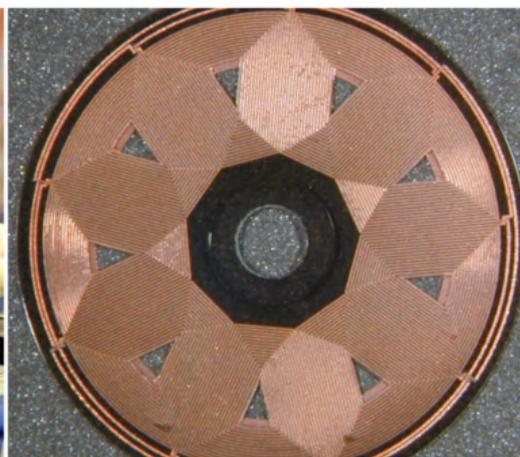
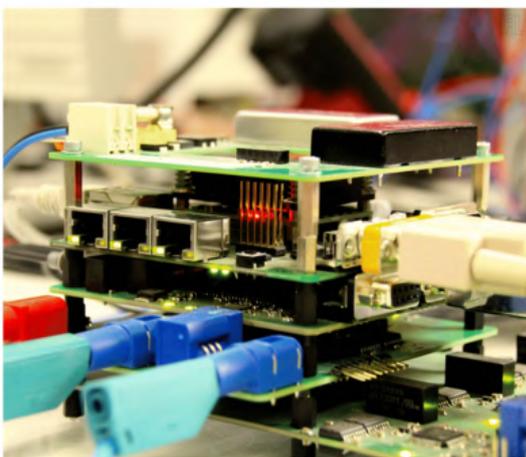




Institutsbericht | Institute Report

2019 / 2020



Impressum | Imprint

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

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

Redaktion: | **Editor:** IAL (Elfi Jeschina, Beate Pieschel, Johannes Wenzel)

Übersetzung: | **Translation:** Petra Duensing

Fotos: | **Photos:** IAL, Foto-Genz, Julian Martitz

© 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 into machine readable form as well as storage into information systems (even extracts) is only permitted with prior written consent by IAL.

Institutsbericht 2019 / 2020

Antriebsregelung

Elektrische Antriebssysteme

Elektrische Maschinen

Leistungselektronik

Institute Report 2019 / 2020

Drive Control

Drive Systems

Electrical Machines

Power Electronics

Inhaltsverzeichnis | Table of Contents

Vorwort Preface	6
Forschung am IAL: Projektberichte Research at IAL: Project Reports	8
Quasi-Zwei-Level- & Quasi-Drei-Level-Betrieb für Modulare-Multilevel-Umrichter	
Quasi-Two-Level and Quasi-Three-Level Operation Mode for Modular Multilevel Converters	8
SPP 1984 - Zuverlässiger Betrieb von umrichterdominierten Energiesystemen	
SPP 1984 - Reliable Operation of Converter-Dominated Energy Systems	10
Sensorik für die Zustandsüberwachung von Leistungselektronik für Elektrofahrzeuge	
Sensors for the Condition Monitoring of Power Electronics in Electric Vehicles	12
Positionsgeberlose Regelung permanentmagneterregter Synchronmaschinen	
Self-Sensing Control of Permanent Magnet Synchronous Machines	14
Verbesserte Verlustberechnung in Großgeneratoren	
Improved Loss Calculation in Large Generators	16
Elektrische Antriebssysteme für Flugwindkraftanlagen (SkyPower100)	
Electrical Powertrains for Airborne Wind Energy Plants (SkyPower100)	18
Additive Fertigung von Elektromotoren	
Additive Manufacturing of Electric Motors	20
Charakterisierung von elektrischen Maschinen mit magnetischen Ersatznetzwerken	
Characterization of Electrical Machines with Magnetic Equivalent Circuits	22
Akustik und Schwingungen	
Acoustics and Vibrations	24
SE ² A - Sustainable and Energy-Efficient Aviation	
SE ² A - Sustainable and Energy-Efficient Aviation	31
Fahrmotoren mit Haarnadelwicklung in Stern- oder Dreieckschaltung	
Traction motors with hairpin winding in star or delta connection	37
HF-Effekte in elektrischen Antriebssystemen	
HF Effects in Electrical Drive Systems	39
Besondere Aktivitäten Special Activities	45
Neues in und von FEMAG	
Novelties around FEMAG	45
Lehre am IAL Teaching at IAL	47
Lehrveranstaltungen	
Lectures	47
Grundlagen der elektromagnetischen Energiewandlung	
Basics of Electromagnetical Power Conversion	49
Elektrische Antriebe	
Electric Drives	50
Berechnung elektrischer Maschinen	
Theory of Electrical Machines	51
Elektrische Klein-, Servo- und Fahrzeugantriebe	
Small Electrical Motors, Servo and Vehicle Drives	52
Elektronisch betriebene Kleinmaschinen	
Small Electronically Controlled Motors	53
Elektrische Maschinen für eAutomotive-Traktionsanwendungen	
Electrical Machines for eAutomotive Traction Applications	54
Elektrische Antriebssysteme	
Electrical Drive Systems	55
Ethische Aspekte des Ingenieurberufs	
Ethical Aspects of the Engineering Profession	56
Leistungselektronik I	
Power Electronics I	57
Leistungselektronik II	
Power Electronics II	58

