cal procedure. The developed methods are checked for plausibility by numerical comparative calculations and test stand measurements.

Elektrische Antriebssysteme mit sehr hoher Drehmomentdichte für Elektro- und Hybridflugzeuge

von Dr.-Ing. Peter Juris

Die Anforderungen an elektrische Antriebsmaschinen in Bezug auf die Drehmoment- und Leistungsdichte steigen zunehmend. Neben dem Einsatz verbesserter oder neuartiger Materialien und der Optimierung des elektromagnetischen Entwurfs hat die Kühlung für elektromagnetisch sehr hoch ausgenutzte Maschinen einen entscheidenden Einfluss auf die Maschinenabmessungen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden die dominanten Einflussgrößen für ein Maschinendesign mit maximaler gravimetrischer und volumetrischer Drehmomentdichte aufgezeigt. Es wird eine Methodik zur Dimensionierung elektrischer Maschinen kleinerer Leistung mit einer direkten Leiterkühlung entwickelt. Als Anwendungsbeispiel dient dabei ein elektrischer Propellerantrieb mit einer mechanischen Dauerleistung von $P_{mech} = 240kW$. Dennoch sind die erarbeiteten Berechnungsvorschriften auch für Motoren anderer Leistungsklassen und damit Abmessungen anwendbar. Neben der elektromagnetischen Untersuchung elektrischer Maschinen stehen analytische Verfahren zur zuverlässigen und zeitsparenden Berechnung der thermischen Fragestellungen für Maschinen mit direkter Leiterkühlung im Fokus dieser Arbeit. Im Gegensatz zu Grenzleistungsturbogeneratoren im hohen Megawattbereich wird die direkte Leiterkühlung für Maschinen kleinerer Leistung kaum eingesetzt. Der Schwerpunkt der thermischen Untersuchungen liegt im Aufbau von Grundlagenwissen zur Dimensionierung der Abmessungen von Strömungskanälen sowie zur Wahl der Kühlfluide und benötigter Volumenströme. Berechnungsmethoden für axial kurze Maschinen, in denen keine hydrodynamisch und thermisch ausgebildete Strömung vorliegt, sowohl bei laminar als auch bei turbulenter Strömung und nicht kreisförmigen Strömungskanälen werden in der Arbeit entwickelt und mit Hilfe zahlreicher Messungen an unterschiedlichen Probekörpern validiert. Dabei zeigen sich für alle Strömungszustände und eingesetzten Fluide gute Übereinstimmungen zwischen den berechneten und den gemessenen Werten. Anhand eines Anwendungsbeispiels wird im Schlussteil der Arbeit beschrieben, wie elektrische Maschinen mit direkter Leiterkühlung im System bewertet werden können. Mit den zuvor erarbeiteten und validierten Berechnungsmethoden wird ein thermisches Modell mit einem elektromagnetischen Berechnungsmodell gekoppelt und für die Berechnung des Energieverbrauchs in einer Flugmission genutzt. Durch weitere Maßnahmen

Electrical Drive Systems with Ultra-high Torque Density for Electric and Hybrid Aircraft

by Dr.-Ing. Peter Juris

The demands on electric motors with respect to torque and power density are rising constantly. Besides the use of improved and innovative materials and an optimization of the electromagnetic design, the cooling of electromagnetically highly utilized motors has a great influence on the motor size. Within the scope of the present work, the key parameters influencing the machine design with maximum gravimetric and volumetric torque density are identified and described in detail. In this study, a design method for electric motors in the lower power range with direct conductor cooling is developed, using the example of an electric propeller drive with a continuous mechanical performance of $P_{mech} = 240kW$. However, the developed calculation rules are also applicable to motors of other performance classes and thus to other motor sizes. Apart from the electromagnetic analysis of electric motors, this work is also focused on analytical methods for a reliable and time-saving calculation of the thermal aspects for motors with a direct conductor cooling concept. Other than with maximum-power turbogenerators operating in the upper megawatt range, direct conductor cooling is rarely used for motors in the lower power range. The aim of a thermal analysis is to build up fundamental knowledge concerning the cooling duct design, the selection of cooling fluids and the required flow rates. For motors with short axial length where no hydrodynamic and thermal flow is present, calculation methods are developed for laminar as well as for turbulent flow and non-circular ducts. Finally, they are validated by means of various measurements using different test specimens. For all flow conditions and fluids, there is a good agreement between measurement results and analysis. In the final part of the study, it is described with an example how to evaluate electric motors with direct conductor cooling within the overall system. Based on the previously developed and validated calculation methods, a thermal model is coupled with an electromagnetic calculation model and used for determining the energy consumption in a flight mission. Through further measures taken in the present work to increase the cooling capacity, the power losses, which can be dissipated, could be increased far beyond the state-of-the-art of current highly utilized motors. The resulting steady-state current density of more than $J_{eff} \geq 100A/mm^2$ at an average coil temperature of $\vartheta_W \approx 140°C$ has been calculated analytically and validated by

zur Steigerung der Kühlleistung konnte in der vorliegenden Arbeit die abführbare Verlustleistung weit über den Stand der Technik derzeitiger hoch ausgenutzter Maschinen hinaus gesteigert werden. Eine resultierende stationäre Stromdichte von über $J_{eff} \geq 100 A/mm^2$ bei einer mittleren Spulentemperatur von $\vartheta_W \approx 140°C$ wurde sowohl analytisch vorausberechnet als auch durch Messungen, siehe Fig. 0.72, an einem Probekörper, siehe Fig. 0.73, nachgewiesen. Lösungsansätze für den Einsatz von deionisiertem Wasser als Kühlmedium werden vorgestellt und die Wirksamkeit von deionisiertem Wasser durch Messungen sowie Berechnungen bestätigt. Des Weiteren wird die Eektivität des Strömungssiedens für die direkte Leiterkühlung durch Messungen quantiziert und weiteres Steigerungspotential für die Stromdichte durch die Kombination der beschriebenen Verbesserungsvorschläge aufgezeigt. Ein Ausblick zu weiterführenden Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der direkten Leiterkühlung für elektrische Maschinen schließt die vorliegende Arbeit ab.

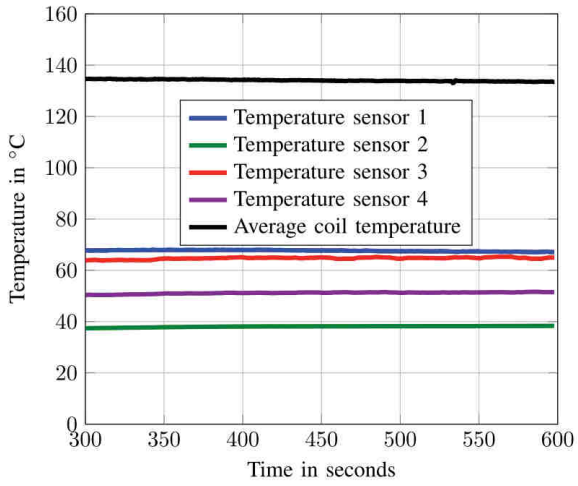


Fig. 12: Steady state temperatures of the cast coil

Fig. 0.72: Messergebnisse für die Coole Spule
Measurement results for cool coil

measurements (see Fig. 0.72), using a test specimen (see Fig. 0.73). Approaches using deionized water as a coolant are presented, and the efficiency of deionized water is validated by calculations and measurements. Moreover, the efficiency of flow boiling for direct conductor cooling is quantified by measurements, and further potential for current density increase is presented by combining the aforementioned improvements. The present work terminates with an outlook on future research activities in the field of direct conductor cooling of electric motors.

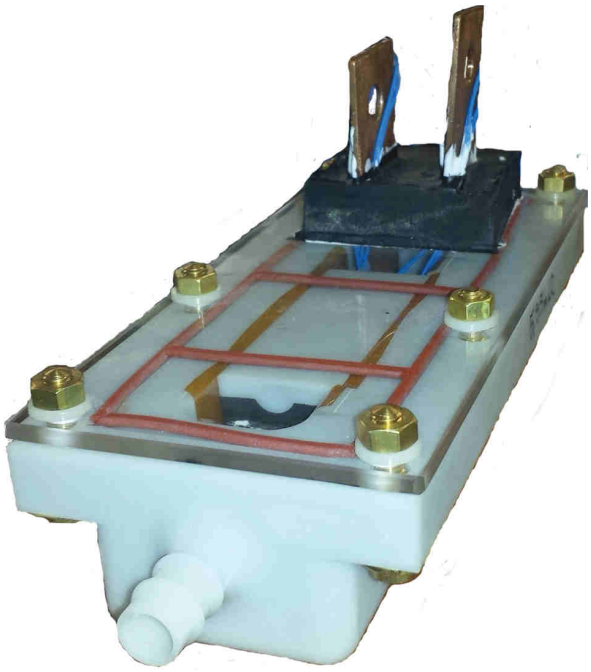


Fig. 0.73: Probekörper mit Cooler Spule
Test specimen with cool coil

Analyse und Regelung einer Klasse von modularen Multilevelumrichter-Topologien

von Dr.-Ing. Dennis Karwatzki

Modulare Multilevelumrichter kommen vermehrt bei Anwendungen großer Leistungen und mittlerer bis hoher Spannung zum Einsatz. Sie zeichnen sich durch leichte Skalierbarkeit, oberschwingungsarme Ausgangsspannungen und einfach realisierbare Redundanz aus. Die in Serie geschalteten Module ermöglichen es, hohe Spannungen zu erreichen und dabei innerhalb der Module Bauteile für niedrigere Spannungen einzusetzen. Zu den wichtigsten Aufgaben beim Betrieb solcher Umrichter gehören die Stromregelung und die Zweigenergieregelung. Die zugrundeliegenden Ansätze für diese Regelungen gleichen sich für unterschiedliche modulare Multilevelumrichter-Topologien. Daraus ergibt sich die zentrale Problemstellung dieser Arbeit, die Topologien der betrachteten Klasse von modularen Multilevelumrichtern einheitlich zu analysieren und ein allgemeingültiges Regelungskonzept für diese zu entwickeln. Die Klasse der untersuchten modularen Multilevelumrichter beinhaltet Topologien, die ausschließlich aus modularen Multilevelzweigen aufgebaut sind. Für die Regelung wird ein kaskadierter Ansatz mit innerem Stromregelkreis und äußerem Zweigenergieregelkreis gewählt. Da bei vielen modularen Multilevelumrichter-Topologien die Zweigenergieregelung auf unterschiedliche Art realisiert werden kann, wird eine Methode zur Bestimmung einer optimalen Zweigenergieregelung eingeführt.
Die Optimierung findet bei dieser Methode hinsichtlich der in den Zweigen auftretenden Ströme statt. Das vorgestellte allgemeine Regelungskonzept wird exemplarisch auf den Modularen Multilevelumrichter (Modular Multilevel Converter) und den Modularen Multilevel-Matrixumrichter (Modular Multilevel Matrix Converter) angewendet. Die aus der Optimierungsmethode resultierenden Zweigenergieregelungen decken Regelungsansätze aus anderen Veröffentlichungen ab und erweitern diese. Abschließend erfolgt eine erfolgreiche Überprüfung der Regelungen beider Topologien mittels Simulationen und Experimenten auf einem Niederspannungsprüfstand.

Analysis and Control of a Class of Modular Multilevel Converter Topologies

by Dr.-Ing. Dennis Karwatzki

Modular multilevel converters are increasingly used for high power and medium to high voltage applications. They are easily scalable and offer output voltages with low harmonics. Furthermore, redundancy can be realized with low effort. By connecting identical modules in series, it is possible to achieve high voltages using only low-voltage devices within the modules. Current control and branch energy balancing control are crucial for a proper operation of modular multilevel converters. The underlying principles for these controls are equal for different modular multilevel converter topologies. This leads to the research problem under investigation in this thesis, which is to analyze the topologies of the examined class of modular multilevel converters with the same methods and to develop a generalized control concept that is applicable to all these topologies. The examined class of modular multilevel converter topologies comprises topologies that solely consist of modular multilevel branches. For the control concept, a cascaded control with inner current control loop and outer energy balancing loop is chosen. As the branch energy balancing can be realized in multiple ways for most modular multilevel converter topologies, this thesis introduces a method for deriving an optimized branch energy balancing. The optimization goal is the minimization of the branch currents needed for the balancing. The presented generalized control concept is exemplarily applied to the Modular Multilevel Converter and to the Modular Multilevel Matrix Converter. The optimization method leads to branch energy balancing controls that include and extend existing control concepts for these topologies. The proper functioning of the generalized control is demonstrated via simulations and experiments at a low-voltage test setup.

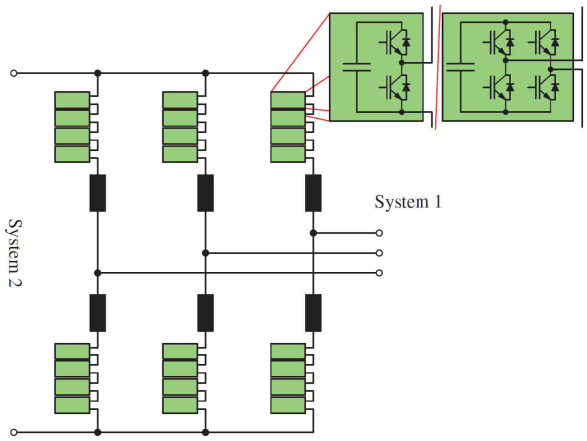


Fig. 0.74: Modularer Multilevelumrichter
Modular multilevel converter

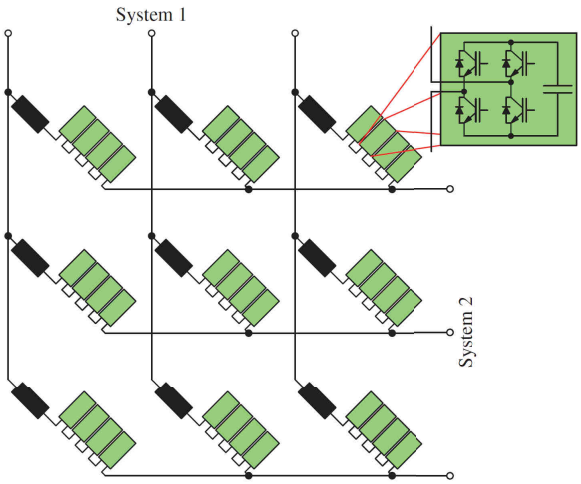


Fig. 0.75: Modularer
Multilevel-Matrixumrichter
Modular multilevel matrix converter

Online-Parameter-Identifikation von geregelten Antriebssystemen mit Umrichterspeisung

von Dr.-Ing. Jaroslav Koupený

Die Kenntnis der aktuellen Systemparameter bzw. Systemzustände ist wichtig für geregelte Asynchronmaschinen (ASM) mit Kurzschlusskäfig und Schleifringläufer, insbesondere im hochdynamischen Betrieb. Dies zeigt sich in Bezug auf die Information über die augenblicklichen Wicklungswiderstände für eine Temperaturbestimmung und die Feststellung potentieller Wicklungsschäden in Echtzeit. Somit kann eine Erhöhung der Robustheit und Zuverlässigkeit des Antriebssystems erreicht werden. Anhand eines detaillierten mathematischen Modells des Antriebssystems, bestehend aus einer ASM und einem Umrichter, wurde eine Beobachterstruktur hergeleitet, die als Systemmodell für die Regelung und die Online-Identifikationsmethode dient. Als Bewertungskriterium steht neben der Stabilität des Verfahrens und der Konvergenzgeschwindigkeit die stationäre Genauigkeit im Vordergrund, die von zahlreichen Nebeneffekten, wie z. B. dem nichtlinearen Verhalten des Wechselrichters, dem Einfluss der Schleifringe oder der Eisensättigung, beeinflusst wird. Die vorgeschlagene Methodik wurde anhand von Simulationen für beide Maschinentypen überprüft und messtechnisch in unterschiedlichen Arbeitspunkten für die U/f-Steuerung, die feldorientierte Regelung sowie für die Energieregelung untermauert. Um die Genauigkeit von den geschätzten Parametern zu erhöhen, wurden bezüglich der erwähnten Nebeneffekte Gegenmaßnahmen vorgeschlagen und implementiert.

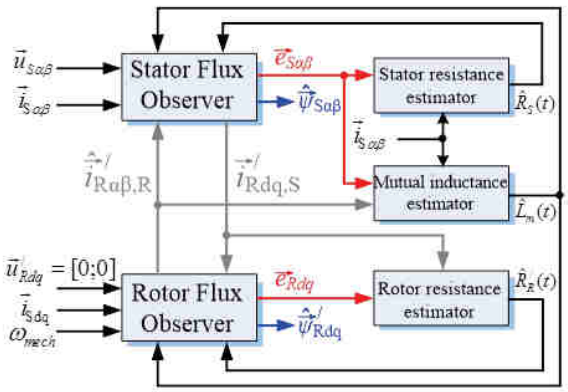


Fig. 0.76: Vorgeschlagene Beobachterstruktur mit Parameter-Adaption
Observer structure with parameter tracking

Online Parameter Estimation of Inverter-Fed Squirrel-Cage Induction Machines

by Dr.-Ing. Jaroslav Koupený

The knowledge about instantaneous system states and parameters is necessary for the control of induction machines (IM) with squirrel-cage rotor and with wound rotor, especially for high dynamic performance. Additionally, the real-time information about the instantaneous winding resistances can be used for the determination of their temperature and the detection of short circuits. Thus, robustness and reliability can be increased. On the basis of a detailed mathematical model of the drive consisting of the IM and the voltage source inverter (VSI), an observer structure is developed. It is used as a system model for the machine control and the identification algorithm. The main requirements are stable performance, speed of convergence and high accuracy. It is influenced by several secondary effects, e. g. by the non-linear behaviour of the VSI, offset error of the current measurement, slip rings or saturation effects. In order to increase the accuracy, counteractions against the aforementioned parasitic effects are discussed and implemented. The proposed identification strategy using the Gradient Descent Method as adaption scheme was validated for different operating points by simulations and experimental tests for several control strategies (open loop V/Hz control, field-oriented control, conventional control of the doubly-fed IM as a generator). Moreover, the stability of this method was analysed, and dimensioning of the observer gains was formulated. Therefore, an adoption of this method for IMs of different power is possible. In comparison to the state-of-the-art, the presented method has a simple structure. It leads to low costs for the practical implementation in standard industrial drives. Besides, the described observer structure is suitable for sensorless control with simultaneous parameter tracking.

Für das vorgestellte adaptive Verfahren basierend auf dem Gradientenabstiegsverfahren wurde eine Stabilitätsanalyse durchgeführt und Einstellungsregeln formuliert. Somit kann die Methode auf ASM unterschiedlicher Leistung übertragen werden. Im Vergleich zu den bereits existierenden Methoden stellt die entwickelte Methode eine einfache Struktur dar, wodurch die Kosten für den praktischen Einsatz in industriellen Antriebssystemen geringgehalten werden können. Außerdem ist mit dem Beobachtermodell eine schnelle Erkennung der Statorunsymmetrie, eine Überwachung der Wicklungstemperatur des Stators und des Rotors sowie ein positionsgeberloser Betrieb mit gleichzeitiger Parameterschätzung möglich.

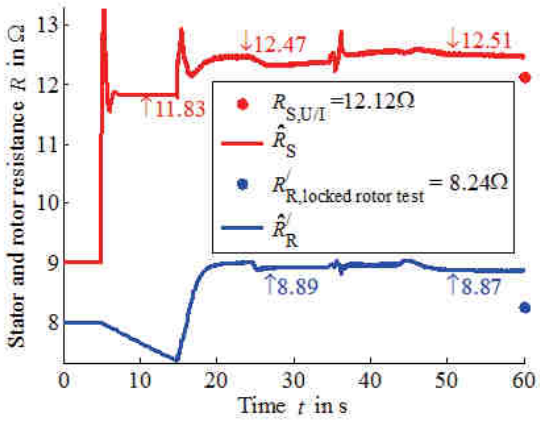


Fig. 0.77: Messergebnisse der Online-Parameter-Adaption in verschiedenen Arbeitspunkten
Measured results of the proposed algorithm for different operation points

Untersuchungen zum Einsatz von Siliziumcarbid-Leistungshalbleitern in Traktionsantriebsumrichtern

von Dr.-Ing. Arvid Merkert

Leistungstransistoren auf Basis neuer Halbleitermaterialien wie Siliziumcarbid ermöglichen bisher unerreicht niedrige Schaltverlustenergien und verbesserte Durchlasseigenschaften bei gleichzeitig geringerer Chipfläche. Durch den aktuellen Trend der Elektrifizierung der Individualmobilität entsteht zunehmend die Anforderung, stetig kompakter und leistungsfähiger werdende leistungselektronische Wandler bei widrigen Umweltanforderungen im Fahrzeug zu integrieren. Aus diesen aktuellen Entwicklungen resultiert die Fragestellung, inwiefern die neuen Halbleitertechnologien nutzbringend im Anforderungsumfeld eingesetzt werden können. Nachdem die Eigenschaften und der Entwicklungsstand der neuen Halbleitertechnologien dargestellt sind, wird die Kommutierungszelle als Basiselement aller Wandlertopologien eingeführt. Bei Forschungsvorhaben mit Hinblick auf die Elektromobilität untersuchte Wandlertopologien mit Spannungs-, Strom- und Impedanzzwischenkreis werden anhand analytisch abgeleiteter Gütekriterien verglichen. Im Ergebnis zeigt der Hochsetzsteller-Wechselrichter insgesamt die vielversprechendste Charakteristik. Anhand generischer Halbbrücken-Eigenschaftsmodelle werden beim Vergleich zwischen den Silizium-IGBTs und Siliziumcarbid-JFETs beim Wechselrichter und Hochsetzsteller-Wechselrichter Unterschiede der Technologien aufgezeigt. Die Analyse ergibt bei SiC-JFETs eine signifikante Verbesserung der Güteparameter Chipfläche und Wirkungsgrad. Im Rahmen der Labormusterentwicklung werden Speicherdrossel, Zwischenkreiskondensator, Kühlung und Gatetreiber analysiert. Beim Hochsetzsteller-Wechselrichter ermöglichen die Phasenzahl des Hochsetzstellers und das Steuerverfahren eine zusätzliche Zwischenkreiseffektivstromentlastung. Per Frequenzbereichsanalyse werden verbesserte Steuerverfahren für den Betriebsverbund ermittelt. Der entworfene SiC-Gate-Treiber ermöglicht zuerst die detaillierte Analyse des Schaltverhaltens der Verarmungstyp-Transistoren und nachfolgend den sicheren Betrieb eines Labormusters. Zur Aufnahme der Stromtransienten in der niederinduktiven Kommutierungszelle ist das Messkonzept einer Rogowskispule mit Offline-Integration implementiert worden. Zur Leistungshalbleiterkühlung wurde das bekannte Konzept einer direkten Bodenplattenkühlung für das beigestellte Prototyp-Halbleitermodul angepasst, am Beispiel einer Halbbrücke cha-

Investigations Concerning the Use of Silicon Carbide Power Semiconductors in Traction Drive Converters

by Dr.-Ing. Arvid Merkert

Power transistors based on new semiconductor material like silicon carbide reach unmatched low switching loss and improved conduction characteristics with smaller chip area at the same time. Driven by the actual trend of electrification in individual mobility systems, vehicular integrated power electronic converters require continuous improvement of power density and robustness at harsh environmental conditions. The question, to what extent the new semiconductor technologies can contribute beneficially to this application, ultimately arises from these contemporary developments. After giving a résumé on the actual development status of the semiconductor technologies, the commutation cell is introduced as essential element yielding the foundation for all power electronic converter topologies. Subsequently, power electronic converter topologies which have been in the focus in hybrid or electric vehicle drive train research are compared. Generic figures of merit for different types of voltage-, current- and impedance-source converters were derived for this comparison and point to the step-up converter with inverter as most promising candidate. In order to examine this result, scalable behavioural loss models are used for the technology assessment of silicon IGBT and silicon carbide JFET based inverter and step-up converter with inverter systems. Resulting in significant superior chip area and efficiency with JFETs, this assessment justifies the development of a laboratory prototype, during which inductor, DC link, cooling and gate driver are analysed. The additional degree of freedom concerning the number of phases of the step-up converter as well as coordinated converter-inverter pulse patterns have been used to reduce the current load of the DC link. A frequency domain analysis method was used to generate the optimized pulse pattern control and a four-phase step-up converter was selected for prototype realisation. Since the depletion mode behaviour of the JFET requires additional effort regarding the safe system operation and start-up, known approaches were reviewed and a gate driver with high-speed high-voltage redundant flyback power supply is derived and developed. Variants of this gate driver enabled a detailed analysis of the switching transients of the silicon carbide JFET half bridge and later a safe operation of the system prototype. A purpose-developed Rogowski coil with offline integration is introduced for the measurement

rakterisiert und ins Labormuster integriert. Durch die temperaturabhängige Spannung der Gatediode des Sperrschicht-Transistors konnte die thermische Impedanz dieses Kühlsystems gemessen werden. Um bei hohen Schaltfrequenzen und Umgebungstemperaturen einen volumenreduzierten Zwischenkreis aufzubauen, wurden Keramikkondensatoren mit anti-ferroelektrischem Keramik-Dielektrikum verwendet. Aktuelle gekoppelte Methoden zur analytisch-numerischen Verlustberechnung in magnetischen Bauelementen werden bei der Dimensionierung der Drossel angewendet und ermöglichen ein kompaktes Design. Die a priori modellbasiert ermittelten Güteparameter sind mit dem erfolgreichen Betrieb des aufgebauten Wandlersystems und daraus gewonnenen Messdaten abschließend belegt. Zentrale Beiträge dieser Arbeit sind neben der Überprüfung der entwickelten Ansätze zur Technologiebewertung auch die Konzepte zur Volumenreduktion sowie die entwickelten Messmethoden.

of the current transients in the low-inductive commutation cell. A known direct cooling concept was adapted and finally integrated into the laboratory system to cool the substrates of the provided baseplateless silicon carbide half bridge modules. Beforehand integration, the thermal impedance of a single module was successfully characterized by detecting the temperature-sensitive gate source diode of the JFET. To utilize the capacitor volume reduction effect of high switching frequencies at high environmental temperatures, a ceramic capacitor with anti-ferroelectric dielectric was selected. For the inductors, actual methods of combined analytic numeric loss calculation were applied for the dimensioning to enable a compact component. By successfully operating and characterizing the laboratory prototype, a verification of the model-based a priori defined figures of merit could be achieved. Major contributions of this work are the developed technology assessment methods as well as concepts for volume reduction and measurement methods.