Einführung in das deutsche und europäische Energierecht Introduction into German and European Energy Law	59
Leistungshalbleiter und Ansteuerungen Power Semiconductors and Gate Drives	60
Regelung elektrischer Drehfeldmaschinen Control of Electrical Three-phase Machines	61
Elektrische Bahnen und Fahrzeugantriebe Electrical Traction and Vehicle Drives	62
Passive Komponenten der Leistungselektronik Passive Components in Power Electronics	63
Leistungselektronik Power Electronics	64
Wasserkraftgeneratoren Hydrogenerators	65
Elektrische Maschinen und Antriebe Electrical Machines and Drives	66
Studentische Arbeiten 2019/20 Students' Theses 2019/20	67
Dissertationen 2019/20 Dissertations 2019/20	80
Verbesserte Berechnung von Magnetfeldern und Ummagnetisierungsverlusten in elektrischen Maschinen Improved Calculation of Magnetic Fields and Iron Losses in Electrical Machines	80
Modellierung und Regelung von fünfphasigen Synchronmaschinen unter Berücksichtigung von Sättigungseffekten und Mehrfachanisotropien Modeling and Control of Five-phase Synchronous Motors under Consideration of Saturation Effects and Anisotropies	81
Berechnung des Einflusses von Dämpferwicklung und massivem Läuferballen auf den Stoßkurzschluss von Turbogeneratoren Stator, Field and Damper Windings of Large Synchronous Generators in the Event of a Sudden short-circuit	83
Parametrisierung von thermischen Modellen für permanentmagneterregte Synchronmaschinen mittels experimenteller Identifikationsmethoden Parameterization of transient thermal models for permanent magnet synchronous machines using experimental identification methods	85
Frequency-Domain Modeling of Harmonic Interactions in Pulse-Width Modulated Voltage-Source Inverter Drives Frequency-Domain Modeling of Harmonic Interactions in Pulse-Width Modulated Voltage-Source Inverter Drives	87
Baukastensysteme für den Antriebsstrang von Elektrofahrzeugen Improved Calculation of Magnetic Fields and Iron Losses in Electrical Machines	89
Beiträge zu fehlertoleranten Fahrzeugantrieben mit Radnabenmotoren ohne Reibungsbremse Contributions to Fault-tolerant Vehicle Drives with Wheel Hub Motors without Friction Brake	91
Quasi-Two-Level PWM Operation for Modular Multilevel Converters: Implementation, Analysis, and Application to Medium-Voltage Motor Drives Quasi-Two-Level PWM Operation for Modular Multilevel Converters: Implementation, Analysis, and Application to Medium-Voltage Motor Drives	93
Fehlererkennung in Antriebssystemen mit permanentmagneterregten Synchronmaschinen Fault Detection in Drive Systems with Permanent Magnet Synchronous Machines	95
Über System- und Regelungsdynamiken von Windenergieanlagen und deren Einfluss auf die Umrichterlebensdauer About System and Control Dynamics of Wind Turbines and their Impact on the Converters' Lifetime	97
Elektrisch erregte Synchronmaschinen für unterschiedliche Antriebskonzepte in Elektrofahrzeugen Electrically Excited Synchronous Machines for Different Drivetrain Topologies in Electrical Vehicles	99
Wicklungskopfflose Turbogeneratoren mit Mehrphasentransformatoren Turbogenerator Concept without Winding Overhang Using a Multiphase Transformer	101
Untersuchungen zu Ausgangsfiltern in Siliziumcarbid-Antriebswechselrichtern Untersuchungen zu Ausgangsfiltern in Siliziumcarbid-Antriebswechselrichtern	103

Das Institut The Institute	105
Mitarbeitende des IAL	
IAL Staff	105
Chronik 2019/20	
Chronicle 2019/20	117
Veröffentlichungen 2019/20	
Publications 2019/20	127
Auszeichnungen 2019/20	
Awards 2019/20	136

Vorwort | Preface

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

wer in diesen Tagen durch die Flure und Hallen des IAL streift, traut seinen Augen kaum: Gähnende Leere; man trifft kaum jemanden in den Laboren an. Statt notorisch überfüllter Gänge zur Kaffeepause nur zwei oder drei Mitarbeitende, die sich über die Entfernung hinweg einige Worte zurufen. . . So blicken wir mit dem vorliegenden Bericht auf einen Zeitraum zurück, in dem sich das gewohnte lebendige Miteinander im IAL nicht entfalten durfte. Hatte sich das erste Jahr noch ganz im Rahmen der Erwartungen bewegt, so war das zweite Jahr stark durch die Corona-Pandemie geprägt, und die damit verbundenen Einschränkungen sind gerade am IAL sehr deutlich sichtbar geworden – was sich auch in der Chronik am Ende dieser Broschüre deutlich widerspiegelt. Nichtsdestotrotz hat sich das IAL auch in den Jahren 2019 und 2020 positiv weiterentwickelt. Die beiden Juniorprofessoren Amir Ebrahimi und Jens Friebe haben kräftig in die Speichen gegriffen und nicht nur neue interessante Projekte ans IAL geholt und die entsprechenden Mitarbeiter eingestellt, sondern auch in Zeiten von Home Office und Web Meetings das Miteinander am IAL sehr positiv mitgeprägt. Beide sind inzwischen erfolgreich evaluiert worden und haben offiziell die zweite Hälfte ihrer maximal 6 Jahre am IAL begonnen. Mit dieser starken Aufstellung konnten wir die Zahl der wissenschaftlichen Mitarbeiter noch etwas erhöhen und haben inzwischen die Marke von 50 überschritten. Unsere bisherigen Räumlichkeiten reichen für diese Mitarbeiterzahl allerdings kaum oder nur ‚dank‘ der Home-Office-Regelungen aus. Umso erfreulicher ist es, dass nun – konkret im April 2021 – endlich die seit Jahren avisierte Erweiterung des IAL auf den gesamten Gebäudetrakt, d. h. um das halbe erste und das gesamte zweite Obergeschoss, beginnen wird. Dies erfordert auch erhebliche Umbauarbeiten, z. B. wegen eines erforderlichen Fluchtwegs (Feuertreppe in den Welfengarten) und der Erneuerung des Fahrstuhls. Daher werden wir das IAL für einige Monate fast vollständig räumen müssen. Home Office wird uns also auch ohne Corona noch für einen Gutteil des Jahres 2021 begleiten. Wir freuen uns aber schon jetzt, nach Abschluss der Umbauarbeiten endlich moderne und der Mitarbeiterzahl entsprechende Büro-, Besprechungs-, Aufenthalts- und Seminarräume zur Verfügung zu haben. So blicken wir nach vorn und hoffen, dass unabhängig von der IAL-Erweiterung zumindest in der zweiten Jahreshälfte 2021 das Miteinander wieder etwas normaler verlaufen kann als im vergangenen Jahr. Da wir immer über zwei Jahre berich-

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

If you wander through the corridors and halls of the IAL these days, you can hardly believe your eyes: yawning emptiness; almost no one is around in the laboratories. Instead of notoriously overcrowded corridors for the coffee break, there are only two or three employees who exchange a few words over the distance. With this report, we take a look back at a period during which the typical lively cooperation at the IAL could not develop. While 2019 was still in line with expectations, 2020 was strongly influenced by the Corona pandemic, and the associated restrictions have become clearly visible, especially at the IAL – which is also mirrored in the chronicle at the end of this brochure. Nevertheless, the IAL has continued to make positive progress in 2019 and 2020. The two junior professors, Amir Ebrahimi and Jens Friebe, not only brought new interesting projects to the IAL and hired the corresponding staff, but also had a very positive impact on the cooperation at the IAL in times of home office and web meetings. Both have now been successfully evaluated and have officially begun the second half of their maximum 6 years at the IAL. Based on this strong position, we have been able to increase the number of academic staff even further and have now exceeded the 50 mark. However, our current premises are barely sufficient for this number of employees, or only thanks to home office arrangements. It is therefore all the more pleasing that now - specifically in April 2021 - the long-awaited extension of the IAL to the entire wing of the building, i. e. half of the first floor and the entire second floor, will finally begin. This also requires considerable reconstruction work, e. g. because of a necessary escape route (fire escape to the Welfengarten) and the renewal of the lift. Therefore, we will have to almost completely vacate the IAL for a few months. So even without Corona, home office will still be with us for a good part of 2021. However, we are already looking forward to finally having modern office, meeting, recreation and seminar rooms that are fitting the number of employees once the renovation work is completed. So we look ahead and hope that, irrespective of the IAL extension, at least in the second half of 2021 our cooperation will be a little more normal again than in the past year. As we always report on two years, we would like to mention the big event that we will organise in 2022: We have brought one of the world's largest specialist conferences on power electronics and its applications, the EPE-ECCE Europe, to Hannover. There is a lot to prepare and organise, which we are fortunately doing in close cooperation with

ten, sei auch das große Ereignis schon angesprochen, das uns im Jahr 2022 ins Haus steht: Wir haben eine der weltgrößten Fachtagungen zur Leistungselektronik und ihren Anwendungen, die EPE-ECCE Europe, für 2022 nach Hannover geholt. Dafür gibt es sehr viel vorzubereiten und zu organisieren, was wir glücklicherweise im Schulterschluss mit der EPE Association, mit Kenzler Conference Management aus Hannover und mit den Fachkolleginnen und -kollegen aus Norddeutschland tun, die uns im „Local Organising Committee“ unterstützen. Dafür werden wir dann vom 5. bis zum 9. September 2022 ca. 1000 Teilnehmer aus aller Welt im HCC und in der Leibniz Universität begrüßen dürfen. Wir hoffen dabei auch auf Ihre Unterstützung, sei es durch eine organisatorische Mitwirkung, durch Fachbeiträge, durch eine Beteiligung an der Ausstellung oder sogar durch ein PR-wirksames Sponsoring der Tagung. Über die Entwicklungen und Fortschritte des IAL in Forschung und Lehre sowie zu Veränderungen in der Mitarbeiterschaft über die vergangenen zwei Jahre hinweg können Sie sich auf den folgenden Seiten informieren. Wir wünschen Ihnen eine interessante Lektüre und alles Gute für die kommende Zeit!

Hannover, im Dezember 2020



the EPE Association, with Kenzler Conference Management from Hanover and with our colleagues from Northern Germany who support us in the "Local Organising Committee". In return, we will be able to welcome around 1000 participants from all over the world to the HCC and Leibniz Universität from 5 to 9 September 2022. We also hope for your support, be it through organisational participation, expert contributions, participation in the exhibition or even through PR-effective sponsoring of the conference. On the following pages, you can learn about the developments and progress of the IAL in research and teaching as well as about changes in the staff over the past two years. We hope you enjoy reading and wish you all the best for the time to come!

Hannover, December 2020



Forschung am IAL: Projektberichte

Research at IAL: Project Reports

Quasi-Zwei-Level- & Quasi-Drei-Level-Betrieb für Modulare-Multilevel-Umrichter

von Malte Lorenz, M.Sc.

In den vergangenen Jahren konnte der Quasi-Zwei-Level-Betrieb für modulare Multilevel-Umrichter (MMC) (siehe Abb. 1) als attraktives Konzept für drehzahlvariable Mittelspannungsantriebe identifiziert werden. Der größte Vorteil ist, dass die Modulkondensatoren im Vergleich zu den herkömmlichen Betriebsmodi stark reduziert werden können, was zu einer deutlichen Senkung des Bauvolumens und der Kosten des Umrichters führt. Die positiven Eigenschaften von MMCs, wie die einfache Spannungsskalierbarkeit und niedrige Ausgangsspannungsteilheit, bleiben dabei erhalten. Im Rahmen einer Dissertation am IAL [1] wurde der Quasi-Zwei-Level-Betrieb optimiert und unterschiedliche Modulations- sowie Regelungsverfahren untersucht, welche an einem Prüfstand experimentell validiert wurden (siehe Abb. 2). Die Vorteile in der Dimensionierung des Umrichters gegenüber den herkömmlichen Betriebsmodi wurden für unterschiedliche Lastkennlinien herausgearbeitet. Weiterhin wurde für den Betriebsmodus ein verbessertes Drosseldesign entwickelt.

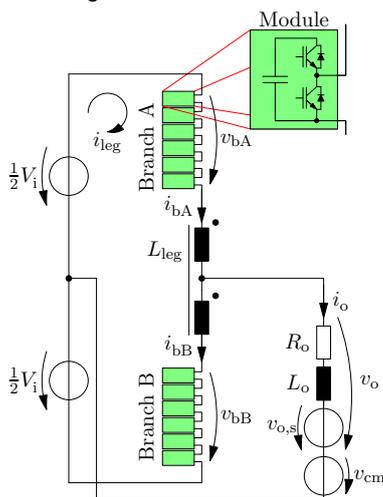


Abb. 1: Einphasiges Ersatzschaltbild eines MMCs
Fig. 1: Single-phase equivalent circuit diagram of an MMC

Der größte Nachteil des Betriebsmodus liegt in den erhöhten Oberschwingungen der Ausgangsspannung, die etwa denen eines Zweipunkt-

Quasi-Two-Level and Quasi-Three-Level Operation Mode for Modular Multilevel Converters

by Malte Lorenz, M.Sc.

In recent years, the quasi-two-level operation for modular multilevel converters (MMC) (see Fig. 1) has proven to be an attractive concept for variable-speed medium-voltage drives. The biggest advantage is that the module capacitors can be greatly reduced compared to conventional operation modes, which leads to a significant reduction of the converters' volume and cost. Positive characteristics of MMCs, such as voltage scalability and low output voltage slope, are preserved.

Within the scope of a PhD thesis [1] at the IAL, the quasi-two-level operation mode was optimized and different modulation and control methods were investigated and experimentally validated on a test bench (see Fig. 2). The advantages of the converter design compared to conventional operation modes were worked out for different load curves. Moreover, an improved inductor design was developed for the operation mode.

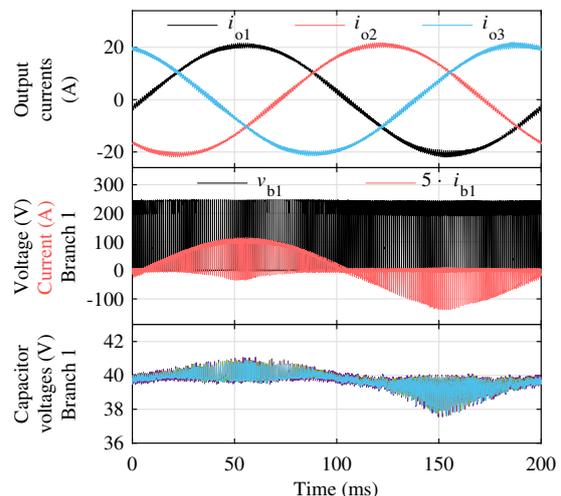


Abb. 2: Experimentelle Verifizierung am Prüfstand
Fig. 2: Experimental verification on the test bench

The main disadvantage of the operation mode is that the output voltage harmonics are similar to those of a conventional two-level inverter.