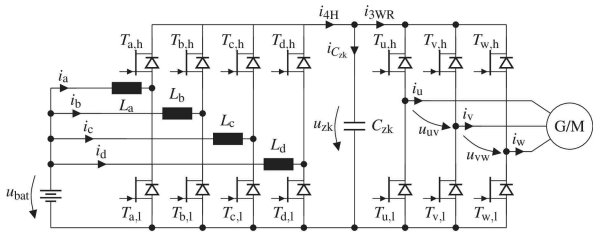


Fig. 0.78: Vierphasiger Hochsetzsteller mit dreiphasiger Wechselrichtertopologie
Four-phase step-up converter with three-phase inverter topology

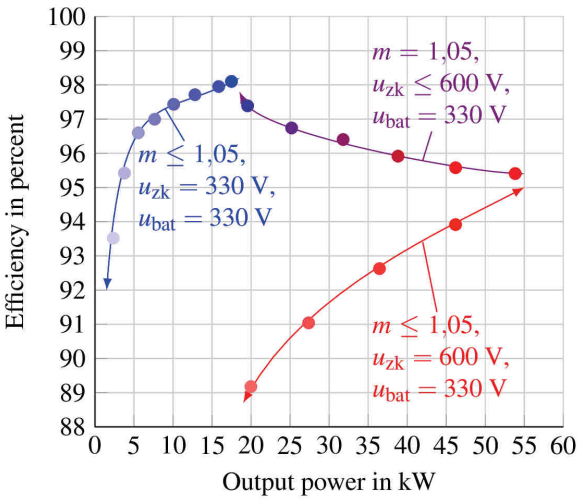


Fig. 0.79: Gemessener Wirkungsgrad bei Verwendung von SiC-Halbleitern bei 50 kHz Schaltfrequenz
Measured SiC system efficiency at 50 kHz switching frequency

Betriebsverhalten von Synchronmaschinen mit unsymmetrischer Ständerwicklung

von Dr.-Ing. Onur Misir

Bei großen elektrischen Maschinen treten Wicklungsfehler in der Ständerwicklung häufig nur in einer oder zwei benachbarten Spulen auf. In diesem Fall ist die Frage naheliegend, ob die Maschine nicht über einen begrenzten Zeitraum weiter betrieben werden darf, wenn die Hin- und die Rückleiter der beschädigten Spulen von dem restlichen, unbeschädigten Wicklungsverband abgetrennt werden. Da dies zu einer unsymmetrischen Stromverteilung in den Zweigen und Strängen (Fig. 0.80) der Ständerwicklung führt, ist im Hinblick auf die Stromwärmeverluste in den einzelnen Zweigen sowie die thermische Beanspruchung in der Ständerwicklung die Kenntnis der geänderten Stromverteilung erforderlich. In der vorliegenden Arbeit wird ein analytisches Verfahren vorgestellt, das eine hinreichend genaue Vorausberechnung der stationären Stromverteilung von elektrisch erregten Synchronmaschinen sowohl im fehlerfreien Betrieb als auch beim Auftreten von Ständerwicklungsfehlern in Form von fehlenden Spulen ermöglicht. Das Differentialgleichungssystem der elektrisch erregten Synchronmaschine wird auf Basis der Spannungsgleichung einer einzelnen Ständerspule (Fig. 0.81) aufgestellt. Dadurch ist es möglich, beschädigte Spulen im Berechnungskalkül zu berücksichtigen. Die Induktivitäten des Gleichungssystems werden mit einem der Drehfeldtheorie zuzuordnenden Ansatz für die Felderregerkurven und den Luftspaltleitwert bestimmt. Dabei wird eine besondere Beachtung der Luftspaltleitwertfunktion von Schenkelpolläufern geschenkt. Zur Bestimmung der Stromverteilung wird das Differentialgleichungssystem mit Hilfe geeigneter Schaltungsmatrizen in Zweiggröß en zusammengefasst und anschließend unter Anwendung des Maschenstromverfahrens gelöst. Die Lösung des Differentialgleichungssystems erfolgt durch numerische Integration, was aufgrund der zeitabhängigen Systemmatrix, bedingt durch die zeitabhängigen Induktivitäten, eine hohe Rechenzeit beansprucht. Zur Reduzierung der Rechenzeit wird alternativ ein analytischer Lösungsansatz vorgestellt, bei dem das Differentialgleichungssystem in ein algebra-isches Gleichungssystem überführt wird. Die Stromverteilung wird dann durch Anwendung des Gauß-Verfahrens bestimmt. Der Vergleich umfangreicher Messungen an einer Versuchsmaschine, die das Freischalten beliebiger Ständerspulen ermöglicht, bestätigt die rechnerisch

Performance of Synchronous Machines with Unsymmetrical Stator Winding

by Dr.-Ing. Onur Misir

Stator winding failures in large electrical machines often occur just in one coil or in two adjacent coils. If stator winding failure occurs, there is a solution to allow the safe continued operation of the machine: a temporary repair can be made by cutting out and bypassing the failed coils. This quick repair will bring the machine back into service. The resulting unsymmetrical current distribution in the stator winding (Fig. 0.80) tends to produce overheating to parts of the winding at full load. In order to determine the maximal load, under which the unsymmetrical machine may operate without exceeding the permissible temperature limit, the unsymmetrical current distribution needs to be determined. This thesis presents an analytical method to predict the unsymmetrical current distribution of electrically excited synchronous machines in case of missing stator coils. Based on the voltage equation of a single stator coil, the differential equation group of the electrically excited synchronous machine (Fig. 0.81) is determined. This approach takes into consideration the missing stator coils. The inductances of the system of equations are determined by using an analytical approach for the magnetomotive force and the air gap permeance based on the rotating field theory. In this case, special attention goes to the air gap permeance function of salient pole synchronous machines. In order to calculate the current distribution, firstly, the differential equation group is transformed into branch values by using suitable connection matrices. Secondly, the multi-loop method is applied, and finally, the differential equation group is solved by using a numerical integration method which results in a high calculation time due to time-dependent inductances. In order to reduce the calculation time, an analytical solution method is also presented as an alternative. The main advantage of this method is that the system of differential equations is reduced to a system of algebraic equations which can be solved by using the Gaussian elimination method. Comparisons with measurement results of a test motor, which allows separating certain coils from the whole stator winding, confirm the calculated results.

gewonnenen Ergebnisse.

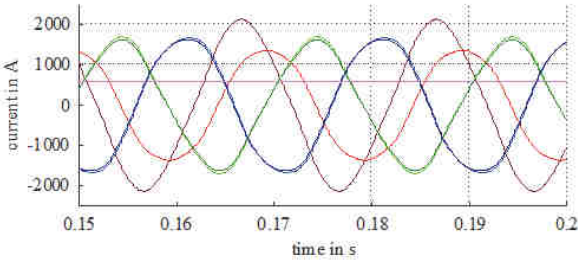


Fig. 0.80: Stromverteilung einer elektrisch erregten Synchronmaschine mit einer defekten Ständerspule
Current distribution of an electrically excited synchronous machine considering a missing stator coil

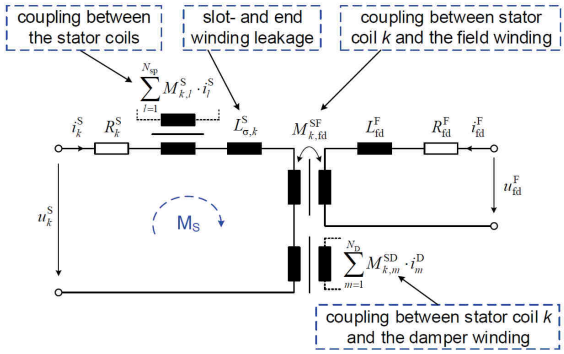


Fig. 0.81: Ersatzschaltbild einer Ständerspule k mit den zugehörigen magnetischen Kopplungen
Equivalent circuit diagram of a single stator coil

Modulare und skalierbare mehrsträngige Antriebssysteme für Elektrofahrzeuge

von Dr.-Ing. Felix Müller-Deile

Die Herstellungskosten von batterieelektrischen Fahrzeugen sind bis heute im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor sehr hoch. Konventionelle Fahrzeuge basiere nauf Baukastensystemen, die zu einer Stückzahlerhöhung auf Komponentenbasis und damit zu einer Kostenreduktion führen. Für batterieelektrische Fahrzeuge ist zurzeit kein vergleichbares Konzept verfügbar. In dieser Arbeit werden modulare, skalierbare mehrsträngige Antriebssysteme für Elektrofahrzeuge vorgestellt, welche für unterschiedliche Fahrzeugklassen eingesetzt werden können. Für das modulare Konzept werden Induktionsmaschinen (IM) und permanentmagneterregte Synchronmaschinen (PMSM) verwendet.

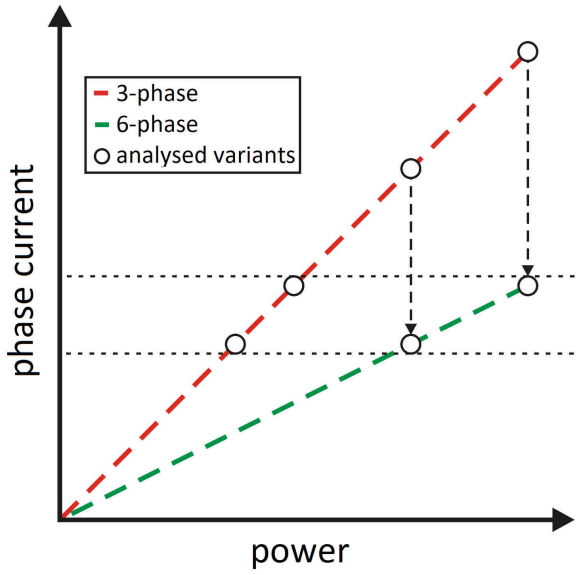


Fig. 0.82: Strangzahl-Skalierungskonzept
Modular scalable multiphase concept

Ziel ist es, eine Leistungsskalierung zu ermöglichen, bei der der Strangstrom annähernd konstant bleibt, um eine Verwendung identischer Halbleitermodule für die unterschiedlichen Antriebssysteme zu ermöglichen. Dies wird durch eine Längen- und Strangzahlskalierung der E-Maschine erreicht. Dazu werden die Vor- und Nachteile mehrsträngiger E-Maschinen analysiert, um die für das Konzept geeigneten Strangzahlen zu ermitteln. Hierbei wird speziell die Entstehung von Stromoberschwingungen in mehrsträngigen Wicklungen untersucht und ein Verfahren erarbeitet, welches eine Kompensation der Oberschwingungsströme ermöglicht. Dabei stellt sich heraus, dass für das Konzept drei- und

Modular Scalable Multiphase Drive Systems for Electric Vehicles

by Dr.-Ing. Felix Müller-Deile

The production cost of battery-electric vehicles is still very high compared to conventional vehicles with internal combustion engines. Conventional vehicles are based on modular systems that lead to unit increase of their components and to cost reduction. A similar concept for battery-powered vehicles is currently not available. In this thesis, modular scalable multiphase drive systems for electric vehicles are developed which can be used for different vehicle classes. For this modular concept, induction machines (IM) and permanent magnet synchronous machines (PMSM) are used. The aim is to enable a power scaling in which the phase current remains approximately constant in order to use identical semiconductor modules for different drive systems and power ratings. This is achieved by scaling the length and the number of phases of the electric machine. Thus, the advantages and disadvantages of multiphase electric machines are analyzed in order to determine the appropriate phase numbers for this concept. In particular, current harmonics in multiphase windings are investigated and a method to compensate these current harmonics is developed. Three-phase and six-phase drive systems proved to be best suited for this concept. Therefore, the power losses of inverter-fed multiphase IM and PMSM are examined in detail. The fundamental losses of six-phase machines are lower than those of three-phase machines due to the higher winding factor. On the other hand, harmonic losses of six-phase machines due to the inverter supply are higher than those of three-phase machines. The efficiency values of the machines (IM and PMSM) are analyzed for three-phase and six-phase windings. Component models of the car, the electric machine, the inverter and the battery are developed in this thesis and are used to simulate the energy efficiency of the drive system. In addition, thermal models of the electric machines are developed and the thermal behaviour in driving cycles is examined. Measurements on two prototypes (IM and PMSM) were made in order to validate the component models. Based on cost models and vehicle simulations, the modular scalable multiphase concept has cost advantages over non-modular concepts. The dimensions of modular drive systems are minimally larger compared to non-modular systems. However, the energy efficiency of both systems is almost the same.

sechssträngige Antriebssysteme am besten geeignet sind. Aus diesem Grund werden die Verluste bei Wechselrichterspeisung in diesen Maschinentypen detailliert untersucht. Die Grundschwingungsverluste der sechs-strängigen E-Maschinen sind aufgrund des höheren Hauptwellenwicklungsfaktors geringer als die der dreisträngigen Varianten. Die durch die Wechselrichterspeisung entstehenden Oberschwingungsverluste sind dagegen in den sechssträngigen E-Maschinen höher als in den dreisträngigen Varianten. Es werden die Wirkungsgradunterschiede der beiden Maschinentypen (IM und PMSM) in drei- und in sechssträngiger Ausführung analysiert. Mithilfe der erarbeiteten Teilmodelle für Fahrzeug, E-Maschine, Wechselrichter und Batterie wird eine Fahrzeugsimulation durchgeführt und der Energiebedarf des Antriebssystems bestimmt. Zusätzlich werden thermische Modelle der E-Maschinen erarbeitet, mit denen das thermische Verhalten im Fahrzyklus berechnet werden kann. Durch zahlreiche Messungen an zwei Prototypen (IM und PMSM) konnten die Komponentenmodelle validiert werden. Anhand der erarbeiteten Kostenmodelle und der Fahrzeugsimulationen wird gezeigt, dass das modulare, skalierbare mehrsträngige Konzept Kostenvorteile gegenüber nicht modularer Bauweisen hat. Das Bauvolumen der modularen Antriebssysteme ist minimal größer als das der nicht modularen Systeme. Die Energieeffizienz beider Systeme ist annähernd gleich.

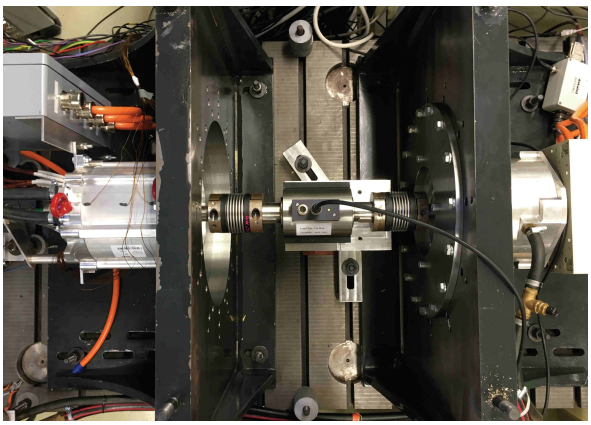


Fig. 0.83: Foto des Prüfstands
Picture of the test bench

Erweiterung von analytischen Verfahren zur Berechnung von Ummagnetisierungsverlusten in Drehfeldmaschinen

von Dr.-Ing. Sebastian Tegeler

Moderne hochausgenutzte Antriebe stellen teilweise eine Herausforderung für die analytischen Berechnungsverfahren dar. Im Rahmen dieser Arbeit werden neue analytische Ansätze entwickelt, die die physikalischen Eigenschaften der Maschine detaillierter berücksichtigen und somit die Berechnungsgenauigkeit verbessern. Der Fokus der Arbeit liegt dabei auf einer verbesserten Berechnung des magnetischen Kreises. Dazu werden neue Gleichungen zur Berechnung der magnetischen Flussdichten sowie der magnetischen Spannungsabfälle erarbeitet und zwar sowohl für Abschnitte des Magnetkreises mit veränderlicher Querschnittsfläche, wie die Zähne, als auch für Abschnitte mit veränderlichem Fluss, wie die Jochgebiete (Fig. 0.84).
Für den Bereich der Zahngeometrie wird ebenfalls eine Beeinflussung durch den Stanz- oder Schneidprozess berücksichtigt (Fig. 0.85). Darüber hinaus wird der Einfluss der Schrägung auf den Sättigungszustand der elektrischen Maschine betrachtet und in dem Berechnungsgang mit einbezogen. Die neu entwickelten analytischen Berechnungsmethoden werden abschließend mit FEM-Berechnungen sowie Messdaten von sechs verschiedenen Induktionsmaschinen mit unterschiedlichen Leistungen und Polpaarzahlen verglichen. Die Ergebnisse der vorgestellten Erweiterungen zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den Berechnungen der numerischen FE-Methode. Die gegenüber den Berechnungsergebnissen verbleibenden Abweichungen zu den Messdaten werden innerhalb dieser Arbeit ebenfalls ausführlich diskutiert.

Enhancement of analytical calculation techniques for reversal magnetic losses in rotating field machines

by Dr.-Ing. Sebastian Tegeler

Modern high efficiency drives are still a challenging task for analytical calculation techniques. Within this thesis, new approaches are developed that consider detailed physical characteristics, thus achieving more sophisticated calculation performance. The focus of this thesis is on improved calculation methods of the magnetic circuit. Therefore, new methods for flux density and magnetic voltage calculation are developed for sections of the magnetic circuit with a variable cross-sectional area, like the teeth (Fig. 0.85), as well as for sections with a variable flux density, like the yoke (Fig. 0.84). In addition, the influence of skewing on the saturation behaviour of the electrical machine is considered in the new calculation method. These new approaches are compared both with FEA calculations and with measured data from six electrical machines, which differ in number of pole pairs and power, in the closing of this thesis. The results of the introduced extensions are in accordance with numerical FE analysis. Compared with the measured data, the remaining deviations to both calculation methods are discussed at full length within this thesis.

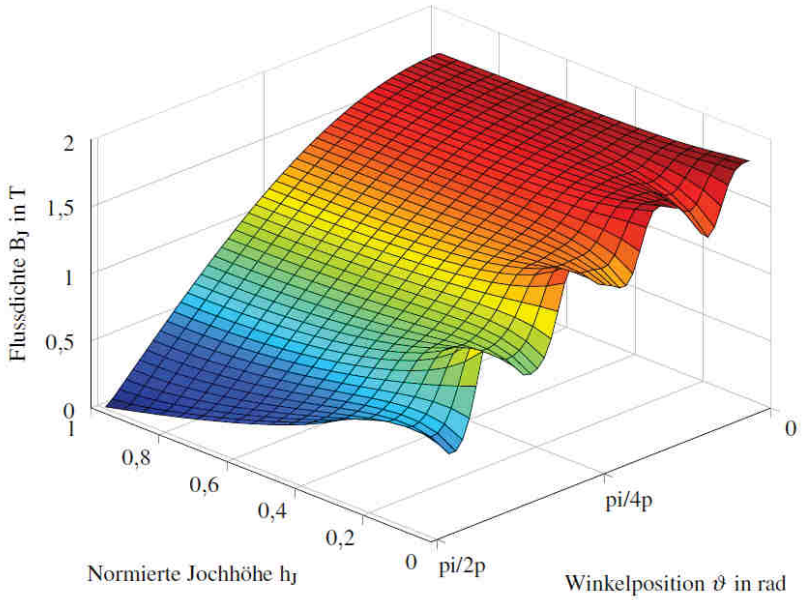


Figure 0.84: Analytisch berechnete Flussdichteverteilung im Statorjoch
Analytically calculated flux density in the stator yoke

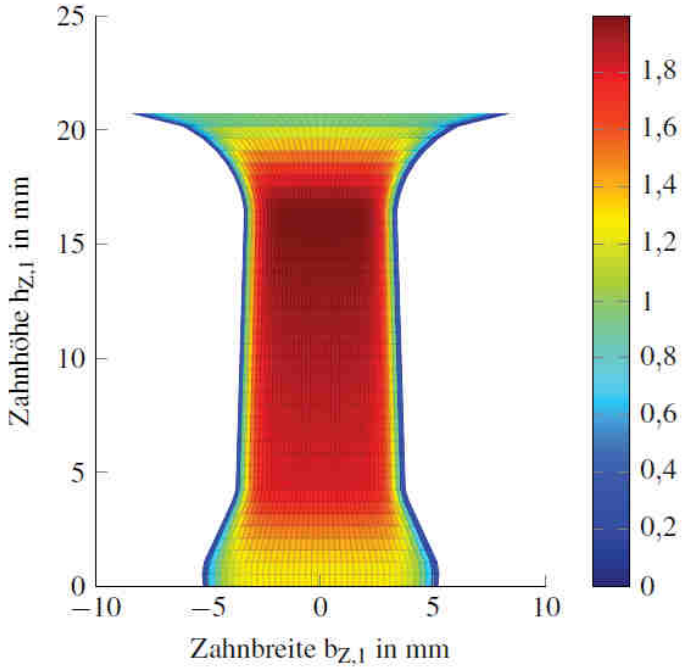


Fig. 0.85: Analytisch berechnete Flussdichteverteilung im Statorzahn
Analytically calculated flux density in the stator teeth