In order to improve the harmonic behaviour, based on the quasi-two-level operation, the quasi-three-level operation mode has been presented for an ex-

Wechselrichters entsprechen.

Um das Oberschwingungsverhalten zu verbessern, wurde kürzlich, basierend auf dem Quasi-Zwei-Level-Betrieb, der Quasi-Drei-Level-Betrieb für eine erweiterte MMC-Topologie vorgeschlagen, wobei ein zusätzlicher Pfad aus weiteren Vollbrückenmodulen notwendig ist (siehe Abb.3). Dazu wurde eine spezielle Regelung am IAL entworfen. Durch die Regelung aller Zweigströme konnten die Eingangskondensatoren und die Modulkondensatoren sowie die Spitzenwerte der Zweigströme weiter reduziert werden [2]. Durch eine erweiterte Vorsteuerung ist es ebenfalls möglich, den zusätzlichen Pfad aus Vollbrückenmodulen durch einen bidirektionalen Schalter zu ersetzen (siehe Abb.4). Dabei ermöglicht das Regelungsverfahren Soft-Switching des bidirektionalen Schalters. Diese reduzierte Topologie verspricht somit gesenkte Kosten und gesteigerte Effizienz im Vergleich zur Topologie mit Vollbrückenmodulen. Die Topologie und das Regelungsverfahren befinden sich zurzeit in der Patentanmeldung. Derzeit wird der Prüfstand erweitert, an dem zukünftig der Quasi-Drei-Level-Betrieb auf den nächsten Technologie-Reifegrad angehoben werden soll.

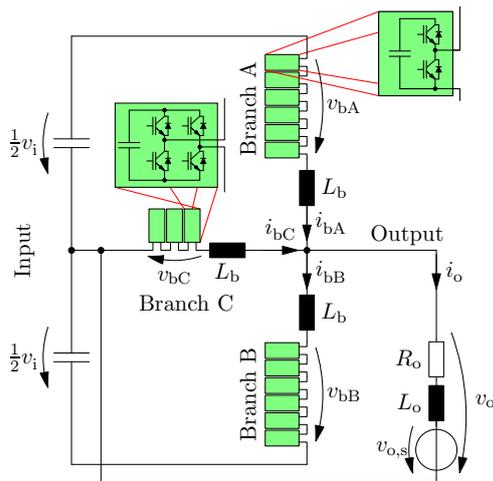


Abb. 3: Drei-Level-MMC-Topologie mit zusätzlichem Vollbrückenweig (Branch C)

Fig. 3: Three-level MMC topology with an additional branch containing full-bridge modules (branch C)

- [1] J. Kucka. "Quasi-two-level PWM operation for modular multilevel converters: implementation, analysis, and application to medium-voltage drives". Diss. Leibniz University Hannover, 2019, S. 1–226.
- [2] M. Lorenz, J. Kucka und A. Mertens. "Active Current and Energy Control for the Quasi-Three-Level Operation Mode of an Extended Modular Multilevel Converter Topology". In: *European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'20 ECCE Europe)*. accepted for publication, 2020.

tended MMC topology, which introduces an additional current path, stacked with full-bridge modules (see Fig.3). For this topology, a special control has been developed at the IAL. By controlling all branch currents, a further reduction of the input capacitors and module capacitors as well as the peak branch currents is feasible [2]. With an extended feedforward control, it is also possible to replace the full-bridge modules in the additional current path by a single bidirectional switch (see Fig.4). Furthermore, the control method allows soft switching of the bidirectional switch. This reduced topology promises lower costs and increased efficiency compared to the topology with full-bridge modules. The topology and the control method are currently in a patent application process. The test bench is currently expanded to lift the quasi-three-level operation mode to the next technology readiness level.

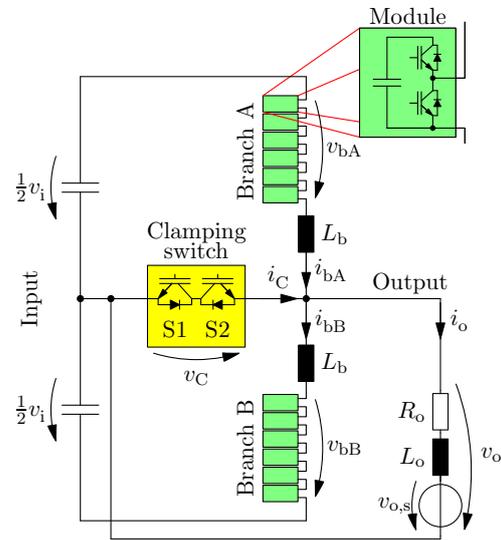


Abb. 4: Drei-Level-MMC-Topologie mit einem bidirektionalen Schalter (Clamping Switch)

Fig. 4: Three-level MMC topology with one bidirectional switch (clamping switch)

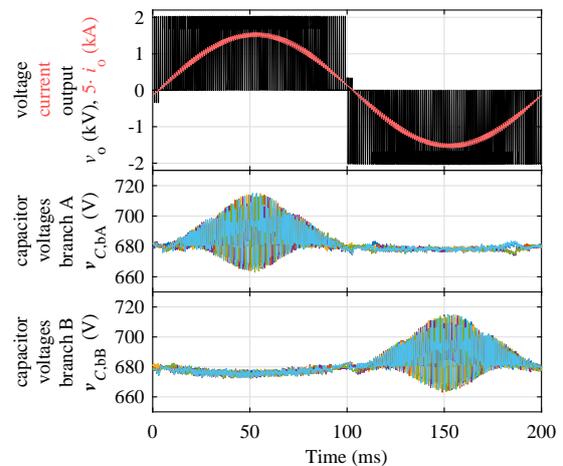


Abb. 5: Quasi-Drei-Level-Betrieb der reduzierten Topologie

Fig. 5: Quasi-three-level operation mode of the reduced topology

SPP 1984 - Zuverlässiger Betrieb von umrichterdominierten Energiesystemen

von Robin Strunk, M.Sc.
und Marc Dokus, M.Sc.

Das Stromnetz der Zukunft wird durch dezentrale Energieerzeugungsanlagen geprägt, die über leistungselektronische Umrichter angebunden sind. Gleichzeitig eröffnet die fortschreitende Digitalisierung neue Möglichkeiten der automatisierten Kommunikation und des Datenaustauschs. Gemeinsam mit den Partnerinstituten IfES und OFFIS werden in diesem Projekt des DFG-geförderten Schwerpunktprogramms 1984 neue Strategien zum Betrieb dieser zukünftigen Energiesysteme entwickelt.

Wenn zunehmend konventionelle Kraftwerke mit Synchrongeneratoren abgeschaltet werden, müssen stattdessen Umrichter das Netz stabilisieren. Dies erfordert neue Regelungskonzepte für Umrichter, die das Verhalten einer Synchronmaschine emulieren oder auf andere Art und Weise die Netzspannung und -frequenz stützen. Die Stabilitätseigenschaften dieser Umrichterregelungen müssen untersucht werden, um durch Wahl der Regelungsparameter verhindern zu können, dass Resonanzen im Netz angeregt werden.

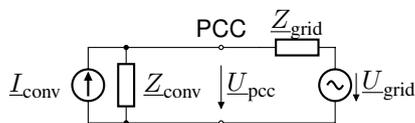


Abb. 6: Vereinfachtes Schaltbild mit einem Umrichter als Ersatzstromquelle und dem Netz als Ersatzspannungsquelle.

Fig. 6: Simplified circuit diagram with a converter as equivalent current source and the grid as equivalent voltage source.

Eine Methode zur Stabilitätsanalyse beruht auf dem Vergleich der Ausgangsimpedanz eines Umrichters mit der Netzimpedanz. Das elektrische Verhalten von Umrichter und Netz wird um einen Betriebspunkt linearisiert, sodass sie jeweils als Ersatzstromquelle (Norton-Äquivalent) oder Ersatzspannungsquelle (Thévenin-Äquivalent) beschrieben werden können, die am Anschlusspunkt (PCC) verbunden sind. Dies ist in Abb. 6 dargestellt. Die Umrichterimpedanz wird neben den verbauten Filterschaltungen maßgeblich durch die Regelung beeinflusst, während die Netzimpedanz durch Leitungen und andere Betriebsmittel bestimmt wird.

Es wurden Impedanzmodelle der gängigsten Umrichterregelungen zur Netzstützung entwickelt. Abb. 7 zeigt beispielhaft ein Bode-Diagramm zum Vergleich von drei unterschiedlichen Regelungen [3]. Während sich für niedrige und hohe Frequenzen

SPP 1984 - Reliable Operation of Converter-Dominated Energy Systems

by Robin Strunk, M.Sc.,
and Marc Dokus, M.Sc.

The electricity grid of the future will be shaped by distributed energy resources that are connected by power electronic converters. Beyond that, the advancing digitalisation offers new possibilities for automated communication and data exchange. New strategies for the operation of these future energy systems are developed within this project of the DFG-funded Priority Programme 1984 together with the partner institutes IfES and OFFIS.

If more and more conventional power stations with synchronous generators are shut down, converters will have to stabilise the grid instead. This requires new control concepts for converters that emulate the behaviour of a synchronous machine or support the grid voltage and frequency in a different way. The stability characteristics of these converter controls have to be investigated to prevent the excitation of resonances in the grid by selecting appropriate control parameters.

One method for stability analysis is based on the comparison of the output impedance of a converter with the grid impedance. The electrical behaviour of the converter and the grid is linearised for one operation point, so that they can each be described as an equivalent current source (Norton equivalent) or equivalent voltage source (Thévenin equivalent) connected at the point of common coupling (PCC). That is depicted in Fig. 6. In addition to the filter circuits installed, the converter impedance is significantly influenced by the control system, while the grid impedance is determined by power lines and other equipment.

Impedance models of the most common grid-forming converter controls were developed. Fig. 7 exemplarily shows a Bode plot in order to compare three different controls [3]. While the behaviour is similar for low and high frequencies, significant differences in magnitude and phase of the impedances can be observed around the fundamental grid frequency. The analytic models were validated by simulations and tests in a laboratory grid.

Apart from stability analysis, the grid impedance at the fundamental frequency is also important for the control design of a converter. It influences the inner current control as well as the droop characteristics for frequency and voltage control in the grid. Additionally, changes in the grid impedance can indicate a grid operating in islanding mode. Therefore, the second focus is to measure the grid impedance using converters. In this context, a method was devel-

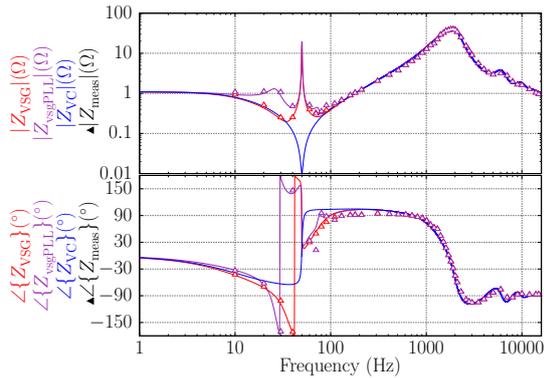


Abb. 7: Bode-Diagramm zum Vergleich der berechneten Ausgangsimpedanz eines Umrichters mit drei verschiedenen Regelungskonzepten zur Netzunterstützung inklusive Messergebnissen.

Fig. 7: Bode plot for comparing the calculated output impedance of a grid-forming converter with three different control concepts including measurement results [3].

das gleiche Verhalten zeigt, gibt es im Bereich um die Netzfrequenz große Unterschiede in Betrag und Phase der Impedanzen. Die analytischen Modelle wurden durch Simulationen und Versuche in einem Labornetz validiert.

Abgesehen von der Stabilitätsanalyse ist die Netzimpedanz, besonders bei der Grundfrequenz, im Reglerdesign eines Umrichters relevant. Sowohl die innere Stromregelung als auch Statiken zur Frequenz- und Spannungsregelung im Netz werden durch diesen Wert beeinflusst. Zusätzlich können Änderungen der Netzimpedanz zur Erkennung eines Inselnetzzustands genutzt werden. Aus diesem Grund liegt ein zweiter Schwerpunkt des Projekts auf der Messung der Netzimpedanz durch Umrichter. In diesem Zusammenhang wurde eine Methode entwickelt und experimentell untersucht, bei der ein niederfrequentes harmonisches Spannungssignal in das Netz injiziert wird. Durch Messung der Ströme und Spannungen am PCC vor und während der Einspeisung kann die Impedanz bestimmt werden. Ein digitales Filter extrahiert dafür die entsprechende Frequenzkomponente aus den Messwerten.

Das Verfahren wurde dahingehend optimiert, die Störung des Netzes gering zu halten. Ein Algorithmus löst eine erneute Messung nur dann aus, wenn ein aktueller Messwert benötigt wird. Zusätzlich wurde im Labor die Messgenauigkeit in Abhängigkeit der Amplitude des injizierten Signals und der Abtastfrequenz untersucht. Das Ergebnis für den induktiven Anteil der Netzimpedanz ist für einen Testfall in Abb. 8 dargestellt. Daraus lässt sich ableiten, dass Abtastfrequenzen im Bereich von 10 kHz, wie sie bei modernen Umrichtern im unteren und mittleren Leistungsbereich bereits üblich sind, und Spannungsamplituden von wenigen Volt ausreichend sind [4].