Systemanalysen zur elektrischen Belastung von Wälzlagern bei umrichtergespeisten Motoren

von Dr.-Ing. Hans Tischmacher

Bei umrichtergespeisten und somit drehzahlveränderbar betriebenen Elektromotoren treten einige parasitäre, hochfrequente Randeffekte auf. Vor allem bei den in der Mehrzahl zum Einsatz kommenden Spannungszwischenkreisumrichtern sind dies Erscheinungen, die in der prinzipiellen Funktionsweise dieser Umrichter begründet sind. In Abhängigkeit von den Bedingungen im Gesamtsystem können einerseits hochfrequente Ströme über die Wälzlager der Motoren und der beteiligten Anlagenkomponenten fließen und anderseits der durch Common-Mode-Spannungen verursachte parasitäre Spannungsabfall an den Motorlagern bei Überschreitung der Durchbruchfeldstärke im Schmierspalt sogenannte EDM-Lichtbogenentladungen verursachen. Als Reaktion treten in beiden Fällen Materialveränderungen an den Laufflächen der Lager auf, die sich in Form einer Querriffelung ausprägen können und damit einen vorzeitigen, unvorhersehbaren Ausfall des Lagers zur Folge haben. Während sich die schädigenden Auswirkungen der hochfrequenten Ströme durch geeignete Maßnahmen deutlich reduzieren lassen, sind die als EDM-Strom bezeichneten, spannungsbedingten Lichtbogenentladungen im Lagerschmierspalt nur schwer zu begrenzen. In der vorliegenden Arbeit werden die Wirkmechanismen und Systemabhängigkeiten zur Entstehung von EDM-Lichtbogenentladungen in den Schmierspalten der Motorlager beschrieben und Möglichkeiten angegeben, schädigende Auswirkungen zu klassifizieren und durch Vermeidung von kritischen Betriebszuständen innerhalb des Antriebssystems zu reduzieren. Nach einer mit Literaturstellen belegten Aufarbeitung des Stands der Technik und der Abgrenzung der EDM-Lagerströme zu den Lagerstromarten mit anderen Entstehungsmechanismen erfolgt eine Beschreibung der Quelle dieser parasitären Auswirkung, dem Umrichter. Die Entstehung der Common-Mode-Spannung in Abhängigkeit von der Wechselrichtertopologie sowie der zeitliche Verlauf, der im Wesentlichen durch die Amplituden der jeweiligen Spannungsstufen, die Steilheit der Spannungsänderungen und die Schaltfrequenz beschrieben wird, sind integraler Bestandteil der Quellenbeschreibung. Zur Beschreibung der Störsenke dem Motor ist es notwendig, einen detaillierten Blick auf die im hochfrequenten Bereich relevanten Größen innerhalb des Antriebsmotors zu werfen, welche die Ausprägung von Lagerströmen

System Analyses for the Electrical Load on Rolling Bearings of Converter-Fed Electric Motors

by Dr.-Ing. Hans Tischmacher

Several parasitic, high-frequency phenomena occur when electric motors are fed from frequency converters in variable speed applications. Voltage-source DC link converters are predominantly used, and their inherent principle of operation causes these phenomena. Depending on the prevailing conditions in the overall system, high-frequency currents can flow through the motorsť roller bearings and the plant or system components involved. Furthermore, a parasitic voltage drop across the motor bearings can occur as a result of the common mode voltage and when the breakdown field strength of the oil film in the bearing is exceeded, this can cause an EDM arc discharge. In both cases, these phenomena result in material changes at the bearing raceways. This is manifested in the form of bearing fluting damage and can result in premature and unpredictable bearing failure. The damaging effects of these high-frequency currents can be significantly reduced by applying suitable measures. However, the voltage-related arcing on discharge in the bearing lubrication film, resulting from the EDM current, is difficult to limit. This paper describes the underlying mechanisms and system interdependencies related to EDM arc discharge phenomena in motor bearing lubrication films. It outlines how to classify these damaging effects and how to reduce them, considering the operating processes. After defining state-of-the-art technology based on the appropriate references and defining EDM bearing currents with respect to other bearing current types with different underlying causes, the root cause of these parasitic phenomena is described, which is the converter itself. The source of these EDM currents is explained, including a description of how the common mode voltage occurs as a function of the inverter topology and its characteristics with respect to time, which are essentially defined by the amplitude of the voltage steps, the gradient of the voltage changes and the switching frequency. When describing the motor as a disturbance sink, it is important to analyze the motor parameters in detail which are relevant in the high frequency domain and which influence and define the bearing current types. In addition to the roller bearings themselves, it is especially the geometrical motor design that plays a decisive role. The effects of parasitic electric stress are visible at the motor roller bearings. These effects must be described and classified to address the issues

beeinflussen. Neben den Wälzlagern spielt hier vor allem der geometrische Aufbau des Motors eine entscheidende Rolle. An den Wälzlagern der Motoren werden die Auswirkungen der parasitären elektrischen Belastungen sichtbar. Entsprechend der zentralen Fragestellung dieser Arbeit ist es dafür notwendig, diese Auswirkungen beschreiben und klassifizieren zu können, um daraus geeignete und im Rahmen des Arbeitsprozesses mögliche Maßnahmen zur Reduktion der Belastung abzuleiten. Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Modellsystematik entwickelt, welche diese Beschreibung ermöglicht.

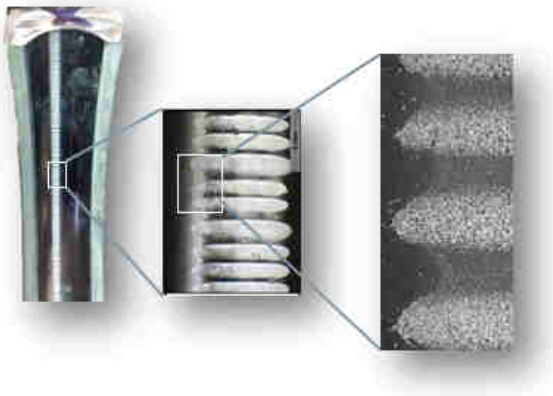


Fig. 0.86: Lauffläche eines Motorlagers mit typischer Querriffelung
Typical fluted motor bearing race

outlined at the outset of this paper, so that suitable measures to reduce this electric stress can be derived. As a part of this paper and the underlying work, a model is developed, which facilitates this description.

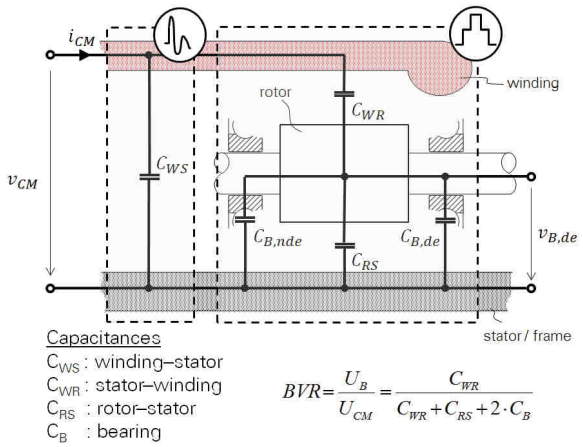


Fig. 0.87: HF-Ersatzschaltbild eines Motors
HF equivalent circuit diagram of a motor

Positionsgeberlose Regelung von permanentmagneterregten Synchronmaschinen bei kleinen Drehzahlen mit überabtastender Stromerfassung

von Dr.-Ing. Bastian Weber

Die positionsgeberlose Regelung ermöglicht einen zweiten unabhängigen Signalweg ohne mechanischen Drehgeber, sodass für Antriebssysteme eine Redundanz der Rotorlageerfassung erreicht werden kann. Bei Verwendung von beiden Signalwegen kann somit die Robustheit deutlich gesteigert werden, was vor allem für sicherheitskritische Anwendungen von Bedeutung ist. Bei Verzicht auf den mechanischen Drehgeber kann das Antriebssystem zudem kompakter gebaut werden und es sind Kostenvorteile möglich. Für die Rotorlageschätzung der PMSM können grundsätzlich zwei unterschiedliche physikalische Prinzipien verwendet werden. Im Bereich höherer Drehzahlen kann die Gegenspannung der Maschine auf Grund der Rotation der Permanentmagnete ausgewertet werden. Diese Gegenspannung ist proportional zur Drehzahl, sodass eine untere Drehzahlgrenze besteht. Im Bereich kleiner Drehzahlen bzw. bei Drehzahl Null konzentriert sich die Rotorlageschätzung daher auf eine Abhängigkeit der Induktivitätsmatrix der Maschine von der Rotorlage, welche ausgewertet werden kann, solange die zeitliche Änderung der Strangströme groß genug ist. Allerdings ist die erreichbare Dynamik dieser anisotropiebasierten Rotorlageschätzung und der resultierenden Drehzahlregelung bisher nicht mit den Regeleigenschaften eines geberbehafteten Antriebssystems vergleichbar. Um die Performanz bzw. Dynamik der geberlosen Regelung bei kleinen Drehzahlen deutlich zu steigern, wurde in dieser Arbeit eine Überabtastung der Stromerfassung untersucht, da eine derart hochdynamische Erfassung der Strangströme die Regeleigenschaften der geberlosen Regelung wesentlich beeinflusst. Im Gegensatz zu der weit verbreiteten auf einem digitalen Signalprozessor (DSP) basierenden mittensynchronen Stromerfassung, bei der zu Beginn und in der Mitte einer Periode der Pulsdauermodulation (engl. pulse width modulation, PWM) eine Stromerfassung erfolgt, findet diese bei der Überabtastung weitaus häufiger statt. Diese werden mit einem Field-Programmable Gate Array (FPGA) verarbeitet. Die Struktur des resultierenden Antriebssystems ist in Fig. 0.88 dargestellt.

Eine Veranschaulichung der Überabtastung gegenüber der mittensynchronen Stromerfassung ist in Fig. 0.89 gezeigt. Auf Grundlage der Überabtastung wird in dieser Arbeit ein neuartiges hochdyna-

Self-Sensing Control for Permanent Magnet Synchronous Machines in the Lower Speed Range Using Current Oversampling

by Dr.-Ing. Bastian Weber

Self-sensing control offers a second additional signal without a mechanical encoder to create a redundant rotor position information for electrical drive systems. By using both signalling pathways, the robustness can be enhanced, which is especially important for applications that rely on a functional safety. Avoiding a mechanical encoder leads to a more compact drive system and enables advantages in terms of cost. For rotor position estimation of a PMSM, two general different physical principles can be evaluated. In the higher speed range, the machine's back- electromotive force (back EMF) can be processed. This back EMF is proportional to the rotor speed, which causes a low speed limit for the related estimation. In the lower speed range including speed zero, rotor position estimation concentrates on a dependency of the machine's inductance matrix on the rotor position, which can be sensed given that the derivative of the phase currents over time is sufficient. However, the achievable dynamics of this anisotropy-based rotor position estimation and the resulting speed control are not yet comparable to the control properties of an encoder-operated drive system. To increase performance as well as dynamics of anisotropy-based self-sensing control, this thesis focusses on current oversampling. In contrast to pulse width modulation (PWM)-centered current sampling, handled by a digital signal processor (DSP), this approach uses a field-programmable gate array (FPGA) to operate an analog-to-digital converter (ADC) at a higher conversion frequency. Numerous current-time pairs are processed within a PWM period. The structure of the resulting drive system is shown in Fig. 0.88. An illustration of oversampling in contrast to PWM-centered sampling is displayed in Fig. 0.89. Based on current oversampling, this thesis introduces a novel method for rotor position estimation. Oversampling is further evaluated to compensate for voltage errors due to inverter nonlinearity effects with a high dynamic. A novel approach is introduced to initially identify the machine inductances in relation to their current dependency. As shown in this thesis by simulation and experimental results, all contributions lead to an increase in the performance of self-sensing control. It is shown that the novel method of rotor position estimation using oversampling enables a resulting speed control with a dynamic that is very close to an

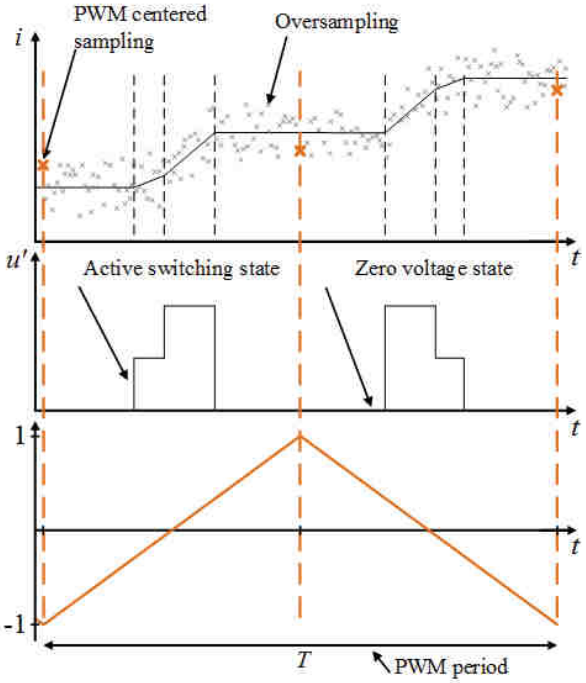


Fig. 0.88: Antriebssystem mit Überabtastung der Stromerfassung
Drive system with oversampled current sensing

misches Verfahren zur Rotorlageschätzung vorgestellt. Zudem wird die Überabtastung genutzt, um den Spannungsfehler, welcher aus den nichtlinearen Übertragungseigenschaften des Pulswechselrichters entsteht, hochdynamisch zu kompensieren. Zudem wird ein neuartiger Ansatz aufgezeigt, um mit Hilfe der Überabtastung die Maschineninduktivitäten in Bezug auf ihre Stromabhängigkeit initial zu vermessen. Wie in dieser Arbeit durch Simulation und experimentelle Ergebnisse gezeigt wird, führen alle Beiträge dazu, dass die Performanz der geberlosen Regelung deutlich gesteigert wird. Dabei wird gezeigt, dass das neuartige Verfahren zur Rotorlageschätzung auf Basis der Überabtastung eine resultierende Drehzahlregelung ermöglicht, dessen Dynamik einer geberbehafteten Regelung sehr nahekommt.

encoder-based speed control.

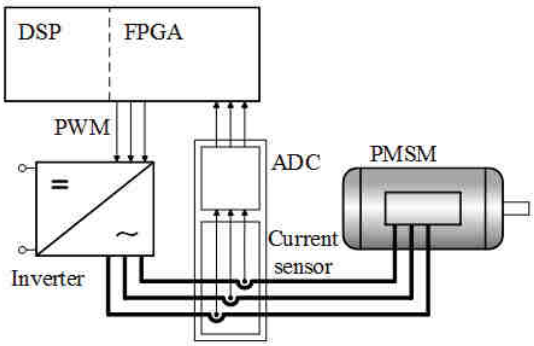


Fig. 0.89: Mittensynchrone Stromerfassung und Überabtastung
PWM-centered current sensing and oversampling

Berührungslose Übertrager für elektrisch erregte Synchronmaschinen

von Dr.-Ing. Niklas Weber

Zur Übertragung des Erregerstroms auf den Rotor einer elektrisch erregten Synchronmaschine werden üblicherweise entweder Schleifringe und Bürsten oder Erregermaschinen eingesetzt. Bei Schleifringsystemen, die einen mechanischen Kontakt zwischen dem stehenden und dem rotierenden Teil der elektrischen Maschine herstellen, handelt es sich um verschleißbehaftete Komponenten, die eine begrenzte Lebensdauer aufweisen. Zudem sind sie anfällig für äußere Einflüsse und benötigen, anders als permanentmagneterregte Synchronmaschinen und Induktionsmaschinen, zusätzlichen Platz. Erregermaschinen sind elektrische Hilfsmaschinen, die eine elektrische Leistung an die Erregerwicklung der Hauptmaschine zum überwiegenden Teil durch die Umwandlung mechanischer in elektrische Leistung abgeben. Der Einsatz von Erregermaschinen ist vor allem bei Großmaschinen mit mittleren bis zu hohen Drehzahlen vorteilhaft. Von Nachteil ist, dass die Erregermaschine die Dynamik bei der Erregung der Hauptmaschine negativ beeinflusst. In dieser Arbeit werden neuartige Übertragerkonzepte auf Basis von Ringtransformatoren zur Anwendung in Großmaschinen und Fahrzeugantrieben vorgestellt, deren Kerne aus Elektroblech (siehe Fig. 0.91), aus SMC (Soft Magnetic Composite) oder aus Ferrit bestehen. Der Fokus liegt auf dem Erreichen eines hohen Wirkungsgrads und auf der platzsparenden Integration in das Antriebssystem (siehe Fig. 0.90). Im Mittelpunkt der Arbeit steht eine Methodik zur Dimensionierung und zur Vorausberechnung derartiger Übertrager. Hiermit können das Übertragungsverhalten und die auftretenden Verluste im Kern, in der Wicklung und in der Leistungselektronik vorausberechnet werden. Dazu werden analytische Algorithmen genutzt, um eine geringe Rechenzeit zu ermöglichen. Finite-Elemente-Rechnungen dienen zum Abgleich der analytisch gewonnenen Ergebnisse.
Ein Vergleich mit Messungen an Demonstratoren mit unterschiedlichen Kernen bestätigt die Methodik zur Vorausberechnung der Übertrager. Beispiele zu unterschiedlichen Anwendungsbereichen zeigen das Potenzial der neuartigen Konzepte für den Einsatz in elektrischen Fahrantrieben und in Großmaschinen als Alternative zu herkömmlichen Erregermaschinen auf. Es wird dargelegt, dass ein Übertrager nur etwa ein Viertel des Platzbedarfs einer vergleichbaren Erregermaschine aufweist und der Wirkungsgrad des Übertragers über 97% beträgt.

Rotating Transformer for Electrically Excited Synchronous Machines

by Dr.-Ing. Niklas Weber

In order to transmit the field current of electrically excited synchronous machines to the rotor, slip rings or exciter machines are commonly used. Slip rings provide a tribological contact between the static and the rotating part of the electric machine. Their disadvantages are a limited lifetime and an increased susceptibility to external influences. Furthermore, they usually have to be installed outside the machine's housing, so that additional installation space is required. Alternatively, exciter machines can be used in large machines with medium or high rotational speed. Exciter machines are electrical auxiliary devices that generate the field current of the main machine by converting mechanical into electrical power. One disadvantage is their negative impact on the dynamics when exciting the main machine. This thesis presents new concepts of rotating transformers with laminated steel (Fig. 0.91), SMC (soft magnetic composite) and ferrite cores that can be applied in large synchronous motors and generators or electric vehicle propulsion systems. The focus is clearly on achieving a high efficiency coupled with minimum space requirements (Fig. 0.90).

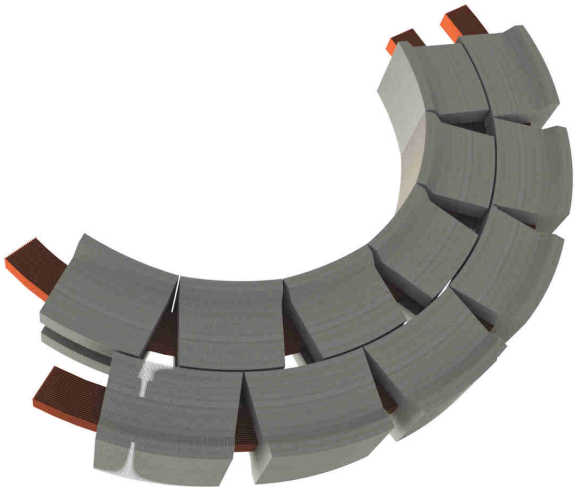


Fig. 0.91: Übertrager mit Elektroblechkern
Rotating transformer with laminated steel

The main achievement of this thesis is the development of a method for the dimensioning and the calculation of rotating transformers in order to predict the transmission behaviour and the power losses in the core, the winding and the power electronics. For this purpose, analytical algorithms are pro-

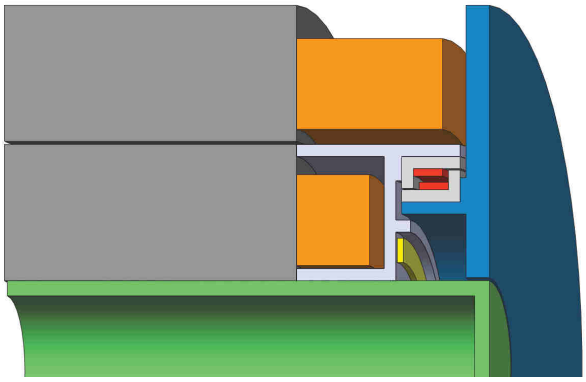


Fig. 0.90: Konzept zur Integration eines Übertragers im Antrieb
Concept of an integrated rotating transformer

posed in order to reach a short calculation time. To validate the analytical results, finite-element calculations have been used. A comparison with measurements on prototypes confirms the calculation method. Furthermore, different application concepts show the potential of the novel rotating transformers for use in drive trains of electric vehicles and in large motors or generators as an alternative to conventional excitation systems. It is shown that a rotating transformer has only about a quarter of the space requirement of a comparable exciter machine and the efficiency of the rotating transformer is above 97%.

Beitrag zur Zustandsüberwachung von IGBT-Modulen mit temperatursensitiven Parametern

von Dr.-Ing. Simon Weber

Der IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) hat in leistungselektronischen Systemen große Verbreitung. Leistungselektronische Systeme dienen zur Wandlung von elektrischer Energie für verschiedene Anwendungsfälle. Sie werden beispielsweise in Elektrofahrzeugen oder Windenergieanlagen eingesetzt. Besonders in Elektrofahrzeugen kann der spontane Ausfall des leistungselektronischen Umrichters einen sicherheitskritischen Fahrzustand darstellen. Mit einem Zustandsüberwachungssystem sollen daher Alterungseffekte in der Aufbau-Verbindungstechnik des Leistungshalbleiteraufbaus erkannt werden. In dieser Arbeit werden die klassischen Alterungsmechanismen Lotschicht- und Bonddrahtdegradation betrachtet. Es wird eine Messschaltung vorgestellt, die dazu in der Lage ist, an einem IGBT-Modul die Durchlassspannung und die Zeitdauer des Ausschaltvorgangs (Ausschaltzeit) zu messen. An einem geöffneten IGBT-Modul mit geschwärzter Oberfläche wird gleichzeitig die Oberflächentemperatur der IGBT-Chips betrachtet (vgl. Fig. 0.92).

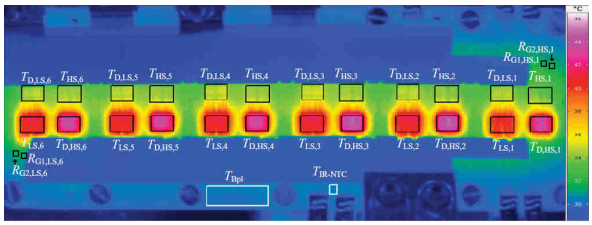


Fig. 0.92: Thermogramm eines geöffneten IGBT-Moduls
Thermogram of an opened IGBT module

Die Abhängigkeit der Durchlassspannung und der Ausschaltzeit von der virtuellen Sperrschichttemperatur des IGBTs werden im Rahmen dieser Arbeit betrachtet. Abschließend wird ein Verfahren vorgestellt, das es erlaubt, mittels einer kombinierten Auswertung von Durchlassspannung und Ausschaltzeit Veränderungen in der Bonddrahtverbindung zu erkennen. Dazu wird mittels der Ausschaltzeit t_{off} und weiterer Größen durch die Funktion f_{UCE} eine virtuelle Durchlassspannung $\hat{U}_{CE,on,e}$ vorhergesagt (vgl. Fig. 0.93).
Diese virtuelle Durchlassspannung $\hat{U}_{CE,on,e}$ wird mit der gemessenen Durchlassspannung $U_{CE,on,e}$ verglichen. Der Alterungsindikator $\delta_{UCE,e}$ gibt Hinweise auf Veränderungen in den Bonddrähten. Das Verfahren wurde experimentell validiert, indem an

Contribution to Condition Monitoring of IGBT Modules with Temperature Sensitive Parameters

by Dr.-Ing. Simon Weber

The IGBT has a widespread use in power electronic systems. Power electronic systems are used for energy conversion in different applications like electric vehicles or wind power plants. A sudden failure of the power converter especially in electric vehicles may cause a safety-critical driving condition. Therefore, a condition monitoring system shall detect ageing effects in the connection technology of the power semiconductor structure. In this work, the classical ageing mechanisms like solder layer and bond wire degradation are discussed. A measurement board is introduced which is able to measure the on-state voltage and the turn-off delay time of an IGBT module. In addition, an infrared camera measures meanwhile the surface temperature at an opened and blackened IGBT module (see Fig. 0.92). The dependency of on-state voltage and turn-off delay time on the virtual junction temperature of the IGBT is discussed within the scope of this work. Finally, a method is introduced which allows the detection of changes in the bond wire connection based on a combined evaluation of on-state voltage and turn-off delay time. Therefore, a virtual on-state voltage $\hat{U}_{CE,on,e}$ is predicted with the function f_{UCE} based on the turn-off delay time t_{off} and further parameters (see Fig. 0.93). This virtual on-state voltage is compared to the actual measured on-state voltage $U_{CE,on,e}$. The ageing indicator $\delta_{UCE,e}$ indicates a degradation in the bond wire connection. This method is experimentally validated by cutting the bond wires to simulate a degradation in the bond wire connection. The described method for ageing detection is also applicable to commercially available closed IGBT modules.