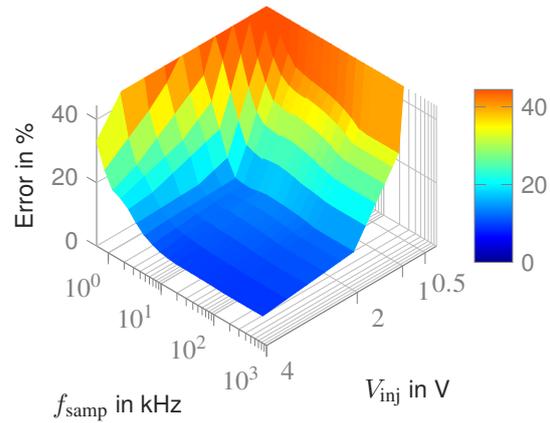


Abb. 8: Standardabweichung der gemessenen Netzinduktivität in % (Referenz 0,45 mH) in Abhängigkeit von der Abtastfrequenz und der Amplitude der injizierten Spannung.

Fig. 8: Error of the measured grid inductance in % (reference 0.45 mH) dependent on the sampling frequency and the amplitude of the injected voltage [4].

oped and investigated experimentally that injects a low-frequency harmonic voltage signal in the grid. The impedance can then be determined by measuring the currents and voltages at the PCC before and during the injection. A digital filter extracts the frequency component of interest from the measurement values.

The method was optimised to keep the distortion of the grid as low as possible. An algorithm starts a new measurement only if a new value is required. Additionally, the measurement accuracy was determined in the laboratory in dependence of the amplitude of the injected signal and the sampling rate. The result for the inductive part of the grid impedance is depicted in Fig. 8 for one test case. It can be concluded that sampling rates in the range of 10 kHz are sufficient. These rates are already state of the art for converters in the low and medium power range. Furthermore, a few volts are sufficient as the amplitude of the injected signal.

- [3] M. Dokus and A. Mertens. "Sequence Impedance-based Stability Analysis of AC Microgrids Controlled by Virtual Synchronous Generator Control Methods". In: *2020 21st IFAC World Congress on Automatic Control*. 2020.
- [4] N. Himker, R. Strunk, and A. Mertens. "Grid Impedance Estimation with Oversampling for Grid Connected Converters". In: *EPE'20 ECCE Europe*. 2020.

Sensorik für die Zustandsüberwachung von Leistungselektronik für Elektrofahrzeuge

von Daniel Herwig, M.Sc.

Das Projekt ZuLeSELF hat zum Ziel, kritische Betriebszustände in Elektrofahrzeugen zu vermeiden, die durch den Ausfall der leistungselektronischen Komponenten entstehen können.

Bei klassischen Verbrennerfahrzeugen tritt ein ungewolltes Fahrverhalten als Vorbote eines kommenden, noch größeren Schadens auf. Der/die Fahrer/in kann in diesem Fall eine Werkstatt aufsuchen. Bei Elektrofahrzeugen können Schäden der Leistungselektronik ohne zusätzliche Zustandsüberwachung nur schwer rechtzeitig erkannt werden. Als Folge kann ein unvorhergesehener Ausfall des elektrischen Systems einen kritischen Fahrzustand verursachen. Mit dem Aufkommen teilautonomer Fahrzeuge bekommt diese Thematik besondere Bedeutung, da der/die Fahrer/in nicht mehr dauerhaft die volle Kontrolle über das Fahrzeug haben muss.

Am IAL werden Zustandsüberwachungskonzepte auf Basis von Thermo-Sensitiven Elektrischen Parametern (TSEPs) untersucht. Im Fokus steht die Erkennung thermomechanischer Schädigungen an schnellschaltenden SiC-Leistungsmodulen. Es wird Hardware entwickelt, die anhand des Schalt- und Durchlassverhaltens die Sperrschichttemperatur der Leistungshalbleiter, Bonddrahtschäden oder Lot-schichtdegradation erkennen soll.



Abb. 9: Messschaltung zur Erfassung der Schaltzeiten von SiC-Leistungsmodulen

Fig. 9: Circuitry for measuring switching times of a SiC power module

Sensors for the Condition Monitoring of Power Electronics in Electric Vehicles

by Daniel Herwig, M.Sc.

The aim of the project ZuLeSELF is to avert dangerous driving situations in electric vehicles caused by the failure of power-electronic components.

When a conventional combustion engine degrades, the failure of the system is usually preceded by notable changes in the vehicle behaviour. The driver can then go to a car repair shop. In power electronics, a failure may occur quite suddenly. Without condition monitoring, it is unlikely that an imminent failure is detected in time for preventive maintenance. With the increasing trend towards semi-autonomous vehicles, condition monitoring becomes particularly important, since there is no longer the need for the driver to be in permanent control of the vehicle.

The IAL investigates condition monitoring concepts based on Temperature-Sensitive Electrical Parameters (TSEPs). The focus is on the detection of thermomechanical degradation of fast-switching SiC power modules. Dedicated hardware is developed to detect the junction temperature of the power semiconductors, bond wire damage or solder layer degradation based on the switching and conducting characteristics of the modules.

TSEP-based methods are already widely used in the laboratory, but there are additional challenges for the monitoring of an inverter during normal operation. The sensitivity of TSEPs often varies greatly over the operating range. Calibration data are not fully transferable between different operating conditions. The switching and conducting behaviour is largely determined by the gate driver. Small variations of the gate driver voltages may have severe impact on the TSEP-based temperature estimation. Measuring all dependencies would lead to a complex measurement system.