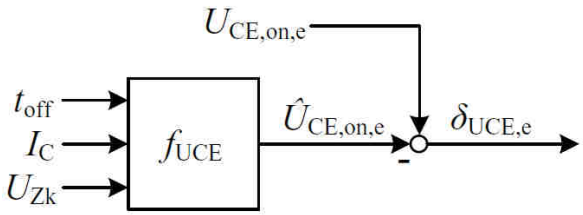


Fig. 0.93: Blockschaltbild zur Alterungsdetektion
Block diagram for ageing detection

einem geöffneten IGBT-Modul Bonddrähte durchtrennt wurden. Das beschriebene Verfahren zur Alterungsdetektion ist auch an einem kommerziell verfügbaren geschlossenen IGBT-Modul einsetzbar.

Spannungsbasierte Verfahren zur Bestimmung der Rotorlage in permanentmagneterregten Synchronmaschinen ohne Lagegeber

von Dr.-Ing. Timur Werner

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Ermittlung und Evaluation der Möglichkeiten zur ausschließlich spannungsbasierten Rotorlageerfassung bei permanentmagneterregten Synchronmaschinen im Drehzahlbereich unter 10 %nN und in der Bewertung der Lagebestimmungsgüte bei unterschiedlichen Lastzuständen. Des Weiteren werden dazu auch weiterführende Ansätze für Anregungs-, Aufbereitungs- und Auswertungsstrategien erarbeitet und kombiniert, um das spannungsbasierte Verfahren hinsichtlich Signalgüte, Messdynamik, Lastabhängigkeit und Störung der Antriebsregelung weiter zu optimieren. Die Besonderheit der angestellten Untersuchungen liegt in der zusätzlichen Randbedingung, dass für den genannten Zweck die Anwendung der Stromsensoren weitgehend vermieden werden soll (Fig. 0.94).

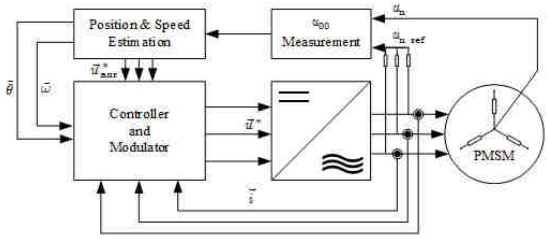


Fig. 0.94: Schaltbild der implementierten Lagebestimmung
Circuit diagram of the implemented position estimation

Aus der durchgeführten Evaluation und Gegenüberstellung geht hervor, dass dazu die Nutzung der Sternpunktspannung der Messung am offenen Strang oder der Erfassung von Spulenspannungen eines Stranges vorzuziehen ist, wenn die Reduktion des Implementierungsaufwandes und der Betrieb auch außerhalb der Blockstromtaktung eine stärkere Gewichtung unter den Entscheidungskriterien erfahren. Um den rotorlageabhängigen Anteil in der Sternpunktspannung besser erfassen zu können, erweist sich die Nutzung der Potentialdierenz zwischen der Sternpunktspannung des
Motors und einem symmetrischen künstlichen Sternpunkt als vorteilhaft. Die beschriebene Potentialdierenz wird als Nullspannung bezeichnet (Fig. 0.95). Anhand der angestellten Untersuchungen wird deutlich, dass der Einsatz der pulsförmigen In-

Voltage-based Rotor Position Estimation Methods for Permanent Magnet Synchronous Machines without Angle Sensor

by Dr.-Ing. Timur Werner

This work focuses on the investigation and evaluation of methods with solely voltage-based rotor position estimation in speed ranges below 10 %nN. Furthermore, the performance of the method during different load profiles is analysed. Therefore, additional signal injection, conditioning and evaluation strategies are developed and combined, in order to improve the voltage-based approach with regard to signal quality, measurement dynamics, load dependency and distortion of the powertrain control. The peculiarity of the investigations undertaken lies in the additional boundary condition that the application of the current sensors should be largely avoided for the stated purpose (Fig. 0.94).

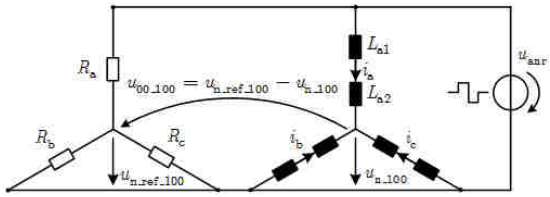


Fig. 0.95: Prinzip der Nullspannungsbestimmung
Principle of the zero-voltage estimation

The evaluation and comparison carried out show that the use of the neutral point voltage is preferable to the measurement on the open line or the detection of coil voltages of a line, if the reduction of the implementation effort and the operation beyond the square wave current mode are given a stronger weighting among the decision criteria. In order to be able to better detect the rotor-position-dependent component in the neutral-point voltage, the use of the potential difference between the neutral-point voltage of the motor and a symmetrical artificial neutral point proves to be advantageous. The potential difference described is referred to as zero voltage (Fig. 0.95). Based on the investigations carried out, it becomes clear that the use of the pulse-shaped injection offers the best relation between the evaluation effort and the usability of the signal thus generated, so that it can be considered as the only practicable solution among the analyzed excitation methods for zero-voltage-based methods. The comparison between the current-based and the zero-voltage-based sensorless approaches, which were carried out, shows that both have largely identical

jektion die beste Relation zwischen dem Auswertungsaufwand und der Verwendbarkeit des damit erzeugten Signals bietet, so dass sie als die einzig praktikable Lösung unter den analysierten Anregungsmethoden für nullspannungsbasierte Verfahren aufgefasst werden kann. Aus dem im Rahmen der Arbeit durchgeführten Vergleich zwischen den strom- und dem nullspannungsbasierten geberlosen Verfahren geht hervor, dass beide weitgehend identische Anforderungen an die Induktivitätsverhältnisse eines Motors aufweisen. Lediglich das Verhältnis der Schwankung zweiter Ordnung der Gegen- zu der Selbstinduktivität entscheidet darüber, ob der Motor eher für das strom- oder für das nullspannungsbasierte Verfahren geeignet ist. Dabei wird erkennbar, dass bei Verwendung des nullspannungsbasierten Ansatzes Motoren lagegeberlos betrieben werden können, die bisher weniger geeignet dafür erschienen. Die Validierung der erarbeiteten Lösungen erfolgt an einem Antriebssystem im Spannungszwischenkreisbereich von kleiner als 60 V und in einer Leistungsklasse von unter 10 kW, wobei eine Übertragung der vorgestellten Ansätze auch für Systeme mit höheren Spannungs- und Leistungsebenen denkbar ist. Die dabei abgeleiteten und gegenübergestellten Anforderungen an das Maschinendesign sowohl für strom- als als auch für spannungsbasierte Verfahren bieten neue Einblicke in die fundamentalen Gemeinsamkeiten und Unterschiede der beiden Klassen geberloser Lageerfassung.

requirements for the inductance ratios of a motor. Only the ratio of the second order variation of the mutual inductance to the second order variation of the self-inductance decides whether the motor is more suitable for the current or rather for the zero-voltage-based method. It can be seen that when using the zero-voltage-based approach, motors can be operated without a position sensor, which previously appeared to be less suitable for it. The developed solutions are validated on a drive system with a DC-link voltage range of less than 60 V and in a power class of less than 10 kW, whereby a transfer of the presented approaches is also conceivable for systems with higher voltage and power levels.

Doppelgeneratorsystem für Laufwasserkraftwerke

Untersuchung des dynamischen Verhaltens, der Regelung, des Energieertrags und der Wirtschaftlichkeit

von Dr.-Ing. Mingjia Zhang

Die Nutzung der Wasserkraft stellt in den letzten Jahrzehnten weltweit die größte erneuerbare Energiequelle dar. Hierbei leisten die Laufwasserkraftwerke einen bemerkenswerten Beitrag zur Stromerzeugung. Die gegenwärtigen Entwicklungen bei den Laufwasserkraftwerken richten sich auf einfach regulierte Francis-Turbinen mit einem drehzahlvariablen Generator aus. Ziel ist einerseits, den Turbinenwirkungsgrad durch eine veränderbare Drehzahl zu erhöhen und andererseits die Kosten durch Verzicht auf die Laufradregelung gegenüber doppelt regulierten Turbinen zu reduzieren. In dieser Arbeit wird ein neues drehzahlvariables Generatorsystem bzw. ein Doppelgeneratorsystem für Laufwasserkraftwerke untersucht. Das Generatorsystem besteht aus zwei elektrisch erregten Synchrongeneratoren, einem Überlagerungsgetriebe und einem Umrichter (Abb. 0.96). Eine der beiden Synchronmaschinen wird direkt mit dem starren Netz gekoppelt. Sie wird als Hauptgenerator betrieben, der den größten Teil (70%) der Gesamtleistung ins Netz überträgt. Die andere vom Umrichter gespeiste Synchronmaschine bzw. Regelmaschine muss nur einen kleinen Teil (30%) der Leistung bereitstellen. Sie sorgt für einen stabilen und drehzahlvariablen Betrieb für das Gesamtsystem durch ihre Regelung und Steuerung.

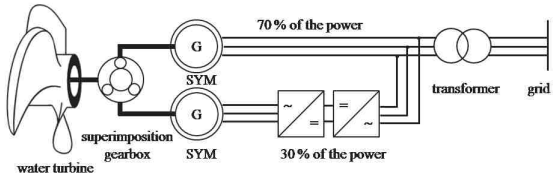


Fig. 0.96: Doppelgenerator mit Überlagerungsgetriebe und Umrichter
Double generator system with superimposition gearbox and inverter

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt in der mathematischen Modellierung und dynamischen Simulation des Doppelgenerators sowie in der Parametrierung des Drehzahlreglers der Regelmaschine. Zunächst werden die Gleichungen zur Beschreibung des dynamischen Verhaltens im Zustandsraum aufgestellt, dann werden sie um einen statio-

Double Generator System for Run-of-river Hydro-electric Power Plants

Determination of the dynamic behaviour, regulation, energy yield and economy

by Dr.-Ing. Mingjia Zhang

Hydropower has been the world's largest source of renewable energy over the past decades, where the run-of-river hydroelectricity has made a remarkable contribution to the hydroelectric generation. Recently, using a single-regulated francis turbine together with a variable speed generator has gained attention in the development of the run-of-river power plants. In this case, a high energy efficiency is achieved with the variable speed operation and the turbine costs are significantly reduced by omitting the adjustable blades. This thesis deals with an innovative design of a variable speed generator system developed for the run-of-river power plants. This system consists of two electrically excited synchronous generators, a superposition gearbox and an inverter (Fig. 0.96). One of the synchronous machines runs as main generator, which provides the major part (70%) of the total power into grid. The other machine is connected to the inverter. It takes the residual part (30%) of the power and cares for a stable operation by its speed control. This thesis focuses on the mathematic modelling and dynamic simulation of the generator system, as well as the parameterization for a speed controller of the inverter-fed machine. Firstly, the differential equations to describe the dynamic behaviour are obtained, followed by a linearizion of the equations around a stationary working point. Then the parameters of the speed controller are optimized for a stable operation. The simulations using these parameters show that the system is robust against external interferences, e.g. oscillations induced by frequency variation of the power grid. Furthermore, a simplified hydraulic system is simulated in order to check the working ability of the double generator system under variation of water flow by shifting the guiding apparatus of the turbine. A suitable speed control of the inverter-fed machine enables the water turbine working on its optimal operating point despite the changing of water flows. As a part of this work, a prototype of the double generator system has been constructed (Fig. 0.97). The prototype is equipped with two permanent magnet excited synchronous machines instead of electrically excited synchronous machines and an asynchronous motor replicates the water turbine. The simulation model developed in this work has been modified such that

nären Arbeitspunkt linearisiert. Schließlich werden die Reglerparameter des Drehzahlreglers für den stabilen Betrieb optimiert. Die Simulationsergebnisse mit diesen Reglerparametern zeigen, dass das System bei externen Störungen robust arbeitet. Beispielsweise können die Schwingungen vom Hauptgenerator durch eine Netzfrequenzänderung unterdrückt werden. Des Weiteren wird ein vereinfachtes hydraulisches System simuliert, um das dynamische Verhalten des Doppelgenerators bei Änderung des Durchflusses bzw. der Leitradöffnung einer Wasserturbine zu überprüfen. Mit einer Drehzahlregelung der Regelmaschine kann eine Wasserturbine trotz des schwankenden Durchflusses in ihrem optimalen Betriebspunkt arbeiten. Als Teil dieser Arbeit wurde ein Prototyp des Doppelgenerators aufgebaut (Abb. 0.97). Anstatt elektrisch erregter Synchronmaschinen werden zwei permanentmagneterregte Synchronmaschinen verwendet, und ein Asynchronmotor bildet eine Wasserturbine nach. Somit muss das in dieser Arbeit entwickelte Simulationsmodell des Doppelgenerators entsprechend dem Prototyp modifiziert werden, sodass die experimentellen Daten modellspezifisch validiert werden können. Der Vergleich zwischen Simulations- und Messergebnissen zeigt eine hohe Übereinstimmung. Dies legt den Schluss nahe, dass das Simulationsmodell die Dynamik des Doppelgenerators in einem Wasserkraftwerk realitätsgetreu widerspiegelt, weil die Modifikation von Maschinenparametern keine Veränderung auf die Modellierung des Doppelgeneratorsystems bewirkt.

it provides the same machines, as they are used in the prototype. As a result, a fairly good agreement was found between the simulation results and the measurements performed on the prototype. This comparison indicates that the model of the double generator system can be used to simulate the dynamic behaviour in a run-of-river power plant, since the modification of machine parameters does not affect the modelling of the system.

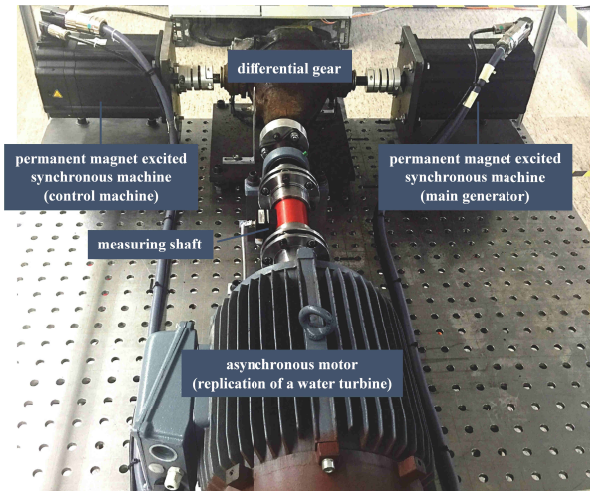


Fig. 0.97: Aufbau eines Prototyps des Doppelgeneratorsystems
Prototype of the double generator system

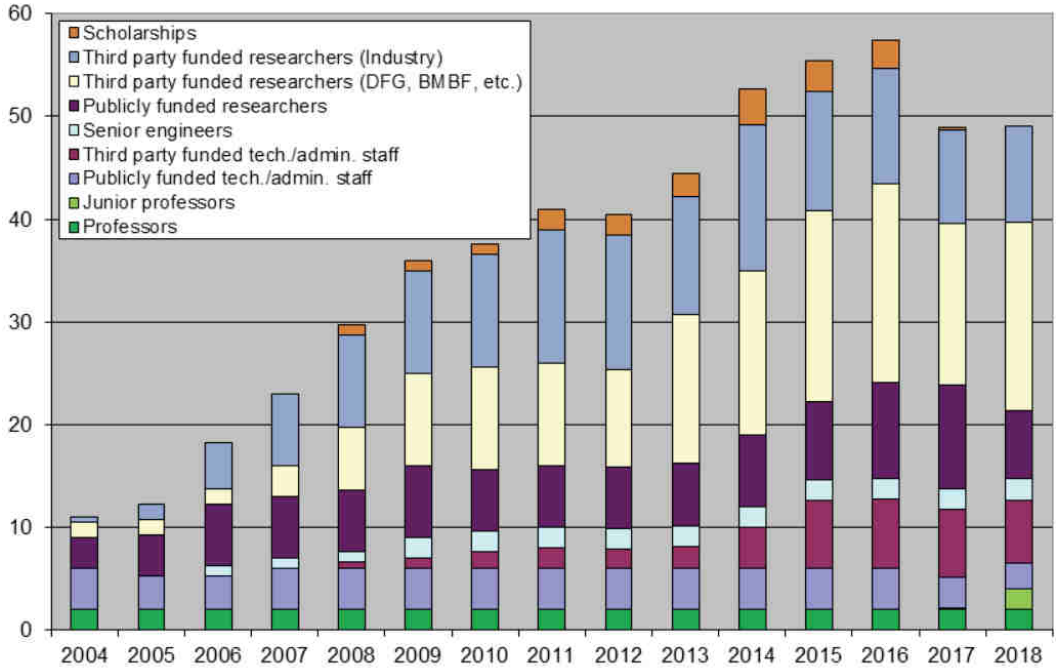
Das Institut | The Institute

Mitarbeiter des IAL

Auf den folgenden Seiten präsentieren sich die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des IAL, die zum Jahreswechsel 2018/2019 zum Team gehörten. Diejenigen, die zu Beginn des Jahres 2016 noch am IAL waren, aber uns bis zum Ende des Jahres 2018 bereits verlassen haben, sind separat aufgeführt. Die Anzahl der wissenschaftlichen Mitarbeiter konnte auf hohem Niveau gehalten werden. Die große Zahl macht sich naturgemäß auch bei der Anzahl der Zu- und Abgänge bemerkbar. Verlassen haben uns Frau Eva Bresemann sowie die Herren D. Bresemann, Dietz, Dörbaum, Dück, K. Emmrich, Heseding, von Hofen, Kaczorowski, Karimi, Karwatzki, Koupeny, Krone, Krupp, Misir, Moriße, Müller-Deile, Oelkers, Quattrone, Schroeder, Ullrich, B. Weber, N. Weber und S. Weber. Dem stehen als Neuzugänge gegenüber Frau Mirzadeh und die Herren Ali, Andresen, Bagaber, Brinker, Dokus, England, Fauth, Fricke, Gerlach, Heide, Herwig, Hoffmann, Hullmann, Kalla, Knebusch, Königsberg, Lin, Lindemann, Redlich, Reitmeier, Stallmann, Stockbrügger und Wiesemann. Frau Movagharnejad war im Anschluss an ihr Stipendium für etwa ein Jahr in Teilzeit in der Industrie beschäftigt, ohne das Institut ganz zu verlassen; sie bleibt jetzt zur Betreuung eines wichtigen Verbundprojekts für weitere Jahre als wissenschaftliche Mitarbeiterin am IAL. Natürlich sind als Neuzugänge die beiden Juniorprofessoren Dr. Amir Ebrahimi und Dr. Jens Friebe hervorzuheben. Sie stellen sich mit eigenen Beiträgen selbst vor. Im Bereich des Geschäftszimmers hat uns zu Beginn des Berichtszeitraums Frau Singer verlassen, um in einem der LUH verbundenen wissenschaftlichen Betrieb eine Stelle mit größerer Verantwortung auszufüllen. Wir konnten die Lücke schließen, indem ihre Aufgaben im IAL mit etwas anderem Zuschnitt durch Frau Kalberlah übernommen wurden. Für die dadurch offenen Aufgaben im Sekretariat konnten wir Frau Jeschina gewinnen, die in kürzester Zeit zu einer festen Größe im IAL geworden ist. Unter den technischen Mitarbeitern hat sich Herr Heydecke entschieden, das IAL zu verlassen, um eine ausgedehnte Weltreise zu unternehmen. Herr Winkler ist auf eine attraktive Stelle in einem Industrieunternehmen gewechselt. Wir freuen uns, dass wir mit Herrn Hammer einen erfahrenen Mitarbeiter gewinnen konnten, der die entstandene Lücke nun füllen wird. An dieser Stelle gilt allen ehemaligen und aktuellen Mitarbeitern unser herzlichster Dank für ihre langjährige Mitwirkung und die hohe Professionalität und Sichtbarkeit, die wir auf allen Ebenen erreicht haben.

IAL Staff

In the following, we would like to present you our staff members who were part of our team at the turn of the year 2018/2019. Those staff members who were with us at the beginning of 2016, but left by the end of 2018, are listed separately. Fortunately, we can still be glad about a consistently high number of research associates. Of course, this is also reflected by the number of incoming and outgoing researchers. The institute was left by Mrs Eva Bresemann as well as by Messrs D. Bresemann, Dietz, Dörbaum, Dück, K. Emmrich, Heseding, von Hofen, Kaczorowski, Karimi, Karwatzki, Koupeny, Krone, Krupp, Misir, Moriße, Müller-Deile, Oelkers, Quattrone, Schroeder, Ullrich, B. Weber, N. Weber and S. Weber. New researchers are Mrs Mirzadeh and Messrs Ali, Andresen, Bagaber, Brinker, Dokus, England, Fauth, Fricke, Gerlach, Heide, Herwig, Hoffmann, Hullmann, Kalla, Knebusch, Königsberg, Lin, Lindemann, Redlich, Reitmeier, Stallmann, Stockbrügger and Wiesemann. After her research scholarship, Mrs Movagharnejad has been working part-time in industry for almost one year, but without leaving our institute entirely. Now, she is staying with us for another few years as a researcher in an important joint research project. Particularly noteworthy are the two junior professors, Dr Amir Ebrahimi and Dr Jens Friebe, who are introducing themselves later in this report. At the beginning of 2016, Mrs Singer left our office to take over a job with greater responsibility in a scientific institution affiliated to the LUH. The gap could be closed by Mrs Kalberlah who took over Mrs Singer's tasks. For the open administrative tasks, we fortunately could win Mrs Jeschina who has become an indispensable member of the team in no time. Mr Heydecke, who belonged to our technical staff, left the IAL to make a wish come true and tour the world. Mr Winkler took over an attractive job in industry. Therefore, we are glad to welcome Mr Hammer who will fill the gap. At this point, we would like to thank all current and former staff members for their precious cooperation and high professionalism as well as for the visibility reached by our institute at all levels.


Scholarships
Third party funded researchers (Industry)
Third party funded researchers (DFG, BMBF, etc.)
Publicly funded researchers
Senior engineers
Third party funded tech./admin. staff
Publicly funded tech./admin. staff
Junior professors
Professors
60
50
40
30
20
10
0
2004
2005
2006
2007
2008
2009
2010
2011
2012
2013
2014
2015
2016
2017
2018

Prof.-Dr.-Ing. Axel Mertens

Welfengarten 1
30167 Hannover, Germany

Phone: +49(0)511/762-2471
Fax: +49(0)511/762-3040
E-mail: mertens@ial.uni-hannover.de

Curriculum Vitae

- 1982 to 1987 Studies and graduation (Dipl.-Ing.) in Electrical Engineering, RWTH Aachen, Germany
- 1987 to 1992 Research associate at the Institute for Power Electronics and Electric Drives (ISEA) at RWTH Aachen
- 1989 Herbert Kind Award of the ETG (VDE)
- 1989 to 1990 Research associate at the University of Wisconsin at Madison, USA
- 1992 Doctor in Electrical Engineering at RWTH Aachen
- 1992 IEEE IAS IPCC 2nd Prize Paper Award
- 1993 to 2004 Siemens AG at Erlangen and Nürnberg as R&D engineer, head of converter control development for large drives, and product manager for medium-voltage converters
- 2004 Appointed full professor for Power Electronics at Leibniz Universität Hannover

Further Activities

- Member-at-lage of IEEE Power Electronics Society Administrative Commitee
- Dean of the Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Leibniz Universität Hannover, until 2015
- Chairman of the Leibniz Research Centre Energy 2050 Transformation of the Energy System founded at Leibniz Universität Hannover until 2016
- Advisor for Department Electric Components and Systems within Fraunhofer Institute for Manufacturing Technology and Applied Materials Research (IFAM), until 2017
- Advisor for Department "Power Electronics and Device Technology" within Fraunhofer Institute for Wind Energy and Energy System Technology (IWES)
- Associate Editor of the journal IEEE Transactions on Power Electronics
- Member of the International Steering Committee in the EPE Association
- Board Member of Energy Research Centre Lower Saxony (EFZN) until 2016
- Chairman of the Division Q1 Power Electronics of the Power Engineering Society ETG (Technical Society of the VDE) until 2012
- Chairman of IEEE IAS/IES/PELS Joint German Chapter until 2012

Prof. Dr.-Ing. Bernd Ponick

Welfengarten 1
30167 Hannover, Germany

Phone: +49(0)511/762-2571
Fax: +49(0)511/762-3040
E-mail: ponick@ial.uni-hannover.de

Curriculum Vitae

- 1984 to 1990 Studies and graduation (Dipl.-Ing.) in Electrical Engineering/Power Engineering, University of Hannover, Germany
- 1986 Philips Award
- 1990 to 1994 Research associate at the Institute for Electrical Machines and Drives at the University of Hannover
- 1994 Doctor in Electrical Engineering at the University of Hannover
- 1995 to 2003 Design engineer for large variable speed motors at Siemens Dynamowerk Berlin, Head of the Electrical Design and Offer Processing Department, Technical Director
- 2003 Appointed full professor for Drive Systems at the University of Hannover

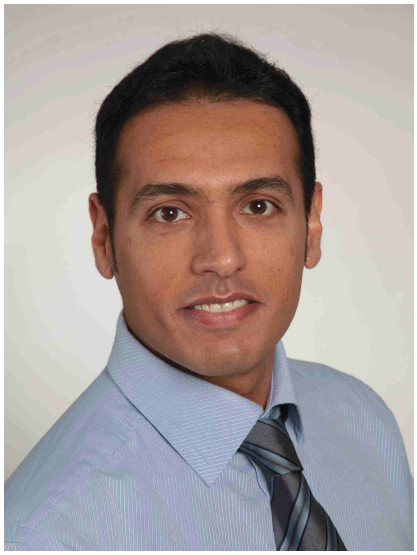
Further Activities

- Since 2005 member and since 2016 convenor of K 311 committee Rotating Electrical Machines of the DKE German Commission for Electrical, Electronic & Information Technologies of DIN and VDE
- 2007 to 2016 chairman of the IEC/TC 2 Rotating Machinery, being responsible for the international standardization of rotating electrical machines
- Since 2006 convenor of Working Group 12 and member of Maintenance Team MT 9 of IEC/TC 2 Rotating Machinery
- Member of VDE ETG A1 Group Electrical Machines and Drives, Mechatronics
- Member of VDE GMM Technical Committee 3.3 "Electrical Servo Drives"
- Since 2007 elected Academic Dean for Electrical Engineering and Information Technology at Leibniz Universität Hannover
- Advisor for Department Electric Components and Systems within Fraunhofer Institute for Manufacturing Technology and Applied Materials Research (IFAM), until 2017
- Advisor for Department "Power Electronics and Device Technology" within Fraunhofer Institute for Wind Energy and Energy System Technology (IWES)
- Board member of the Lower Saxony Research Centre for Vehicle Technology (NFF)
- Board member of the Hannover Centre for Mechatronics (MZH)
- Since 2012 elected member of the German Research Foundation (DFG) Review Board 408 "Electrical Engineering"

Jun.-Prof. Dr.-Ing. Amir Ebrahimi

Welfengarten 1
30167 Hannover, Germany

Phone: +49(0)511/762-3767
Fax: +49(0)511/762-3040
E-mail: ebrahimi@ial.uni-hannover.de



Curriculum Vitae

- 2002 - 2006 Bachelor of Science in Electrical Engineering at the University of Shiraz, Iran
- 2006 - 2008 Master of Science in Electrical Engineering at the Iran University of Science and Technology
- 2009 - 2013 PhD in Electrical Engineering at the University of Stuttgart, Germany
- 2013 - 2017 Project manager / group manager for drive systems and exoskeletons at Fraunhofer Institute for Manufacturing Engineering and Automation IPA, Stuttgart, Germany
- 2017 Appointed Junior Professor of Hydrogenerators at Leibniz Universität Hannover

Further Activities

- Analytical modelling of synchronous machines (cogging torque, electromagnetic forces, losses)
- Design of automated calculation tools for electrical machines
- Intelligent optimization algorithms for the design of highly efficient electrical machinery
- Hydrogenerators and large electrical machinery
- Wearable robotic and actively powered exoskeletons for industrial and medical applications

Amir Ebrahimi ist seit November 2017 als Juniorprofessor für Wasserkraftgeneratoren am IAL tätig. Er hält die Vorlesung Electrical Drives: Small Electric Motors and Servo Drives im Wintersemester und die Vorlesung Wasserkraftgeneratoren im Sommersemester. Er ist für den großen Generatorprüfstand (GeCoLab) und in Zusammenarbeit mit der Firma Voith Hydro für die Vermessung und Forschung an Wasserkraftgeneratoren verantwortlich. Dazu gehört u.a. die Verlustmodellierung sowohl im aktiven als auch im Endbereich von Wasserkraftgeneratoren. Er promovierte von 2009 bis 2013 an der Universität Stuttgart im Bereich elektrischer Maschinen. Sein Dissertationsthema lautete Hybrid Analytical Modeling and Optimization of Surface-Mounted Permanent Magnet Synchronous Motors Considering Spatial Harmonics. Hierzu beschäftigte er sich mit der analytischen und numerischen Modellierung von permanentmagneterregten Synchronmaschinen, Motorkonstruktion, Mittelspannungsleistungselektronik und Regelung von elektrischen Maschinen. Er war bis September 2017 als Gruppenleiter für Antriebsysteme und Exoskelette am Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung in Stuttgart tätig. Er entwickelte dort unter anderem das erste aktiv angetriebene Exoskelett für die oberen Extremitäten für die industrielle Anwendung und meldete mehrere Patente in diesem Bereich an. Seine Interessenschwerpunkte sind die analytische und numerische Modellierung und Regelung von elektrischen Maschinen.

In November 2017, Amir Ebrahimi was appointed as Junior Professor of Hydrogenerators at IAL. He holds the lecture Electrical Drives: Small Electric Motors and Servo Drives in the winter term and Hydrogenerators in the summer term. He is responsible for the institute's large-scale generator test bench (GeCoLab) and for the design and research on hydrogenerators in cooperation with Voith Hydro. This includes, for example, loss modelling in the active part as well as in the end winding of hydrogenerators. From 2009 to 2013, he was a PhD student at the University of Stuttgart in the field of electrical machines. The topic of his thesis was Hybrid Analytical Modelling and Optimization of Surface-Mounted Permanent Magnet Synchronous Motors Considering Spatial Harmonics. In this context, he was doing research on analytical and numerical modelling of permanent magnet synchronous machines, motor design, medium-voltage power electronics and control design of electrical machines. Until September 2017, he was group manager for drive systems and exoskeletons at Fraunhofer Institute for Manufacturing Engineering and Automation in Stuttgart. For example, he developed the first actively powered exoskeleton for the upper extremities for industrial applications and filed several patents in this area of research. His fields of interest include analytical and numerical modelling and control design of electrical machines.

Jun.-Prof. Dr.-Ing. Jens Friebe

Welfengarten 1
30167 Hannover, Germany

Phone: +49(0)511/762-5346
Fax: +49(0)511/762-3040
E-mail: friebe@ial.uni-hannover.de

Curriculum Vitae

- 2004 to 2007 Vocational training as Electronics Technician for Industrial Engineering at SMA Solar Technology AG
- 2004 to 2009 Study of Electrical Engineering at the University of Kassel in an integrated degree program in association with SMA Solar Technology AG
- 2009 to 2017 Development engineer for power electronics, finally as Senior Engineer for power electronics packaging at SMA Solar Technology AG
- 2014 Doctoral degree (Dr.-Ing.) at the University of Kassel
- 2018 Appointed Junior Professor of Passive Components for Power Electronics at Leibniz Universität Hannover

Further Activities

- Magnetic components
  - influence of WBG semiconductors on the inductor design
  - transformers for galvanically isolated converters with high switching frequency
  - design of magnetic components for high temperatures
  - investigations on core and winding materials
- Power electronics packaging
  - thermal design of power converters with WBG semiconductors
  - utilization of WBG semiconductors at temperatures higher than $175°C$
  - development of power electronics building blocks
  - electromagnetic compatibility
  - investigation and optimization of electromagnetic interference of power converters with WBG semiconductors
  - filter design of grid-connected systems and drive applications
  - utilization of parasitic component properties for an optimization of electromagnetic interference
- Capacitors
  - virtual capacitors for power electronics building blocks
  - capacitive elements as winding for inductive components

Jens Friebe war von 2004 bis inkl. 2017 bei der SMA Solar Technology AG angestellt. Er nahm an einem sogenannten Studium im Praxisverbund teil, das eine Berufsausbildung zum Elektroniker für Betriebstechnik und parallel hierzu ein Studium der Elektrotechnik an der Universität Kassel umfasste. Das Thema seiner ersten Diplomarbeit (Bachelor) war die Untersuchung des Schaltverhaltens von SiC-JFETs, das Thema der zweiten Diplomarbeit (Master) die Regelung eines dreiphasigen Wechselrichters auf der Basis eines FPGAs. Nach dem Studium war er als Entwicklungsingenieur angestellt und arbeitete parallel an seiner Promotion mit dem Themenschwerpunkt der permanentmagnetischen Vormagnetisierung von Speicherdrosseln für Leistungswandler, die er 2014 abschloss. In der darauffolgenden Zeit übernahm er die Projektleitung im Rahmen eines Forschungsprojekts zur Kostensenkung bei kleinen PV-Wechselrichtern mit dem Fokus auf der Aufbau- und Verbindungstechnik. Zuletzt war er als Senior Engineer für Aufbau und Verbindungstechnik angestellt. In der vorgenannten Zeit hat er insgesamt 9 Veröffentlichungen getätigt. Aufgrund der Anstellung in der Industrie lag der Schwerpunkt auf dem Schutz der Entwicklungstätigkeiten über Patentschriften, bei denen er verschiedene Anmeldungen getätigt hat, die zu derzeit 30 Patenterteilungen geführt haben. Seit dem Jahr 2009 hat er außerdem ca. 30 studentische Arbeiten betreut. Sein Interessensschwerpunkt ist das kosten- und fertigungsoptimierte Design von Leistungswandlern mit dem Fokus auf den passiven Komponenten, der Aufbau- und Verbindungstechnik und der leistungselektroniknahen Schaltungstechnik.

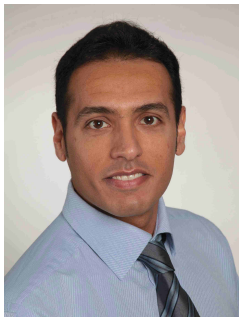
From 2004 to the end of 2017, Jens Friebe was employed at SMA Solar Technology AG. He took part in an integrated degree program in association with SMA, including a vocational on-the-job training as an electronics technician for industrial engineering parallel to an Electrical Engineering degree course at the University of Kassel. His Bachelor thesis was about the switching behaviour analysis of SiC-JFETs, his Master thesis dealt with the control of an FPGA-based three-phase inverter. After his studies, he worked as a development engineer, at the same time doing his PhD on inductors premagnetized with a permanent magnet for use in power converters. After completion of his PhD in 2014, he managed a research project on cost reduction in small-sized PV inverters with the focus on power electronics packaging. Finally, he was Senior Engineer for power electronics packaging. During this time, he published nine scientific papers. Owing to his employment in industry, the priority task was to protect all development activities by patents. He applied for various patents from which 30 were granted up to now. Since 2009, he has also been the supervisor of about 30 student theses. His main interests include cost- and production-optimized design of power converters with the focus on passive components, power electronics packaging and power electronic circuitry.

Professoren |Professors

Prof. Dr. -Ing.
Axel Mertens
Leistungselektronik & Antriebsregelung
Power Electronics & Drive Control

Prof. Dr. -Ing.
Bernd Ponick
Elektrische Maschinen & Antriebssysteme
Electrical Machines & Drive Systems

Juniorprofessoren |Junior Professors



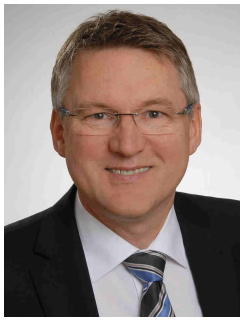
Jun.-Prof. Dr. -Ing.
Amir Ebrahimi
Wasserkraftgeneratoren
Hydropower

Jun.-Prof. Dr. -Ing.
Jens Friebe
Passive Komponenten der Leistungselektronik
Passive Components in Power Electronics

Gastdozenten
External Lecturers

Hon.-Prof. Dr. M.L.E.
Kai Gent

Leibniz Forschungszentrum Energie 2050
Leibniz Research Centre Energy 2050



Dr. -Ing.
Georg Möller

Dr.-Ing.
Volker Schöber

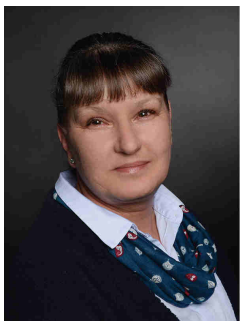
Oberingenieure |Senior Engineers

Dr.-Ing.
Robert Meyer

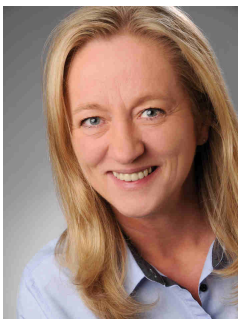
Dr.-Ing.
Jörn Steinbrink

Verwaltungsteam |Administrative Staff

ReNo-Fachangestellte
Birgit Kalberlah

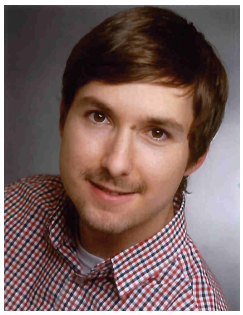


Kauffrau Büromanagement
Elfi Jeschina



Dipl.-Jur.
Beate Pieschel

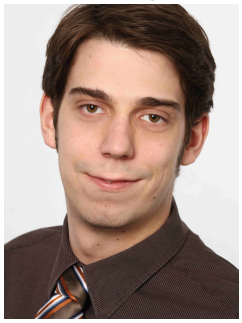
Technische Mitarbeiter |Technical Staff



Elektroniker
Tim Bergte

Industriemeister Elektrotechnik
Jörg-Uwe Hammer

Dipl.-Ing. (FH)
Clemens Larivière



Fachinformatiker
Hanno Lippert

Industriemechaniker
Sebastian Rudolph

Industriemeister
Carsten Selke

Wissenschaftliches Mitarbeiterteam |Team of Research Associates

M. Sc.
Mohammad Ali

M. Sc.
Jan Andresen

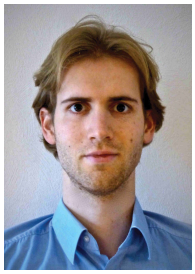
M. Sc.
Bakr Bagaber

M. Sc.
Björn Berweiler

M. Sc.
Tobias Brinker

M. Sc.
Marc Dokus

M. Sc.
Marc England



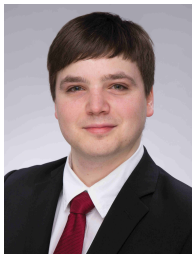
M. Sc.
Leon Fauth

M. Sc.
Torben Fricke

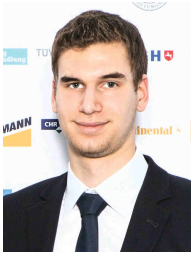
M. Sc.
Martin Gerlach

M. Sc.
Elmar Haschen

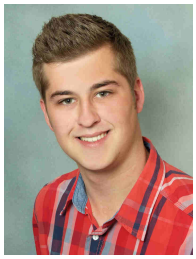
M. Sc.
Daniel Heide



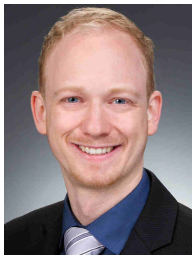
M. Sc.
Daniel Herwig



M. Sc.
Alexander Hoffmann



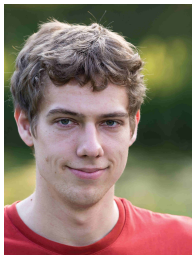
M. Sc.
Max Hullmann



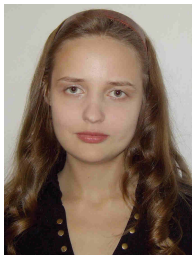
Dipl. -Ing.
Malte John

M. Sc.
Matthias Kalla

M. Sc.
Benjamin Knebusch

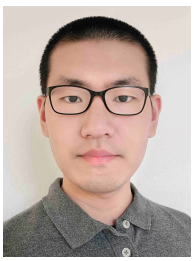


M. Sc.
Jan Königsberg

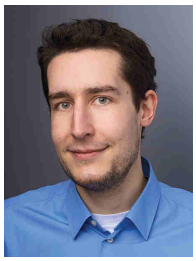


M. Sc.
Olga Korolova

Ing.
Jakub Kučka



M. Sc.
Siqi Lin



M. Sc.
Georg Lindemann

M. Sc.
Stefan Lücke

M. Sc.
Mina Mirzadeh

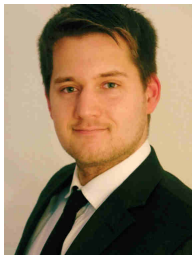
M. Sc.
Hedieh Movagharnejad

Dipl.-Ing.
Jan Müller

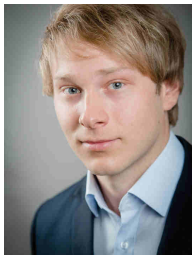
Dipl.-Ing.
Gerrit Narjes

M. Sc.
Morteza Raziee

M. Sc.
Jürgen Redlich



M. Sc.
Alexander Rehfeld



M. Sc.
Dominik Reitmeier

M. Sc.
Christian Sommer

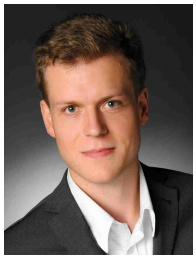
M. Sc.
Frederik Stallmann

M. Sc.
Ole Stockbrügger

M. Sc.
Stefan Urbanek

M. Sc.
Stephan Vip

M. Eng.
Julius Wiesemann



M. Sc.
Constantin Woehlers

Dipl.-Ing.
Silvia Zulk

Ehemalige Mitarbeitende und Doktoranden 2016/17/18

Former Staff Members and PhDs 2016/17/18

M. Sc.
Dennis Bresemann
wiss. Mitarbeiter
Research ass.

M. Sc.
Eva Bresemann
wiss. Mitarbeiterin
Research ass.

Dipl.-Ing.
René Dietz
wiss. Mitarbeiter
Research ass.

Dr.-Ing.
Michael Dörbaum
wiss. Mitarbeiter
Research ass.

Dipl.-Ing.
Peter Dück
wiss. Mitarbeiter
Research ass.

M. Sc.
Kacper Emmrich
wiss. Mitarbeiter
Research ass.

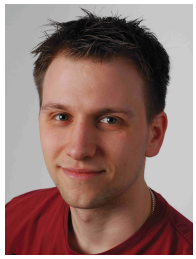
M. Sc.
Hannes Heseding
wiss. Mitarbeiter
Research ass.

Andreas Heydecke
Technischer Mitarbeiter
Technical Stuff

Dipl.-Ing.
Malte von Hofen
wiss. Mitarbeiter
Research ass.

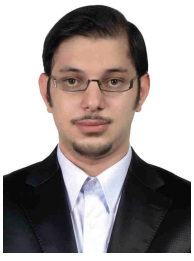
M. Sc.
Jelena Hurlbrink
wiss. Mitarbeiter
Research ass.

Dipl.-Ing.
Jonathan Jürgens
wiss. Mitarbeiter
Research ass.

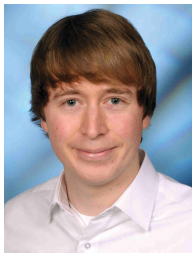


M. Sc.
Dennis Kaczorowski
wiss. Mitarbeiter
Research ass.

Dr.rer.nat.
Peter Kanschat
Gastdozent
External Lectures



M. Sc.
Rashid Karimi
wiss. Mitarbeiter
Research ass.



Dr. -Ing.
Dennis Karwatzki
wiss. Mitarbeiter
Research ass.

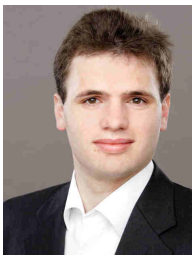
Dr. -Ing.
Jarovslav Koupeny
wiss. Mitarbeiter
Research ass.

Dipl.-Ing.
Tobias Krone
wiss. Mitarbeiter
Research ass.

Dipl.-Ing.
Henrik Krupp
wiss. Mitarbeiter
Research ass.

Dr.-Ing.
Onur Misir
wiss. Mitarbeiter
Research ass.

Dipl.-Ing.
Marcel Morisse
wiss. Mitarbeiter
Research ass.



Dr.-Ing.
Felix Müller-Deile
wiss. Mitarbeiter
Research ass.

Dipl.-Ing.
Fabian Oelkers
wiss. Mitarbeiter
Research ass.

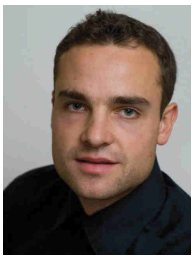
Dipl.-Ing.
Francesco Quattrone
wiss. Mitarbeiter
Research ass.

Dipl.-Ing.
Henrik Schroeder
wiss. Mitarbeiter
Research ass.

Nina Schulz-Meden
Verwaltung
Administration

Dipl.-Ing.(FH) LL.M.(Com.)
Iris Singer
Verwaltung
Administration

Prof. Dr.-Ing.
Cornelia Stübig
Gastdozentin
External Lectures



Dipl.-Ing.
Bernhard Ullrich
wiss. Mitarbeiter
Research ass.

Dr.-Ing.
Bastian Weber
wiss. Mitarbeiter
Research ass.

Dr.-Ing.
Niklas Weber
wiss. Mitarbeiter
Research ass.

Dr.-Ing.
Simon Weber
wiss. Mitarbeiter
Research ass.

Torsten Winkler
Technischer Mitarbeiter
Technical Staff

Chronik 2016/17/18
Chronicle 2016/17/18

2016

Januar 2016
01.01. Alexander Rehfeldt und Stephan-Akash Vip beginnen als Assistenten am IAL.

11.01. Eröffnungsfeier und offizielle Inbetriebnahme des GeCoLab in Marienwerder mit Teilnahme des LUH-Präsidenten Prof. Epping sowie Vertretern aus Ministerien, Industrie und der Fakultät.