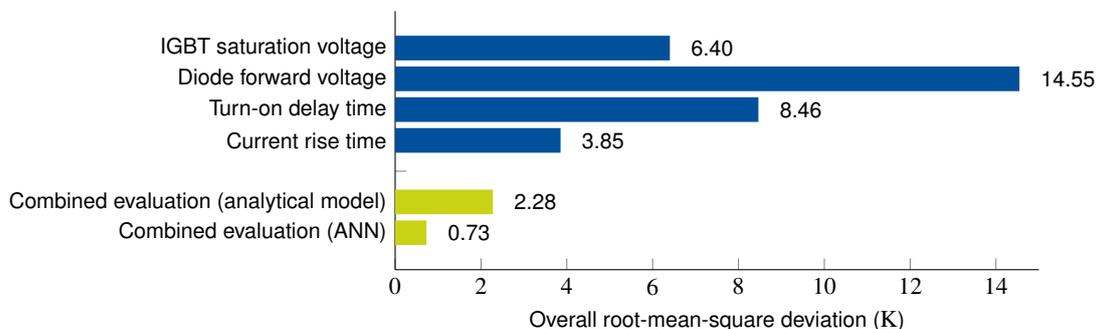


Abb. 10: Vergleich der mittleren quadratischen Abweichung von einzelnen TSEPs (blau) und kombinierten Verfahren (grün) [5]

Fig. 10: Comparison of the overall root-mean-square deviation of individual TSEPs (blue) and combined concepts (green) [5]

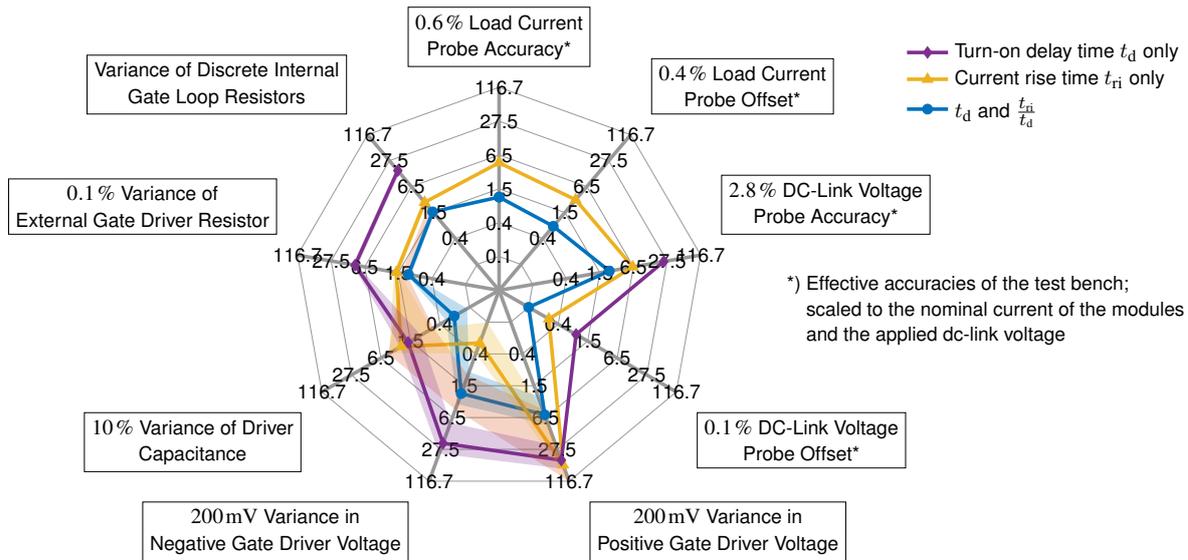


Abb. 11: Zusätzliche mittlere quadratische Abweichung in Kelvin (logarithmisch) für verschiedene parasitäre Störgrößen; die transparenten Flächen stellen die abgeschätzte Spannweite auf Grund der Nichtlinearität der Gatekapazität dar [6]

Fig. 11: Additional root-mean-square deviation in Kelvin to be expected with regard to different parasitic effects (log scale); transparent areas indicate the estimated range of the deviation, due to the uncertainty in gate capacitance [6]

TSEP-basierte Messverfahren sind im Labor bereits weitverbreitet. Für die Überwachung eines Fahrzeugumrichters im regulären Betrieb ergeben sich allerdings weitere Herausforderungen. Die Sensitivität der TSEPs variiert häufig stark über den Betriebsbereich. Kalibrierdaten sind nicht uneingeschränkt zwischen verschiedenen Betriebsbedingungen übertragbar. Das Schalt- und Durchlassverhalten wird maßgeblich durch den Gate-treiber bestimmt. Leichte Schwankungen der Gate-spannung können starken Einfluss auf die TSEP-basierte Temperaturbestimmung haben, sind jedoch nur schwer direkt erfassbar.

Im Rahmen des Projektes wird die Kombination mehrerer TSEPs als Lösungsansatz untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass eine geeignete Auswahl an TSEPs die Genauigkeit der Bestimmung der Sperrschichttemperatur über den Betriebsbereich verbessert, siehe Abb. 10. Dabei wurde die Kombination mittels Künstlicher Neuroner Netze (Artificial Neural Networks, ANNs) und analytischer Fitfunktionen verglichen.

Weiter wurde die Größe der zu erwarteten Parasitäreffekte an kommerziell eingesetzten Modulen und Treibern bestimmt. Über analytische Modelle des Schaltvorgangs wurde der resultierende Fehler auf die Temperaturbestimmung über TSEPs abgeschätzt. Dabei konnte gezeigt werden, dass eine geschickte Vorverarbeitung und Kombination mehrerer TSEPs die Robustheit gegen parasitäre Störgrößen verbessern kann, siehe Abb. 11.

Im weiteren Verlauf des Projektes werden SiC-Module künstlich gealtert und regelmäßig mit dem Messsystem geprüft. Ziel ist es, zu testen, ob das TSEP-Messsystem die Alterung rechtzeitig erkennt.

In the context of the project, the approach is to investigate the combination of several TSEPs. It was shown that an appropriate selection of multiple TSEPs improves the accuracy of junction temperature estimation over the operating range, see Fig. 10. Artificial Neural Networks (ANNs) and analytical fitting functions were compared as a means to combine several TSEPs into one temperature estimate. Furthermore, the size of parasitic effects to be expected was determined using commercial modules and drivers. The resulting error in temperature estimation was evaluated with analytical models of the switching process. The results show that the combination of several TSEPs and a suitable selection of pre-processing can improve the robustness against parasitic influences, see Fig. 11.

In the course of the project, SiC modules will be artificially aged and periodically monitored with the measurement system. The objective is to test whether the TSEP measurement system detects degradation in sufficient time.

This work was funded by the German Federal Ministry of Education and Research under the funding code 16EMO0325. The authors are responsible for the content of this publication.

- [5] D. Herwig, T. Brockhage, and A. Mertens. "Combining multiple temperature-sensitive electrical parameters using artificial neural networks". In: *2020 22nd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'20 ECCE Europe)*. 2020, pp. 1–10.
- [6] D. Herwig, T. Brockhage, and A. Mertens. "Impact of Parasitics in Power Modules and Gate Drivers on TSEP-based Temperature Estimations". In: *2020 23rd ICEMS*. IEEE. 2020.

Positionsgeberlose Regelung permanentmagneterregter Synchronmaschinen

von Georg Lindemann, M.Sc.
und Niklas Himker, M.Sc.