14.-17.01. Strategieworkshop in Marianska (Erzgebirge), Erholungsheim der Tschechischen Akademie der Wissenschaften Prag

22.01. LE Nord-Kolloquium in Bremen zum Wissensaustausch mit Prof. Mertens, Dr. Robert Meyer, Marcel Moriße, Dennis Kaczerowski und Tobias Krone

22.01. Exkursion zur Firma Bosch nach Hildesheim im Rahmen der Vorlesung „Grundlagen der elektromagnetischen Energiewandlung“

25.01. Exkursion zur Firma LDW nach Bremen im Rahmen der Vorlesung Grundlagen der elektromagnetischen Energiewandlung

Februar 2016
01.02. Jelena Hurlbrink beginnt als Assistentin am IAL.

08.-09.02. Malte von Hofen, Dennis Bresemann und Henrik Krupp nehmen als Juroren am „Jugend forscht“-Regionalwettbewerb teil.

16.02. Elmar Haschen hält einen Vortrag beim Symposium Elektromagnetismus der Technischen Akademie Esslingen in Künzelsau.

März 2016
01.03. Jan Andresen beginnt als Assistent am IAL.

08.03. Exkursion zur Firma Infineon nach Warstein im Rahmen der Vorlesung Leistungshalbleiter und Ansteuerungen

08.-10.03. Simon Weber hält einen Vortrag auf der CIPS 2016 in Nürnberg.

11.03. KPE-Kolloquium für Stipendiaten und deren Betreuer an der LUH unter der Leitung von Prof. Mertens und Dr. Robert Meyer mit Vorträgen von Hedieh Movagharnejad, Rashidreza Karimi und Morteza Seyed Raziee.

15.03. Daniel Herwig beginnt als Assistent am IAL.

16.-18.03. Durchführung der Mobil4E-Schulung am IAL mit Vorträgen von Prof. Ponick, Prof. Mertens, Björn Berweiler, Fabian Oelkers und Silvia Zulk.

20.-24.03. Postervorstellung von Bastian Weber auf der IEEE APEC 2016 in Los Angeles, USA

31.03. Letzter Arbeitstag von Iris Singer

April 2016
01.04. Doktorprüfung von Sebastian Tegeler

14.-15.04. Prof. Ponick hält einen Vortrag auf der Ergebniskonferenz der Projekte Schaufenster Elektromobilität in Leipzig.

18.04. Institutsbowling

19.-21.04. Onur Misir präsentiert auf der PEMD in Glasgow Forschungsergebnisse.

25.04. Barack Obama spricht auf der Hannover-Messe vor Studierenden und Hochschulangehörigen unserer Universität.

Mai 2016

10.-12.05. Johannes Heseding stellt einen Beitrag an der PCIM in Nürnberg vor.

17.-31.05. Gegenbesuch der Studenten der Purdue University, West Lafayette, USA, im Rahmen des Capstone-Projekts am IAL

18.-20.05. Pfingstexkursion zu GE und ins Dynamowerk nach Berlin sowie zum VEM-Sachsenwerk nach Dresden

Juni 2016

01.06. Elfi Jeschina beginnt als Sekretärin und Jan Königsberg beginnt als Assistent am IAL.

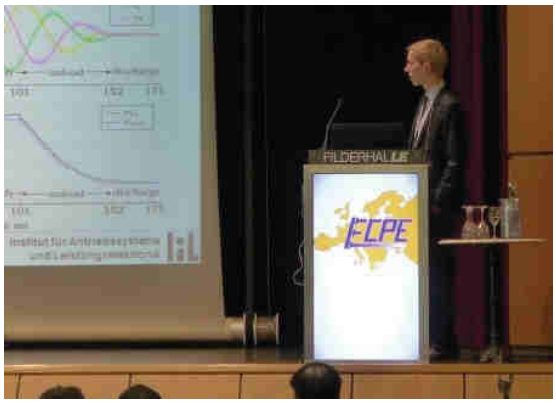
01.06. Interne Eröffnungsfeier des GeCoLAb mit Gästen von der Fraunhofer-Gruppe TETRA, dem Franzius-Institut, FZK, GE und Voith

02.06. Constantin Wohlers wird in Karlsruhe mit dem Studienpreis 2015 der SEW-EURODRIVE-Stiftung für seine Masterarbeit ausgezeichnet.

03.06. Prof. Dr. Weinhold, CTO Siemens Energy, besucht das IAL und hält einen Vortrag für LiFE 2050.

08.06. Teilnahme am Hochschulsportfest mit dem Fußballteam "Immer Am Limit" (IAL) und dem Volleyballteam "IMPOSAND"

08.-10.06. Jakub Kučka hält einen Vortrag auf dem IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Santa Clara, USA.



22.-23.06. Jan Müller hält einen Vortrag beim ECPE-Workshop Power Electronics for e-Mobility in Stuttgart.

27.-30.06. Malte von Hofen hält einen Vortrag auf der PEDG 2016 in Vancouver, Canada.

30.06. Letzter Arbeitstag von Kacper Emmrich

Juli 2016

18.07. Betriebsausflug zum Swingolfen und Grillen bei Prof. Mertens in der Wedemark

21.07. Hiwi-Grillen

23.-29.07. Jan Müller und Jan Königsberg betreuen im Rahmen der Nds. Talente-Akademie Schülerinnen und Schüler im Projekt Bauen von Quadrocoptern und Sammeln von Flugerfahrungen.

31.07. Letzter Arbeitstag von René Dietz

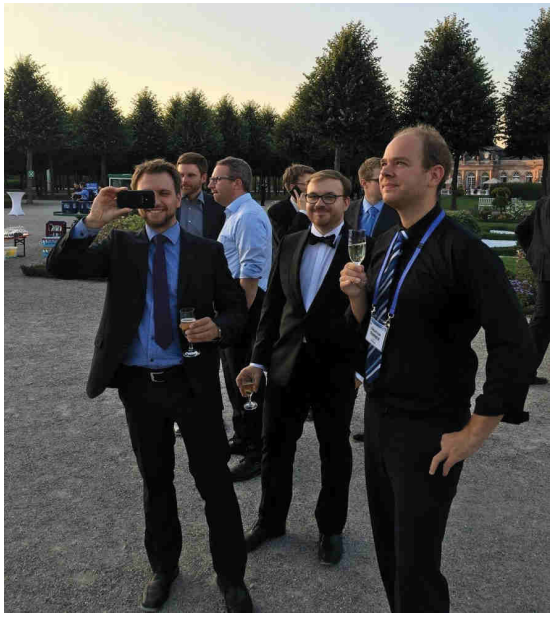
August 2016

29.08. Teilnahme am Pi2run-Lauf

31.08. Letzter Arbeitstag des FWJlers Julius Peters

September 2016

01.09. 10-jährige Institutszugehörigkeit von Clemens Larivière; Esteban Vindas Prado aus Costa Rica beginnt als FWJler am IAL.



11.03. Prof. Mertens und seine wissenschaftlichen Mitarbeiter nehmen mit 17 Beiträgen an der EPE 2016 ECCE in Karlsruhe teil und stellen die stärkste Abordnung der Tagung.

08.09. Rashidreza Karimi hält einen Vortrag auf dem E-Motive-Expertenforum in Schweinfurt.

18.-22-09. Beiträge von Tobias Krone, Simon Weber, Rashidreza Karimi sowie Prof. Mertens auf der IEEE ECCE Milwaukee, USA; Dennis Karwatzki wird dort für sein Poster mit dem „Best Paper Award“ ausgezeichnet.

30.09. Letzter Arbeitstag von Jaroslav Koupený und Rashidreza Karimi

Oktober 2016

01.10. Benjamin Knebusch beginnt als Assistent am IAL

16.10. Marcel Moriße hält einen Vortrag auf der TORQUE 2016 in München

08.-16.10. Capstone-Projekt mit Elmar Haschen, Stefan Lücke, Alexander Friedl (IMKT) und drei Studenten an der Purdue University in West Lafayette, USA

11.10. Doktorprüfung von Christoph Junginger

12.10. Organisation und Durchführung des FWJ-Seminartags am IAL durch Malte John

17.-21.10. Dennis Bresemann und Malte von Hofen betreuen im Rahmen von Jugend forscht" Schülerinnen am IAL.

18.-19.10. Prof. Mertens hält einen Vortrag auf dem Technischen Tag der VEM in Wernigerode.

27.10. Nabil Hammouche erhält für seine Studienarbeit den VDI-Technikpreis 2016.

31.10. Letzter Arbeitstag von Jelena Hurlbrink

November 2016

09.-10.11. Ausrichtung des FEMAG- Anwendertreffens in Ingolstadt mit Vorträgen von Dr. Steinbrink und Prof. Ponick mit 150 Teilnehmern aus Forschung und Industrie

12.11. Beteiligung des IAL an der „Nacht, die Wissen schafft“ der LUH

15.11. Vortrag von Prof. Mertens beim ECPE-Network-Meeting in München

29.-30.11. Jan Müller hält einen Vortrag bei der FVA-Informationstagung 2016 in Würzburg.

31.11. Letzter Arbeitstag von Bernhard Ullrich

30.11. „Hallo Niedersachsen“ sendet einen TV-Beitrag zu Elektroautos mit einem Interview von Prof. Ponick.

Dezember 2016

05.12. CTI-Symposium in Berlin mit Vorträgen von Prof. Mertens und Prof. Ponick

09.12. Prof. Seinsch beginnt mit einer Vortragsreihe im Rahmen des AS-Doktorandenkolloquiums.

16.12. Doktorprüfung von Marco Jung und Internationales Jahresabschlusskolloquium

20.12. Vertragsunterzeichnung für die Stiftungs-Juniorprofessur für Wasserkraftgeneratoren, gestiftet von der Firma Voith Heidenheim, mit den Herren Dr. Riedel, Dr. Koutnik und Dr. Krüger sowie dem LUH-Präsidenten Prof. Epping und den Professoren Esser, Schneider, Blume, Mertens und Ponick.

31.12. Letzter Arbeitstag von Eva und Dennis Bresemann und Francesco Quattrone

2017

Januar 2017

01.01. Jürgen Redlich beginnt als Assistent am IAL.

12.-15.01. Strategieworkshop in Marianska (Erzgebirge), Erholungsheim der Tschechischen Akademie der Wissenschaften Prag

15.01. Marc Dokus beginnt als Assistent am IAL.

25.-26.01. Prof. Ponick hält einen Vortrag auf der MoreDrive 2017 in Wien.

31.01. Letzter Arbeitstag von Peter Dück, Dennis Kaczorowski, Henrik Krupp und Malte von Hofen

Februar 2017

01.02 Morteza Raziee beginnt als Assistent am IAL

01.02. Es beginnt die regelmäßige aktive Bewegungspause durch den Leibniz Pausenexpress.

02.02. Vortrag von Prof. Mertens auf dem ECPE-Tutorial Drivers and Control Circuitry for IGBTs and MOSFETs

03.02. Exkursion zur Firma Infineon nach Warstein im Rahmen der Vorlesung Leistungshalbleiter und Ansteuerungen

09.02. Exkursion zur Firma LDW nach Bremen im Rahmen der Vorlesung Grundlagen der elektromagnetischen Energiewandlung

10.02. Exkursion ins Turbogeneratorwerk der Firma Siemens nach Erfurt im Rahmen der Vorlesung Berechnung elektrischer Maschinen

10.02. Doktorprüfung von Hans Tischmacher

14.-15.02. AKEE-Treffen am IAL und in Marienwerder mit Besichtigung des GeCoLab

März 2017

06.03. Daniel Herwig erhält für seine Masterarbeit den Studienpreis des VDE Hannover.

08.03. Christian Sommer hält einen Vortrag auf dem ECPE SiC & GaN User Forum in Nürnberg.

14.03. Letzter Arbeitstag von Henrik Krupp

14.03. Tim Buchali beginnt in Kooperation mit der Firma Mahle als Doktorand am IAL.

14.03. Doktorprüfung von Jaroslav Koupený

15.03. Doktorandenkolloquium des Verbunds LE Nord in Kiel mit Vorträgen aus dem IAL

17.03. Dr. Steinbrink hält einen Vortrag auf dem Kleinmaschinenkolloquium in Ilmenau.

29.03. Vortrag am IAL von Dr. Dennis Kampen von der Firma BLOCK Transformatoren über Passive Filter und EMV

30.-31.03. Institutsworkshop in Wöltingerode

April 2017

01.04. Nils Bothen beginnt als Assistent am IAL.

04.04. IAL-Bowlingabend am Maschsee

05.04. Auf dem Wirtschaftsempfang der LUH stellen Alexander Rehfeldt, Jürgen Redlich und Stephan-Akash Vip Forschungsergebnisse zu Wasserkraftgeneratoren vor.

15.04. Alexander Hoffman beginnt als Assistent am IAL.

27.04. Jürgen Redlich und Niklas Weber betreuen Schülerinnen und Schüler am Zukunftstag am IAL.

30.04. Letzter Arbeitstag von Dennis Karwatzki

Mai 2017

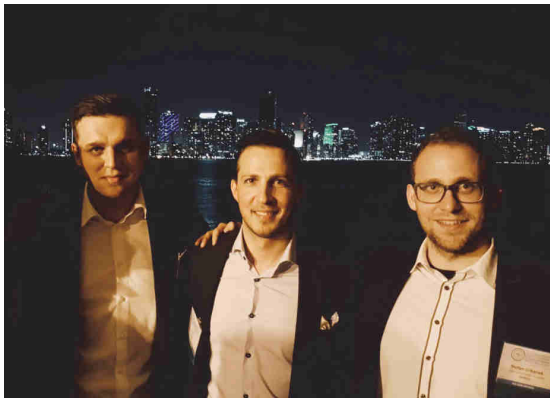
01.05. Georg Lindemann beginnt als Assistent am IAL.

04.05. LiFE 2050 richtet den „Tag der Energieforschung 2017“ im Lichthof der LUH aus, Prof. Mertens hält einen Vortrag zur Elektromobilität.

15.05. Marc Dokus und Torben Fricke beginnen als Assistenten am IAL.

15.-24.05. Gegenbesuch der Studenten der Purdue University, West Lafayette, USA, im Rahmen des Capstone-Projekts am IAL

19.05. Doktorprüfung von Felix Fuchs



21.-24.05. Prof. Ponick ist Topic Chair auf der International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC) 2017 in Miami, Florida, USA, mit Vorträgen von Onur Misir, Jürgen Redlich und Stefan Urbanek.

Juni 2017

12.-16.06. Prof. Mertens nimmt als Session Organizer an der IEEE FEPPCON 2017 in Johannesburg, Südafrika, teil und hält einen Vortrag.

14.06. Vollen Einsatz zeigt das Immer-Am-Limit-Fußball-Team beim Hochschulsportfest.

23.06. Jan Andresen erhält in Bruchsal für seine Masterarbeit den Studienpreis der SEW-EURODRIVE-Stiftung.

30.06. Alexander Rehfeldt erhält für seine Masterarbeit den Hanns-Voith-Stiftungspreis.

30.06. Letzter Arbeitstag von Onur Misir

30.06.-01.07. Prof. Mertens nimmt am Deutsch-Koreanischen DFG-Workshop in Berlin teil.

Juli 2017

11.07. Exkursion zur Firma Siemens nach Nürnberg im Rahmen der Vorlesung Elektrische Bahnen und Fahrzeugantriebe

13.07. Hiwi-Grillen

16.-19.07. Vorträge von Malte John und Olga Korolova auf der ISTET 2017 in Ilmenau

17.07. Doktorprüfung von Dennis Karwatzki

24.-25.07. Besuch von Prof. W. Cronje aus Johannesburg am IAL mit Vortrag

25.07. Jan Müller und Jan Königsberg betreuen im Rahmen der Nds. Talente-Akademie Schülerinnen und Schüler im Projekt Bauen von Quadrocoptern und Sammeln von Flugerfahrungen.

31.07. Letzter Arbeitstag von Michael Dörbaum, Johannes Heseding und Andreas Heydecke

August 2017

02.08. Dr. Franz hält am IAL ein Seminar zur EMV in der Leistungselektronik

11.-14.08. Olga Korolova hält einen Vortrag auf der Konferenz ICEMS in Sydney, Australien.

17.08. Letzter Tag des FWJlers Esteban Vindas Prado

21.08. Doktorprüfung von Mingija Zhang

30.08. Doktorprüfung von Timur Werner

September 2017

01.09. Erster Arbeitstag der FWJlerin Marie Hanemann und IAL-Betriebsausflug als Kanutour auf Leine und Ihme durch Hannover und Grillen bei Prof. Ponick

05.-06.09. Keynotes und Vorträge beim 9. E-Motive-Expertenforum Elektrische Fahrzeugantriebe in Hannover von Prof. Mertens, Prof. Ponick und Gerrit Narjes

11.09.-14.09. Konferenz EPE 2017 in Warschau mit Vorträgen von Marc Dokus, Marcel Mori"se, Hedieh Movagharnejad, Malte John, Tobias Krone sowie Prof. Mertens als Topic Chair

17.09.-22.09. Vortrag von Christian Sommer bei der International Conference on SiC and Related Materials (ICSRM) in Washington DC, USA

18.09.-19.09. Prof. Mertens, Georg Lindemann, Stefan Lücke und Bastian Weber nehmen mit Vorträgen am IEEE Symposium SLED in Catania, Italien, teil.

Oktober 2017

01.10. Dr.-Ing. Amir Ebrahimi beginnt seine Tätigkeiten als Juniorprofessor für Wasserkraftgeneratoren und Bakr Bagaber beginnt als Assistent am IAL.

05.10. Vortrag von Dr. Steinbrink auf der UK Magnetics in Hanau

06.-14.10. Stefan Lücke, Stephan Vip und drei Studenten nehmen am Capstone-Projekt mit der Purdue University in Westlafayette, USA, teil.

10.-11.10. Prof. Ponick hält einen Vortrag auf dem Technischen Tag der VEM in Wernigerode.

26.10. Prof. Ponick wird mit dem IEC 1906 Award der International Electrotechnical Commission ausgezeichnet.

29.10.-01.11. Jan Müller hält einen Vortrag auf der IECON 2017 in Peking, China.

31.10. Letzter Arbeitstag von Niklas Weber

November 2017

02.-03.11. Ausrichtung des FEMAG-Anwendertreffens in Mülheim/Ruhr mit Vorträgen von Prof. Ponick und Dr. Steinbrink und Teilnahme von Jan Königsberg

13.11. Besuch von Prof. Cronje und Jarren Lange aus Johannesburg, Südafrika, mit Vorträgen am IAL

16.11. Doktorprüfung von Onur Misir

Dezember 2017

01.12. Martin Gerlach beginnt als Assistent am IAL.

04.-06.12. CTI-Symposium in Berlin mit Vorträgen von Prof. Mertens und Prof. Ponick

06.12. Nils Bothen erhält in Berlin für seine Masterarbeit den CTI Young Drive Experts Award 2017.

07.12. Doktorprüfung von Eva Bresemann

08.12. Internationales Jahresabschlusskolloquium

14.12. Doktorprüfung von Michael Dörbaum

15.12. Mohammad Ali beginnt als Assistent am IAL.

20.12. Doktorprüfung von Arvid Merkert

31.12. Letzter Arbeitstag von Nils Bothen und Bastian Weber

2018

Januar 2018

01.01. Dr.-Ing. Jens Friebe beginnt als Juniorprofessor für Passive Komponenten der Leistungselektronik am IAL.

11.-14.01. Strategieworkshop in Marianska (Erzgebirge), Erholungsheim der Tschechischen Akademie der Wissenschaften Prag

18.01. Exkursion zur Firma Infineon nach Warstein im Rahmen der Vorlesung Leistungshalbleiter und Ansteuerungen

26.01. Dr. Claus Müller, Siemens CT, hält am IAL einen Vortrag über elektrische Flugzeugantriebe

30.01. Doktorprüfung von Felix Müller-Deile

31.01. Letzter Arbeitstag von Felix Müller-Deile

Februar 2018

01.02. Feuerzangenbowle für Hiwis und Studierende

08.02. Exkursion zu LDW nach Bremen im Rahmen der Vorlesung Grundlagen der elektromagnetischen Energiewandlung

21.02. Doktorprüfung von Niklas Weber

22.02. Doktorprüfung von Bastian Weber

26.02. LE-Nord-Kolloquium an der TU Braunschweig mit einem Vortrag von Georg Lindemann und Beteiligung von Mohammad Ali, Bakr Bagaber, Marc Dokus, Dominik Reitmeier und Jun.-Prof. Friebe

März 2018

01.03. Hedieh Movagharnejad und Dominik Reitmeier beginnen als Assistenten am IAL.

05.03. Pauline Frey erhält für ihre Bachelorarbeit den Studienpreis des VDE Hannover.

22.03. Vortrag von Prof. Mertens auf der Tagung Praxisforum Antriebstechnik in Würzburg

April 2018

15.04. Marc England und Jan-Ole Stockbrügger beginnen als Assistenten am IAL.

19.04. Institutsbowling

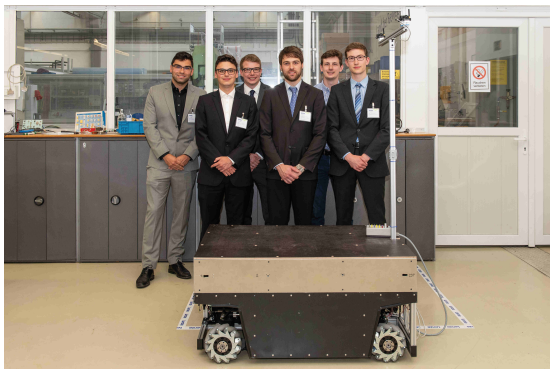
20.04. Instituts- und Festkolloquium zu Ehren von Prof. Hans-Dieter Stölting mit informativen und unterhaltsamen Vorträgen von Prof. Hans Otto Seinsch, Dr. Björn Hagemann, Dr. Georg Möller, Dr. Peter Konrad und Prof. Bernd Ponick.

24.04. Doktorprüfung von Jakub Emmrich

30.04. Letzter Arbeitstag von Tobias Krone, Marcel Moriße, Fabian Oelkers und Simon Weber

Mai 2018

03.05. Torben Fricke erhält in Bruchsal für seine Masterarbeit den Studienpreis der SEW-EURODRIVE-Stiftung.



14.-26.05. Gegenbesuch der Capstone-Gruppe der Purdue University aus den USA in Hannover

20.-24.05. Jakub Kučka und Prof. Mertens halten Vorträge auf der International Power Electronics Conference (IPEC 2018), ECE ASIA, in Niigata, Japan, und besuchen Prof. Hirofumi Akagi am Tokyo Institute of Technology.

22.-24.05. Pfingstexkursion nach Süddeutschland zu den Firmen Voith, Würth, Epcos und BSH mit den Juniorprofessoren Ebrahimi und Friebe

29.05. Doktorprüfung von Peter Juris

31.05. Hiwi-Grillen

Juni 2018

05.-07.06. Jun.-Prof. Friebe hält einen Vortrag auf der Konferenz Power Conversion and Intelligent Motion (PCIM 2018) in Nürnberg.

06.06. Das IAL zeigt wieder vollen Einsatz mit zwei Immer-Am-Limit-Teams (Fußball und Volleyball) am Tag des Hochschulsports.

13.-15.06. Vorträge von Jürgen Redlich und Stefan Urbanek auf der IEEE Transportation and Electrification Conference and Expo (ITEC 2018) in Long Beach, USA

14.06. Letzter Arbeitstag von Jonathan Jürgens

15.06. Doktorprüfung von Torben Jonsky

20.06. Mohammed Diab aus Glasgow kommt für zwei Monate als Gastwissenschaftler ans IAL.

20.06. Daniel Herwig hält einen Vortrag auf dem ECPE-Workshop Power Electronics for Wind Energy in Husum.

21.06. Prof. Jian Sun vom Rensselaer Polytechnic Institute in Albany, NY, kommt ans IAL und hält einen Vortrag.

22.06. Janine Ebersberger erhält für ihre Bachelorarbeit den Hanns-Voith-Stiftungspreis.

25.-28.06. Vortrag von Malte John beim IEEE Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL) in Padua, Italien

Juli 2018

01.07. Siqi Lin beginnt als Assistent am IAL.

05.-22.07. Prof. Mertens auf USA-Reise zum Aufbau internationaler Kontakte mit dem Georgia Institute of Technology, der Clemson University und dem Rensselaer Polytechnic Institute (DFG)

12.-13.07. Gerrit Narjes hält einen Vortrag auf dem AIAA / IEEE Electronic Aircraft Technology Symposium (EATS 2018), Cincinatti, USA.

17.07. Exkursion zur Firma Siemens nach Nürnberg im Rahmen der Vorlesung Elektrische Bahnen und Fahrzeugantriebe

24.07. Doktorprüfung von Simon Weber

30.07. Letzter Arbeitstag von Torsten Winkler

August 2018

09.08. Betriebsausflug mit Führung rund um den Hauptbahnhof und in die Geister-U-Bahnstation, Minigolf und Grillen bei Prof. Ponick

24.08. Letzter Arbeitstag der FWJlerin Marie Hanemann

September 2018

01.09. Tobias Brinker und Daniel Heide beginnen als Assistenten und Linus Götte als FWJler am IAL.

03.-06.09. International Conference on Electrical Machines 2018 (ICEM 2018) in Alexandroupolis, Griechenland, mit Vorträgen von Björn Berweiler, Torben Fricke, Gerrit Narjes, Alexander Rehfeldt, Hendrik Schröder und Stefan Urbanek

10.-14.09. Dr. Felipe Valencia aus Santiago de Chile besucht das IAL im Rahmen eines Kooperationsprojektes

12.09. Martin Gerlach erhält in München für seine Masterarbeit den DRIVE-E-Studienpreis.

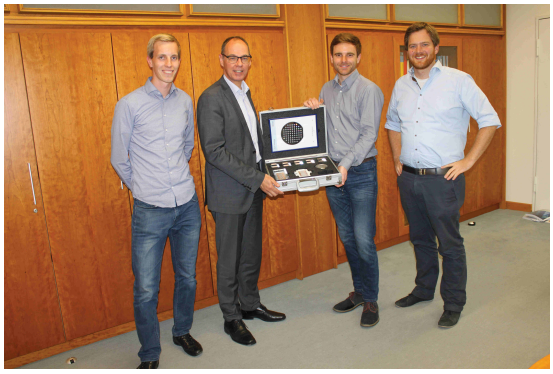
13.09. Pi2Run-Lauf mit einem Damen- sowie zwei Herrenteams im Georgengarten und anschließendem BBQ am IFES

13.-14.09. Vorträge von Prof. Mertens und Georg Lindemann auf dem IEEE 9th International Symposium on Sensorless Control for Electrical Drives (SLED) in Helsinki, Finnland

14.09. Letzter Arbeitstag von Henrik Schroeder

17.-21.09. Prof. Mertens nimmt als Topic Chair an der EPE 2018 ECCE Europe in Riga teil.

23.-27.09. Jakub Kučka hält einen Vortrag auf der IEEE Energy Conversion Congress & Exposition (ECCE 2018) in Portland, Oregon, USA.



24.09. Herr Marcel Morisse, Infineon Technologies AG, übergibt dem Fachgebiet Leistungselektronik zu Lehrzwecken einen Demokoffer mit Anschauungsobjekten.

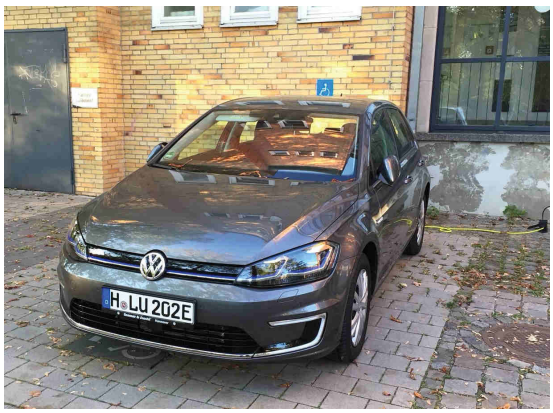
26.09. Offizielle Entscheidung für die Ausrichtung der EPE IEEE ECCE Europe 2022 in Hannover mit Prof. Mertens als Chair und Prof. Ponick als Co-Chair

27.09. Die DFG bewilligt das Exzellenzcluster Sustainable and Energy Efficient Aviation mit Beteiligung des IAL.

27.-28.09. Jan Königsberg hält einen Vortrag auf dem Symposium on Automated Systems and Technologies (AST) in Hannover.

Oktober 2018

01.10. Leon Fauth und Julius Wiesemann beginnen als Assistenten am IAL.



02.10. Festes Mitglied im IAL wird das neue Dienstfahrzeug E-Golf.

04.10. 25-jährige Institutszugehörigkeit von Meister Carsten Selke

04.-13.10. Exkursion zur Purdue University in West Lafayette, IN, USA, im Rahmen des Capstone-Projekts mit Dominik Reitmeier, Stephan Vip, Christian Seefisch (IMKT) und drei Studierenden

07.-10.10. Vortrag von Jan Königsberg auf der International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS 2018) in Jeju, Süd-Korea

12.10. Dr. Onur Misir erhält von der Victor Rizkallah-Stiftung den Förderpreis der Stiftung NiedersachsenMetall 2018 für seine herausragenden akademischen Leistungen.

21.-23.10. Jan Müller hält einen Vortrag auf der IEEE IECON 2018 in Washington D.C., USA, und beginnt anschließend einen 2-monatigen Forschungsaufenthalt an der University of Wisconsin-Madison bei Prof. Sarlioglu.

24.-26.10. Jun.-Prof. Ebrahimi hält einen Vortrag auf der 14th IEEE International Conference on Power Electronics (CIEP) in Mexico.

November 2018

01.11. Jörg-Uwe Hammer beginnt als Elektroniker am IAL.

07.-09.11. Vortag von Jun.-Prof. Ebrahimi auf der 5th International Conference on Electrical Systems (IEEE ESARS) in Nottingham, England

05.11. Doktorprüfung von André Brune

10.11. Das IAL öffnet seine Türen für "Die Nacht, die Wissen schafft" der Stadt Hannover.

12.-15.11. Ausrichtung des FEMAG-Anwendertreffens in Friedrichshafen mit über 140 Teilnehmern aus Forschung und Industrie sowie Tutorials durch Prof. Miller und Vorträgen von Prof. Ponick und Dr. Steinbrink

Dezember 2018

01.12. Max Hullman, Matthias Kalla und Frederik Stallmann beginnen als Assistenten am IAL.

03.-05.12. CTI-Symposium in Berlin mit Vorträgen von Prof. Mertens und Prof. Ponick

04.12. Marc England erhält in Berlin für seine Masterarbeit den CTI Young Drive Experts Award 2018.

10.-14.12. Jun.-Prof. Ebrahimi hält einen Vortrag auf der 4th IEEE Southern Power Electronics Conference in Singapur.

11.12. Olga Korolova erhält vom DAAD und der LUH den Preis für soziales Engagement und wissenschaftliche Leistungen.

14.12. Internationales Jahresabschlusskolloquium

15.12. Mina Mirzadeh beginnt im International Female Programm des SFB 880 als Assistentin am IAL.

17.12. Vortrag von Frau Babette Schwarz von VOITH Hydro im Rahmen des IAL-Kolloquiums

21.12. Prof. Mertens wird zum Mitglied des IEEE PELS AdCom gewählt

Veröffentlichungen 2016/17/18
Publications 2016/17/18

Aufsätze in Fachzeitschriften 2016
Journal Articles 2016

Mertens, A.; Kucka, J.
Quasi Two-Level PWM Operation of an MMC Phase Leg With Reduced Module Capacitance
IEEE Transactions on Power Electronics, vol.21, no.10, pp. 6765-6769

Misir, O.; Dobbert, F.; Ponick, B.
Analytical Method for the Air Gap Permeance Calculation of Salient Pole Synchronous Machines
in Elektrotechnik und Informationstechnik, vol. 133, issue 2, pp. 103-111

Misir, O.; Raziee, S. M.; Ponick, B.
Determination of the Inductances of Salient Pole Synchronous Machines Based on the Voltage Equation of a Single Coil in the Stator Winding
IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 52, no. 5, pp. 3792-3804

Krone, T.; Xu, C.; Mertens, A.
Fast and Easily Implementable Detection Circuits for Short-Circuits of Power Semiconductor
IEEE Transactions on Industry Applications, DOI: 10.1109/TIA.2016.2618785,

Konferenzbeiträge 2016
Conference Articles 2016

Dörbaum, M.; England, M.; Ponick, B.
Analysis of Eddy Currents Influencing an Electromagnetic Tilting Actuator
IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), Banff, Alberta, Canada, 12.-15. July 2016, pp.651-656

Dörbaum, M.; Winkel, T.; Tappe, S.; Kotlarski, T.; Ortmaier; T. Ponick, B.
Torque Measurements on an Electromagnetic Tilting Actuator
actuator 2016, Bremen, Germany, 13.-15. June 2016, pp. 398-401

Dück, P.; Lesniewski, P.; Ponick, B.
Design and Analysis of Axial-Flux Permanent Magnet Synchronous Machines as Traction Drives for Electric Vehicles
23rd International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), Capri, Italy 22.-24. June 2016, pp. 376-381

Gragger, J.; Zanon, A.; De Gennaro, M.; Juergens, J.; Fricassè, A.; Marengo, L.; Echevarria, I. O.; Kinder, J.
Design features of an innovative synchronous reluctance machine for battery electric vehicles application
SAE World Congress and Exhibition, Detroit, USA, 12.-14. April 2016

Haschen, E.
Verbesserte Vorausberechnung des Polstreuleitwerts von Schenkelpol-Synchronmaschinen
Symposium Elektromagnetismus, Technische Akademie Esslingen (TAE), Künzelsau, Germany, 16. February 2016, pp. 10

John, M.; Mertens, A.; Baruschka, L.; Alvarez, R.; Pieschel, M.
Design and Evaluation of a Test Rig for Full-Size Grid Frequency Stabilizer Modules with Ultracapacitors
18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), Karlsruhe, Germany, 05.-09. September 2016

Juergens, J.; Fricassè, A.; Marengo, L.; Gragger, J.; De Gennaro, M.; Ponick, B.
Innovative Design of an Air Cooled Ferrite Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Machine for Automotive Traction Application
International Conference on Electrical Machines (ICEM), Lausanne, Switzerland, 04.-07. September 2016

Kauth, F.; Narjes, G.; Müller, J.; Mertens, A.; Ponick, B.; Seume, J. R.
Highly Integrated Electrically Driven Active High-Lift Compressor Systems for Future Civil Aircraft
Greener Aviation 2016, Brussels, Belgium, 11.-13. Oktober 2016

Karwatzki, D.; Baruschka, L.; Dokus, M.; Kucka, J.; Mertens, A.
Branch Energy Balancing with a Generalised Control Concept for Multilevel Topologies - Using the Example of the Modular Multilevel Converter
European Conference on Power Electronics and Applications (EPE2016 ECCE-Europe), Karlsruhe, Germany, 05.-09. September 2016

Karwatzki, D.; Mertens, A.
Control Approach for a Class of Modular Multilevel Converter Topologies
IEEE Energy Conversion Congress & Exposition (ECCE 2016), Milwaukee, USA

Kucka, J.; Mertens, A.
Control for Quasi Two-Level PWM Operation of Modular Multilevel Converter
IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Santa Clara, USA, 08.-10. June 2016

Misir, O.; Potoniec, A.; Ponick, B.
Calculation of the Damper Winding Inductances of a Synchronous Machine
The 8th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD), Glasgow, Scotland, 19.-21. April 2016

Misir, O.; Görsdorf, J.; Ponick, B.
Determination of the Inductances of a Salient Pole Synchronous Machine Based on the Voltage Equation of a Single Damper Loop
23rd International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), Capri, Italy, 22.-24 June 2016, pp. 470-475

Gragger, J.; Zanon, A.; De Gennaro, M.; Juergens, J.; Fricassè, A.; Marengo, L.; Echevarria, I. O.; Kinder, J.
Calculation Method of Three-Phase Induction Machines equipped with Combined Star-Delta Windings
XXIIth International Conference on Electrical Machines (ICEM 2016), Lausanne, Switzerland, 04.-07. September, 2016, pp.168-174

Morisse, M.; Bartschat, A.; Wenske, J.; Mertens, A.
Dependency of the Lifetime Estimation of Power Modules in Fully Rated Wind Turbine Converters on the Modelling Depth of the Overall System
European Conference on Power Electronics and Applications (EPE2016 ECCE-Europe), Karlsruhe, Germany, 05.-09. September 2016

Morisse, M.; Bartschat, A.; Wenske, J.; Mertens, A.
Converter Lifetime Assessment for Doubly-Fed Induction Generators Considering Derating Control Strategies at Low Rotor Frequencies
The Science of Making Torque from Wind (TORQUE 2016) München, 05.-07. October 2016

Movagharnejad, H.; Mertens, A.
Design Optimization of Various Contactless Power Transformer Topologies for Wireless Charging of Electric Vehicles
European Conference on Power Electronics and Applications (EPE2016 ECCE-Europe), Karlsruhe, Germany, 05.-09. September 2016

Narjes, G.; Müller, J.; Kauth, F.; Seume, J.; Mertens, A.; Ponick, B.
Design Considerations for an Electrical Machine Propelling a Direct Driven Turbo Compressor for Use in Active High-Lift Systems
International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship propulsion and Road vehicles & International Transportation Electrification Conference, Toulouse, France, 02.-04. November 2016

Oelkers, F., Weber, B., Mertens, A.
Oversampling Based Approach for Open Circuit Fault Detection in PMSM Drive Systems
European Conference on Power Electronics and Applications (EPE2016 ECCE-Europe), Karlsruhe, Germany, 05.-09. September 2016

Sommer, C.; Kortazar, I., Larrazabal, I., Mertens, A.
Analytical investigation of the three-phase single active bridge for offshore applications
18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe), Karlsruhe, Germany, 05.-09. September 2016

Tappe, S.; Dörbaum, M.; Kotlarski, T.; Ponick, B.; Ortmaier, T.
Kinematics and Dynamics Identification of a Hyper-Redundant, Electromagnetically Actuated Manipulator
IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), Banff, Alberta, Canada, 12.-15. July 2016, pp. 601-607

Vip , S.-A. ; Weber, J.-N., Rehfeldt, A. ; Ponick, B.
Rotary Transformer with Ferrite Core for Brushless Excitation of Synchronous Machines
International Conference on Electrical Machines (ICEM), Lausanne, Switzerland, 04.-07. September 2016

Weber, J.-N., Rehfeldt, A. ; Vip , S.-A. ; Ponick, B.
Rotary Transformer with Electrical Steel Core for Brushless Excitation of Synchronous Machines
International Conference on Electrical Machines (ICEM), Lausanne, Switzerland, 04.-07. September 2016

Kucka, J.; Karwatzki D.; Mertens A.
AC/AC Modular Multilevel Converters in Wind Energy Applications: Design Considerations
European Conference on Power Electronics and Applications (EPE2016 ECCE-Europe), Karlsruhe, Germany, 05.-09. September 2016

Karwatzki, D.; Baruschka, L.; Dokus, M.; Kucka, J.; Mertens, A.
Branch Energy Balancing with a Generalised Control Concept for Modular Multilevel Topologies Using the Example of the Modular Multilevel Converter
European Conference on Power Electronics and Applications (EPE2016 ECCE-Europe), Karlsruhe, Germany, 05.-09. September 2016

Quattrone, F.; Ponick, B.
Evaluation of a Permanent Magnet Synchronous Machine with a Rotor Coil for Improved Self-Sensing Performance at Low Speed
XXIIth International Conference on Electrical Machines (ICEM 2016), Lausanne, Switzerland, 04.-07. September, 2016

Lammers, S.; Adam, G.; Schmid, H. J.; Mrozek, R.; Oberacker, R.; Hoffmann, M. J.; Quattrone, F.; Ponick, B.
Additive Manufacturing of a Lightweight Rotor for a Permanent Magnet Synchronous Machine
6th International Electric Drives Production Conference (EDPC), Nuremberg, Germany, 2016

Bartschat, A.; Morisse, M.; Mertens, A.; Wenske, J.
Analysis of Dynamic Interactions between Different Drivetrain Components with a Detailed Wind Turbine Model
The Science of Making Torque from Wind (TORQUE 2016) Munich, Germany, 05.-07. October 2016

Ullrich, B.; Mertens, A.
Temperature estimation for wire bondings in power semiconductor devices
European Conference on Power Electronics and Applications (EPE2016 ECCE-Europe), Karlsruhe, Germany, 05.-09. September 2016

Krone, T.; Mertens, A.
DC Link RMS Current Estimation in Systems with Several Converters Connected to a Shared DC Link with Distributed Capacitors
European Conference on Power Electronics and Applications (EPE2016 ECCE-Europe), Karlsruhe, Germany, 05.-09. September 2016

Krone, T.; Dang Hung, L.; Jung, M.; Mertens, A.
On-Line Semiconductor Switching Loss Measurement System for an Advanced Condition Monitoring Concept
European Conference on Power Electronics and Applications (EPE2016 ECCE-Europe), Karlsruhe, Germany, 05.-09. September 2016

Krone, T.; Dang Hung, L.; Jung, M.; Mertens, A.
Advanced Condition Monitoring System Based on On-Line Semiconductor Loss Measurements
IEEE Energy Conversion Congress & Exposition (ECCE 2016), Milwaukee, USA

Krupp, H.; Mertens, A.
Semi-Analytical Loss Model for Rotary Transformers
European Conference on Power Electronics and Applications (EPE2016 ECCE-Europe), Karlsruhe, Germany, 05.-09. September 2016, pp. 10

Dück, P.; Ponick, B.
A Novel Iron-Loss Model for Permanent Magnet Synchronous Machines in Traction Applications
4th International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship propulsion and Road Vehicles & International Transportation Conference (ESARS ITEC), Toulouse, France, 02.-04. November 2016

Heseding, J.; Mueller-Deile, F.; Mertens, A.
Estimation of losses in permanent magnet synchronous machines caused by inverter voltage harmonics in driving cycle operation
18th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE 2016 ECCE Europe, Karlsruhe, Germany, 05.-09. September 2016

Mertens, A.; Steinbrink, J.
Generator-Umrichter-Prüfstand zur Untersuchung elektrischer Energiewandler in Antriebssträngen
ETG Mitgliederinformationen 2/2016, pp. 4-5

Müller-Deile, F.; Heseding, H.; Ponick, B.; Mertens, A.
Bezahlbare elektrische Reichweite durch Modularität
Deutsches Ingenieurblatt 5-2016, pp. 54-60

Zulk, S.; Köneke, T.; Mertens, A.
Analytical Modeling of Plate Fin Heat Sinks for Natural Convection Cooling in Power Electronics
IEEE 13th Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Hangzhou, China, 17-.-20. Oktober 2016

Weber, B.; Brandt, T.; Mertens, A.
Compensation of switching dead-time effects in voltage-fed PWM inverters using FPGA-based current oversampling
Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2016 IEEE

Buchbeiträge 2016
Books 2016

Junginger, C.
Untersuchung der Stromverdrängung im Ständer hoch ausgenutzter Elektrischer Maschinen
Dissertation, Springer Verlag, AutoUni-Schriftenreihe, ISBN 978-3-658-17006-6

Tegeler, S.
Erweiterung von analytischen Verfahren zur Berechnung von Ummagnetisierungsverlusten in Drehfeldmaschinen
Dissertation, Papierflieger Verlag GmbH, ISBN 978-3-86948-503-4

Aufsätze in Fachzeitschriften 2017
Journal Articles 2017

Kucka, J.; Karwatzki, D.; Baruschka, L.; Mertens, A.
Modular Multilevel Converter With Magnetically Coupled Branch Inductors
IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 32, No. 9, pp. 6767-6777

Misir, O.; Ponick, B.
Determination of the inductances of synchronous machines with unsymmetrical stator winding based on the voltage equation of a single coil in the stator winding
Electrical Engineering, Archiv für Elektrotechnik, Vol. 99, Issue 2,

Misir, O.; Raziee, S. M.; Hammouche, N.; Klaus, C.; Kluge, R.; Ponick, B.
Prediction of Losses and Efficiency for Three-Phase Induction Machines Equipped with Combined Star-Delta Windings
IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 53, No. 4, pp. 3579-3587

Raziee, S. M.; Misir, O; Ponick, B.
Winding Function Approach for Winding Analysis
IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 53, No.10

Kucka, J.; Karwatzki, D.; Mertens, A.
Enhancing the Reliability of Modular Multilevel Converters Using Neutral Shift
IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 32, No. 12, pp. 8953-8957

Kanus, M.; Radosavac M.; Hoffmann, A.; Overmeyer, L.; Ponick, B.
Transferprojekt zum Thema Lineardirektantrieb für konventionelle Fördergurte
f + h fördern und heben, 10/2017, pp. 56 -59

Quattrone, F.; Ponick, B.
Maschinendesign für geberlos geregelte PMSM
e & i Elektrotechnik und Informationstechnik, vol. 134, issue 2, pp. 165-169

Konferenzbeiträge 2017
Conference Articles 2017

John, M.; Mertens, A.
Harmonic Domain Model of an Open-Loop Controlled PWM Converter
XIX International Symposium on Theoretical Electrical Engineering, Ilmenau, Germany, 16.-19.07.2017

John, M.; Mertens, A.; Popp, M.; Mathis, W.
Model Order Reduction for a Full Scale Grid Converter for Grid Simulations
European Conference on Power Electronics and Applications (EPE2017 ECCE-Europe), Warsaw, Poland, 11.-14.09.2017

Misir, O.; Spyridonidis, I.; Bothmann, F.; Dreyer, M.; Ponick, B.
Performance Analysis of Synchronous Machines after Disconnecting Stator Coils - Part I: Numerical Integration
IEEE International Electrical Machines and Drives Conference (IEMDC), Miami, 21.-24.05.2017

Misir, O.; Brand, J.; Ponick, B.
Performance Analysis of Synchronous Machines after Disconnecting Stator Coils - Part II: Analytical Steady-State Solution Method
IEEE International Electrical Machines and Drives Conference (IEMDC), Miami, 21.-24.05.2017

Morisse, M.; Bartschat, A.; Wenske, J.; Mertens, A.
Impact of Individual Pitch Control on Pitch Actuators in Megawatt Wind Turbines
European Conference on Power Electronics and Applications (EPE2017 ECCE-Europe), Warsaw, Poland, 11.-14.09.2017

Müller, J.; Mertens, A.
Power Electronics Design for a direct-driven Turbo Compressor Used as Advanced High-Lift System in Future Aircraft
IEEE-Industrial-Electronics-Society IECON17, Peking, China, 29.10-01.11.2017

Redlich, J.; Juergens, J.; Brune, K.; Ponick, B.
Synchronous Machines with Very High Torque Density for Automotive Traction Applications
IEEE International Electrical Machines and Drives Conference (IEMDC), Miami, 21.-24.05.2017

Sommer, C.; Kortazar, I., Larrazabal, I., Mertens, A.
Design of SiC-based DC-DC Converters for Future Offshore Wind Power Applications
International Conference on Silicon Carbide and Related Materials (ICSCRM), Washington, DC, 17.-22.09.2017

Urbanek, S.; Quattrone, F.; Ponick, B.
Implementation and Validation of a New Analytic-Numeric Method for Dynamic Core Loss Calculation
IEEE International Electrical Machines and Drives Conference (IEMDC), Miami, 21.-24.05.2017

Movagharnejad, H.; Mertens, A.
Design Metrics of Compensation Methods for Contactless Charging of Electric Vehicles
European Conference on Power Electronics and Applications (EPE2017 ECCE-Europe), Warsaw, Poland, 11.-14.09.2017

Luecke, S.; Mertens, A.
Self-sensing control of induction machines using an additional short-circuited rotor coil
IEEE International Symposium on Sensorless Control for Electrical Drives (SLED), Catania, Italy, 18.-19.09.2017

Popp, M.; Mathis, W.; John, M.; Korolova, O.; Mertens, A.; Ponick, B.
A Modified CCM Approach for Simulating Hierarchical Interconnected Dynamical Systems
Proc. International Symposium on Circuits and Systems, ISCAS , Baltimore, USA, pp. 12621265

Korolova, O.; de la Torre, J.; Ponick B.
Transient modeling of AC machines considering second order effects
XIX International Symposium on Theoretical Electrical Engineering, Ilmenau, Germany, 16.-19.07.2017

Korolova, O.; Popp,M ; Mathis, W.; Ponick B.
Performance of Runge-Kutta family numerical solvers for calculation of transient processes in AC machines
20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2017

Weber, B.; Lindemann, G.; Mertens, A.
Reduced observer for anisotropy-based position estimation of PM synchronous machines using current over-sampling
IEEE International Symposium on Sensorless Control for Electrical Drives (SLED), Catania, Italy

Krone, T.; Mertens A.
Optimized Design of the Electric Power Train for Wheel Hub Drive Systems Without Friction Brakes
European Conference on Power Electronics and Applications (EPE2017 ECCE-Europe), Warsaw, Poland, 11.-14.09.2017

Karwatzki, D.; Dokus, M.; Mertens, A.
Control of a three-phase to five-phase modular multilevel matrix converter based on a generalized control concept
European Conference on Power Electronics and Applications (EPE2017 ECCE-Europe), Warsaw, Poland, 11.-14.09.2017

Kauth, F.; Narjes, G; Müller, J; Seume, J.
Progress in Efficient High-Lift
AIAA Aviation and Aeronautics Forum and Exposition, 5.-9. June 2017, Denver, Colorado, USA

Meinzer, C.; Keller, C.; Korolova, O.; Ponick, B.; Seume, J.
Influence of Aerodynamic Damping on Torsional Vibrations of Turbine Shafts
Proceedings of the Global Power & Propulsion Society Zurich Forum

Buchbeiträge 2017
Books 2017

Fuchs, F.
Converter Control for Wind Turbines when Operating in Weak Grids containing Resonances
Dissertation, TIB Hannover, Univ., Diss., Online-Ress. 2017
https://edocs.tib.eu/files/e01dh17/1006264949.pdf

Jung, M.
Optimiertes multifunktionales bidirektionales Ladegerät für Elektrofahrzeuge
Dissertation, Fraunhofer Verlag, ISBN 978-3-8396-1193-7

Karwatzki, D.
Analyse und Regelung einer Klasse von modularen Multilevelumrichter-Topologien
Dissertation, TIB Hannover, Univ., Diss., Online-Ress. 2017
https://edocs.tib.eu/files/e01dh17/1002749247.pdf

Koupený, J.
Online-Parameter-Identifikation von geregelten Antriebssystemen mit Umricherspeisung
Dissertation, Papierflieger Verlag GmbH, ISBN 978-3-86948-575-1

Tischmacher, H.
Systemanalysen zur elektrischen Belastung von Wälzlagern bei umrichtergespeisten Elektromotoren
Dissertation, TIB Hannover, Univ., Diss., Online-Ress. 2017 https://www.tib.eu/de/suchen/id/TIBKAT%3A887342701/Systemanalysen-zur-elektrischen-Belastung-von-W%C3%A4lzlagern/

Sonstige Publikationen 2017
Other publications 2017

Narjes, G.; Müller, J.; Kauth, F.; Seume, J.; Mertens, A.; Ponick, B.
Kompakte elektrisch angetriebene Turbokompressoren für ein aktives Hochauftriebssystem künftiger Verkehrsflugzeuge E-MOTIVE Expertenforum Hannover

Merkert, A.; Müller, J.; Mertens. A.
Design eines SiC-Wechselrichters mit DC-DC-Wandler für Hybridfahrzeuge
E-MOTIVE Expertenforum Hannover

Mertens. A.; Ponick, B.
Elektroantriebe für Fahrzeuge - Aktuelle Forschung und Trends
E-MOTIVE Expertenforum Hannover

Steinbrink, J.; Weickhmann, J. M.
Optimisation of Magnets for Motor Design Using Field Shaping
UK Magnetics Society, 4.-5. 10. 2017, Hanau

Steinbrink, J.
Ausnutzungssteigerung von PMSM durch Nutzung von orientierungsprofilierten Magneten
25. Kleinmaschinenkolloquium, 16.-17.03.2017, Ilmenau

Aufsätze in Fachzeitschriften 2018
Journal Articles 2018

Königsberg, J.; Reiners, J.; Ponick, B. ; Denkena, B.; Bergmann, B.
Highly Dynamic Spindle Integrated Magnet Actuators for Chatter Reduction
International Journal of Automation Technology, Vol. 12, No. 5, pp. 669-677

Raziee, S. M.; Misir, O; Ponick, B.
Combined Star-Delta Winding Analysis
IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 33, No.1, pp. 383- 394

Trancho E.; Ibarra, E.; Arias, A.; Kortabarria, I.; Juergens, J.; Marengo, L.; Fricassé, A.; Gragger, J.
PM-Assisted Synchronous Reluctance Machine Flux Weakening Control for EV and HEV Applications
IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 65, No. 4, pp. 2986 - 2995

Mueller, J.-K.; Bensmann A.; Bensmann, B.; Fischer T.; Kadyk, T.; Narjes, G.; Kauth, F.; Ponick, B.; Seume, J. R.; Krewer U.; Hanke-Rauschenbach, R.; Mertens, A.
Design Considerations for the Electrical Power Supply of Future Civil Aircraft with Active High-Lift Systems
MDPI Energies, Energies 2018, 11(1), 179; doi:10.3390/en11010179

Henke, M.; Narjes, G.; Hoffmann, J.; Wohlers, C.; Urbanek, S.; Heister, C.; Steinbrink, J.; Wolf-Rüdiger Canders, W.-R.; Ponick, B.
Challenges and Opportunities of Very Light High-Performance Electric Drives for Aviation
MDPI Energies, Energies 2018, 11, 344; doi:10.3390/en11020344

Misir, O.; Raziee, S. M.; Spyridonidis, I.; Brand, J.; Bothmann, F.; Dreyer, M.; Ponick, B.
Performance Analysis of Synchronous Machines after Disconnecting Stator Coils
IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 54, No. 5, pp. 4315-4323, Sept.-Oct. 2018

John, M.; Mertens, A.
Harmonic Domain Model of an Open-Loop Controlled PWM Converter
Informatyka Automatyka Pomiary w Gospodarce i Ochronie rodowiska (IAPGOS), Vol. 8, No. 2, pp. 25-29

Wohlers, C.; Juris, P., Kabelac, S.; Ponick, B.
Design and Direct Liquid Cooling of Tooth-Coil Windings
Electrical Engineering, Volume 100, Issue 4, pp. 22992308

Konferenzbeiträge 2018
Conference Articles 2018

Denkena, B.; Bergmann, B.; Mücke, M.; Königsberg, J.; Ponick, B.
Hybrid Spindle An approach for a milling machine tool spindle with extended working range for HSC and HPC
4th International Conference on System-Integrated Intelligence, Garbsen, Germany, 19 - 20.06.2018

Kucka, J.; Mertens, A.
Common-Mode Injection Techniques for Quasi Two-Level PWM-Operated Modular Multilevel Converters
International Power Electronics Conference (IPEC 2018), Niigata, Japan, 20.-24.05.2018, pp.1904-1911

Friebe, J.; Prior, O.; Kacki, M.
High-side driver supply with reduced coupling capacitance
Power Conversion and Intelligent Motion (PCIM 2018), Nürnberg, Germany, 05.-07.06.2018

Urbanek, S.; Ponick, B.; Taube, A.; Hoyer, K.-P.; Schaper, M.; Lammers, S.; Lieneke, T.; Zimmer, D.
Additive Manufacturing of a Soft Magnetic Rotor Active Part and Shaft for a Permanent Magnet Synchronous Machine
IEEE Transportation and Electrification Conference and Expo (ITEC 2018), Long Beach, USA, 13.-15.06.2018

John, M.; Mertens, A.
Frequency-Domain Model of Voltage-Source Inverters with Closed-Loop Current Control
IEEE Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), Padova, Italy, 25.-28.06.2018

Juergens, J.; Redlich, J.; Ponick, B.
Comparison of Direct and Axle Drives with electrically excited Synchronous Machines for Traction Applications
IEEE Transportation and Electrification Conference and Expo (ITEC 2018), Long Beach, USA, 13.-15.06.2018

Narjes, G.; Kauth, F.; Müller, J.; Mertens, A.; Seume, J. R.; Ponick, B.
High-Speed Permanent Magnet Synchronous Machine for Short-Term Operation in an Electrically Powered High-Lift System
AIAA / IEEE Electronic Aircraft Technology Symposium (EATS 2018), Cincinatti, USA, 12.-13.07.2018

Narjes, G.; Ponick, B.
Novel Method for the Determination of Eddy Current Losses in the Permanent Magnets of a High-Speed Synchronous Machine
IEEE International Conference on Electrical Machines (ICEM 2018) Alexandropolis, Greece, 03.-06.09.2018

Ebrahimi, A.
Characterization of a Large Electrical Machine Test Bench for Advanced Investigations on Wind and Hydro Generators
4th IEEE Southern Power Electronics Conference, Singapore 2018 (pending publication)

Ebrahimi, A.
A Novel Harmonic Current Control Algorithm for Torque Ripple Reduction of Permanent Magnet Synchronous Motors for Traction Application
5th International Conference on Electrical Systems, IEEE ESARS, England, 2018 (pending publication)

Ebrahimi, A.
Design Optimization of Permanent Magnet Synchronous Motors using Multilevel Ant Algorithm
14th IEEE International Conference on Power Electronics, CIEP, Mexico 2018 (pending publication)

Berweiler, B.; Frey, P.; Ponick, B.
Calculation of Continuous Power Curves for Electrically Excited Synchronous Machines with Air Cooling
IEEE International Conference on Electrical Machines (ICEM 2018) Alexandropolis, Greece, 03.-06.09.2018

Urbanek, S.; Ponick, B.
Surface Eddy Current Loss Reduction in Additively Manufactured Permanent Magnet Rotor Active Parts
IEEE International Conference on Electrical Machines (ICEM 2018) Alexandropolis, Greece, 03.-06.09.2018

Rehfeldt, A.; Fricke, T.; Schwarz, B.; Bresemann, E.; Ponick, B.
Measurement of Sub-Conductor Circulating Currents in Roebel Bars of a Hydro Generator
IEEE International Conference on Electrical Machines (ICEM 2018) Alexandropolis, Greece, 03.-06.09.2018

Fricke, T.; Rehfeldt, A.; Schwarz, B.; Bresemann, E.; Ponick, B.
Analytical and Numerical Calculation of Sub-Conductor Circulating Currents in Roebel Bars of Hydro Generators
IEEE International Conference on Electrical Machines (ICEM 2018) Alexandropolis, Greece, 03.-06.09.2018

Müller, J.; Brinker, T.; Friebe, J.; Mertens, A.
Output dv/dt Filter Design and Characterization for a 10 kW SiC Inverter
IEEE IECON 2018, Washington D.C., USA, 21-23.10.2018

Königsberg, J.; Reiners, J.; Böhse, F.; Bergmann, B.; Denkena, B.; Ponick, B.
Stator-Integrated Damping of Chatter Vibrations for Induction Motor Spindles
2018 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS 2018) Jeju, Korea, 07.-10.10.2018

Königsberg, J.; Ponick, B.
Operating Characteristics of Actively Damped Motor Spindles
Symposium on Automated Systems and Technologies, (AST) Hannover, 27.-28.09.2018

Kucka, J.; Mertens, A.
Improved Current Control of a Quasi-Two-Level PWM-Operated Modular Multilevel Converter
IEEE Energy Conversion Congress & Exposition (ECCE 2018), Portland, USA, 2948-2955

Sewdien, V. N.; van der Meijden, M..; Breithaupt, T.; Hofmann, L.; Herwig, D.; Mertens, A.; Tuinema, B.; Rueda Torres, J.
Effects of Increasing Power Electronics on System Stability: Results from MIGRATE Questionnaire
IEEE PES ICUE, Phuket, Thailand, 24 26 Oct.

Buchbeiträge 2018
Books 2018

Bresemann, E.-M.
Das Stirnraumfeld und sein Einfluss auf Schlingströme bei Schenkelpolsynchronmaschinen
Dissertation, TEWISS Verlag, Berichte aus dem IAL, Band 3 ISBN: 978-3-959-00225-7

Brune, A.
Elektrisch erregte Synchronmaschinen als Fahrantriebe
Dissertation, TEWISS Verlag, Berichte aus dem IAL, Band 4 ISBN: 978-3-959-00241-7

Dörbaum, M.
Gestaltung und Analyse elektromagnetischer Kippaktoren
Dissertation,
https://www.tib.eu/de/suchen/id/TIBKAT%3A1014381304/Gestaltung-und-Analyse-elektromagnetischer-Kippaktoren/

Emmrich, J.
Dimensionierung motorintegrierter elektromagnetischer Aktoren zur Dämpfung von Rotorschwingungen
Dissertation, Papierflieger Verlag, ISBN: 978-3-869-48653-6

Juris, P.
Elektrische Antriebssysteme mit sehr hoher Drehmomentdichte für Elektro- und Hybridflugzeuge
Dissertation, TEWISS Verlag, Berichte aus dem IAL / Band 2 ISBN 978-3-95900-221-9

Merkert, A.
Untersuchungen zum Einsatz von Siliziumcarbid-Leistungshalbleitern in Traktionsantriebsumrichtern
Dissertation,
https://www.tib.eu/de/suchen/id/datacite%3Adoi 10.15488%252F3258/Untersuchungen-zum-Einsatz-von-Siliziumcarbid-Leistungstransistoren

Misir, O.
Betriebsverhalten von Synchronmaschinen mit unsymmetrischer Ständerwicklung
Dissertation, Springer Vieweg Verlag, ISBN 978-3-658-21026-7; TIB Hannover, Online-Ress.:
https://www.tib.eu/de/suchen/id/TIBKAT%3A1012120805/Betriebsverhalten-von-Synchronmaschinen-mit-unsymmetrischer/

Müller-Deile, F.
Modulare und skalierbare mehrsträngige Antriebssysteme für Elektrofahrzeuge
Dissertation, VDI-Fortschrittsbericht Nr. 418, Reihe 21, VDI-Verlag

Weber, B.
Positionsgeberlose Regelung von permanentmagneterregten Synchronmaschinen bei kleinen Drehzahlen mit überabtastender Stromerfassung
Dissertation,
https://www.tib.eu/de/suchen/id/TIBKAT%3A1016297955/Positionsgeberlose-Regelung-von-permanentmagneterregten/

Weber, J.-N.
Berührungslose Übertrager für elektrisch erregte Synchronmaschinen
Dissertation, Tewiss Verlag, Berichte aus dem IAL, Band 1, ISBN: 978-3-95900-193-9

Weber, S.
Beitrag zur Zustandsüberwachung von IGBT-Modulen mit temperatursensitiven Parametern
Dissertation, TIB Hannover, Online-Ress.:
https://www.repo.uni-hannover.de/handle/123456789/3769

Werner, T.
Geberlose Rotorlagebestimmung in elektrischen Maschinen: Spannungsbasierte Verfahren für permanentmagneterregte Synchronmotoren
Dissertation, Springer Vieweg Verlag, ISBN: 978-3-658-22270-3

Zhang, M.
Doppelgeneratorsystem für Laufwasserkraftwerke: Untersuchung des dynamischen Verhaltens, der Regelung, des Energieertrags und der Wirtschaftlichkeit
Dissertation, Repositorium der LUH, OnlineRess:
https://www.repo.uni-hannover.de/handle/123456789/3607

Sonstige Publikationen 2018
Other publications 2018

Bartschat, A.; Broer, C.; Coronado, D.; Fischer, K.; Kucka, J.; Mertens, A.; Meyer, R.; MoriSSe, M.; Pelka, K.; Tegtmeier, B.; Weber, S.; Wenske, J.
Zuverlässige Leistungselektronik für Windenergieanlagen
Projektbericht, 144 Seiten, ISBN: 978-3-8396-1326-9 (2018)

Auszeichnungen 2016/17/18
Awards 2016/17/18

2016

02.06.
Constantin Wohlers wird für seine Masterarbeit mit dem Studienpreis 2015 der SEW-EURODRIVE-Stiftung ausgezeichnet.

20.09.
Dennis Karwatzki erhält den Best Paper Award der IEEE zum Energy Conversion Congress & Exposition 2016 (ECCE) in Milwaukee, USA.

27.10.
Nabil Hammouche erhält für seine Studienarbeit den VDI-Technikpreis 2016.

2017

06.03.
Daniel Herwig erhält für seine Masterarbeit den Studienpreis des VDE Hannover.

18.03.
Auf dem 20th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2017) wird ein Beitrag mit Hedieh Movagharnejad als Coautorin mit dem Best Student Paper Award prämiert.

23.06.
Jan Andresen erhält für seine Masterarbeit den Studienpreis der SEW-EURODRIVE-Stiftung.

30.06.
Alexander Rehfeldt erhält für seine Masterarbeit den Hanns-Voith-Stiftungspreis.

26.10.
Prof. Ponick wird mit dem IEC 1906 Award der International Electrotechnical Commission ausgezeichnet.

06.12.
Nils Bothen erhält für seine Masterarbeit den CTI Young Drive Experts Award 2017.

2018

05.03.
Pauline Frey erhält für ihre Bachelorarbeit den Studienpreis des VDE Hannover.

03.05.
Torben Fricke wird für seine Masterarbeit mit dem Studienpreis der SEW-EURODRIVE-Stiftung ausgezeichnet.

22.06.
Janine Ebersberger erhält für ihre Bachelorarbeit den Hanns-Voith-Stiftungspreis.

12.09.
Martin Gerlach wird für seine Masterarbeit mit dem DRIVE-E-Studienpreis ausgezeichnet.

12.10.
Dr. Onur Misir erhält von der Victor Rizkallah-Stiftung den Förderpreis der Stiftung NiedersachsenMetall 2018 für seine herausragenden akademischen Leistungen.

04.12.
Marc England erhält für seine Masterarbeit den CTI Young Drive Experts Award 2018.

11.12.
Olga Korolova wird mit dem Preis des DAAD und des Hochschulbüros für Internationales für soziales Engagement und wissenschaftliche Leistungen ausgezeichnet.

Institut für
Antriebssysteme und
Leistungselektronik

Leibniz
Universität
Hannover

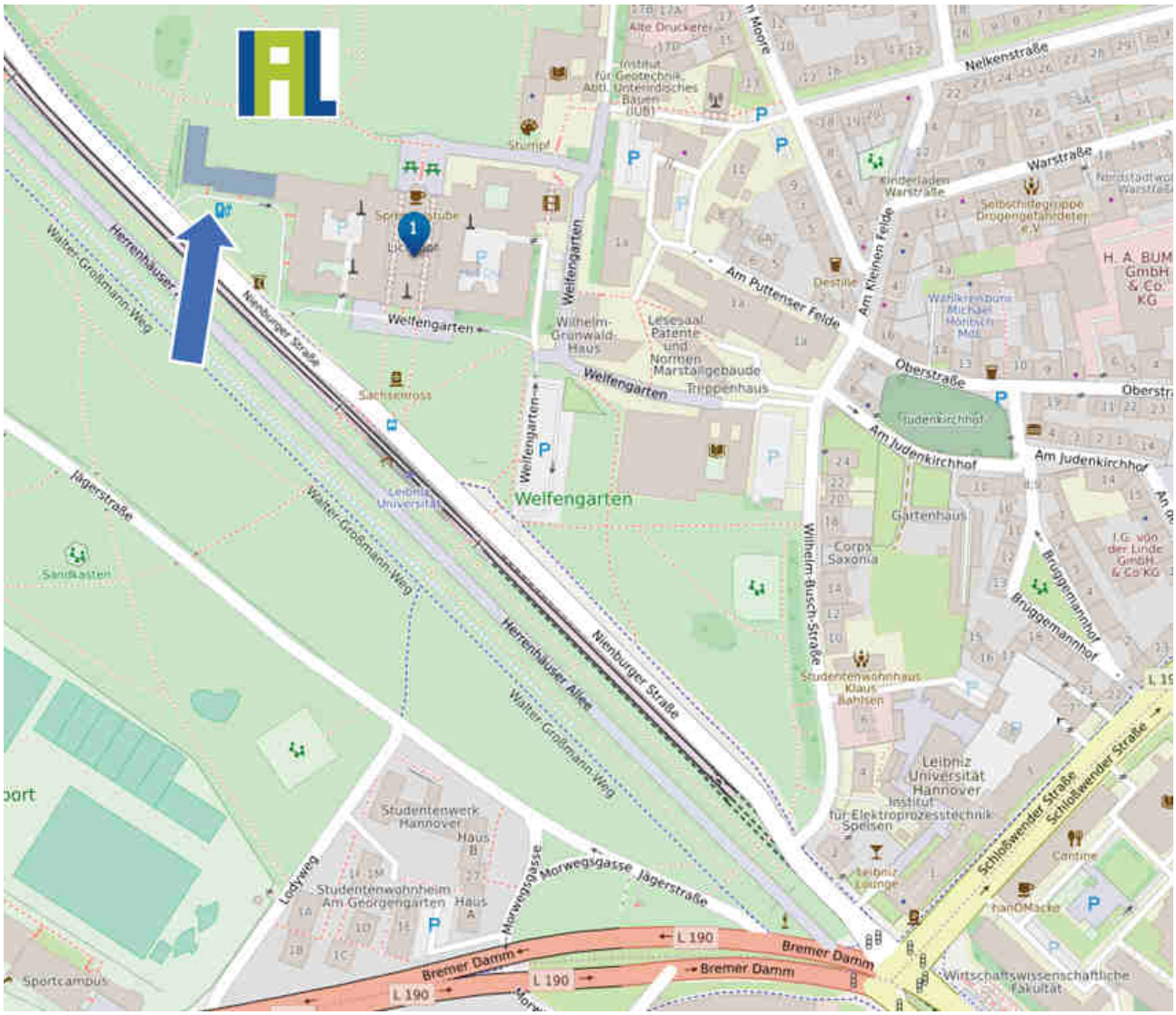
Kontakt | Contact:

Institut für Antriebsysteme und Leistungselektronik
Institute for Drive Systems and Power Electronics

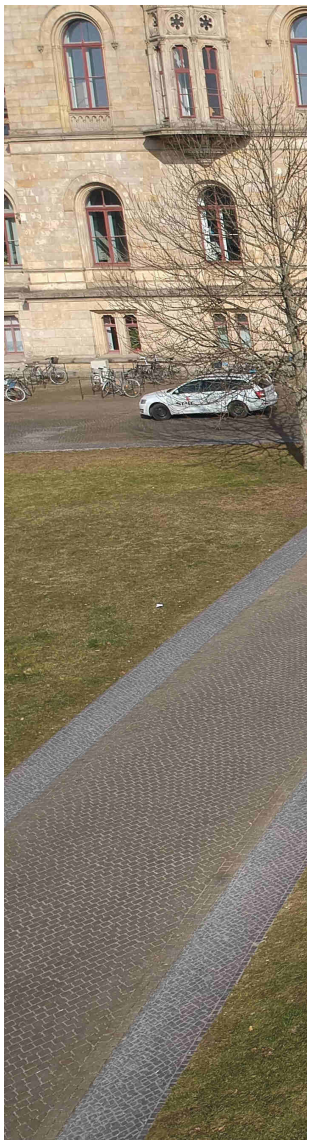
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
Welfengarten 1
D - 30167 Hannover | Germany

Tel. +49 511 762 - 2514
Fax +49 511 762 - 3040
info@ial.uni-hannover.de
www.ial.uni-hannover.de

Postanschrift:
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
Postfach 6009
30060 Hannover



Leaflet| Mapdata ©**OpenStreetMap** contributors **CC-BY-SA**



REGIONALWETTBEWERB HANNOVER