Die dynamische Regelung einer permanentmagnet-erregten Synchronmaschine (PMSM) erfordert die Rotorlageinformation der Maschine, welche nach Stand der Technik durch einen an der Welle montierten Geber erfasst wird. Aktuelle Forschungsarbeiten am IAL befassen sich damit, dieses Bauteil überflüssig zu machen, um Kosten, Bauraum und Ausfallwahrscheinlichkeit des Antriebsstranges zu reduzieren. Der dafür genutzte Prüfstand ist in Abb. 13 dargestellt. Im Gegensatz zu den Betriebsbereichen mit höherer Drehzahl ($> 5 - 10\%$ Bemessungsdrehzahl), in denen die Gegenspannung der PMSM ausgewertet wird, befasst sich das aktuelle Forschungsvorhaben mit geringen Drehzahlen und Drehzahl Null. Im Bereich kleiner Drehzahlen wird die lageabhängige Induktivität der Maschine ausgewertet, um aus der Spannung und dem Strom die Rotorlage zu schätzen. Die Herausforderung besteht darin, eine Dynamik und Güte des geschlossenen Regelkreises zu erreichen, die vergleichbar mit einem System mit Geber ist. Zur Einordnung der Dynamik eines Systems mit Geber sind experimentelle Ergebnisse bei Drehzahl Null in Abb. 12 dargestellt. In der ersten Zeile ist der q-Strom der PMSM und in Zeile zwei und drei die Drehzahl bzw. die Rotorlage der Maschine dargestellt. Ein von außen angreifendes Drehmoment wirkt als Störgröße.

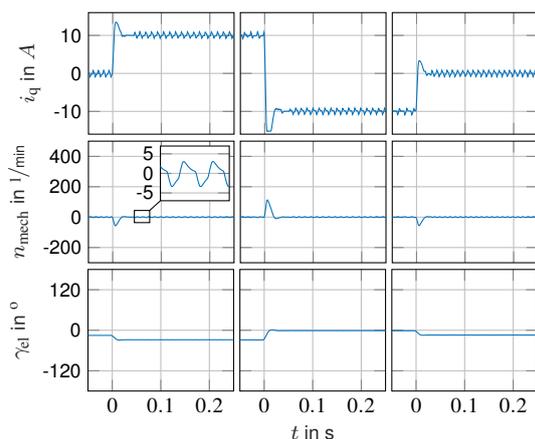


Abb. 12: Drehzahlregelung mit Encoder als Rückführung im Stillstand. Das Lastdrehmoment wird aufgebracht (links), reversiert (Mitte) und auf Null reduziert (rechts).

Fig. 12: Speed control with encoder as feedback at zero speed. Load torque applied (left), reversed (middle) and reduced to zero (right)

Im Vergleich zu Verfahren mit einem Beobachter, welche ein integrierendes Verhalten besitzen, ermit-

Self-Sensing Control of Permanent Magnet Synchronous Machines

by Georg Lindemann, M.Sc.,
and Niklas Himker, M.Sc.

Dynamic control of a Permanent Magnet Synchronous Machine (PMSM) requires information on the machine's rotor position which is typically measured by a sensor that is mounted on the shaft. The aim of current research projects at IAL is to make this component redundant, in order to reduce cost, installation space and failure probability of the drive train. The test bench used is shown in Fig. 13. In contrast to higher-speed operating ranges ($> 5 - 10\%$ rated speed), where the PMSM's back EMF is evaluated, current research is focused on low speeds and zero speed. In the lower speed range, the machine's position-dependent inductance is evaluated in order to estimate the rotor position from the voltage and the current. The challenge is to achieve a dynamic response and quality grade of the closed loop that is comparable to a system with sensor. To classify the dynamic response of a system with sensor, Fig. 12 shows experimental results at zero speed. The first row indicates the q-current in the PMSM and the second and third row the machine's speed and rotor position, respectively. An external torque acts as a disturbance variable. Compared to observer-based methods with integrat-



Abb. 13: Untersuchte PMSM (rechts) mit gekoppelter Lastmaschine (links) und Drehmomentsensor (mittig)
Fig. 13: Tested PMSM (right) with coupled load machine (left) and torque sensor (middle)

ing behaviour, the current approach determines estimates in one control cycle. The estimation does not depend on the fundamental flux linkage in the machine, but on the derivation of the flux linkage. For this purpose, the current slopes within a PWM period are measured by FPGA-based current oversampling (multiple sampling of current values within a PWM period). With the desired voltages of the control, we can set up an error equation as the basis for rotor position estimation using the Gradient Descent Method (GDM).

In previous methods of IAL, GDM was done us-

telt das aktuelle Verfahren die Schätzwerte in einem Regelungstakt. Die Schätzung hängt dabei nicht von der grundfrequenten Flussverkeftung in der Maschine ab, sondern von der Ableitung der Flussverkeftung. Als Voraussetzung werden die Stromsteigungen innerhalb einer PWM-Periode durch FPGA-basierte Überabtastung (mehrfache Erfassung der Stromwerte innerhalb der PWM-Periode) gemessen. Mit Hilfe der Sollspannungen der Regelung kann eine Fehlergleichung aufgestellt werden, aus der unter Verwendung des Gradientenabstiegsverfahrens (engl. Gradient Descent Method, GDM) die Rotorlage geschätzt wird.

In früheren Verfahren des IAL wurde die GDM mit Hilfe einer Phasenregelschleife (eng. phase-locked loop, PLL) durchgeführt, deren Parameter nur empirisch einzustellen sind und die Dynamik des Verfahrens beeinträchtigt. Im Gegensatz dazu wird in dem aktuellen Verfahren eine quasi-direkte (QD)-Berechnung genutzt. Die QD-Berechnung ermöglicht die Schätzung der Rotorlage aus der Fehlergleichung ohne zusätzliche Zeitverzögerung, was sich in einer Erhöhung der Dynamik des geschlossenen Regelkreises auswirkt. Die Parameter der QD-Berechnung lassen sich anhand von Maschinenparametern bestimmen [7]. Somit wird eine Stabilität über den gesamten Betriebsbereich sichergestellt. Dies ist ein wesentlicher Vorteil gegenüber der Nutzung einer PLL.

Die QD-Berechnung der Schätzung lässt als weiteren Vorteil die einfache Kompensation von Maschineneffekten wie z.B. der sättigungsabhängigen Verschiebung des Induktivitätsminimums (engl. cross coupling) zu [8]. In Abb. 14 sind Messergebnisse für die Störgrößenaufschaltung im Stillstand, vergleichbar mit Abb. 12, dargestellt. Die unterste Zeile zeigt den elektrischen Rotorlageschätzfehler. Dieses Verfahren ist damit durchaus vergleichbar mit einem einfachen Inkrementalgeber.

- [7] Niklas Himker, Georg Lindemann und Axel Mertens. "Iterative tracker for anisotropy-based self-sensing control of PMSM". In: *2019 IEEE 10th International Symposium on Sensorless Control for Electrical Drives (SLED)*. IEEE. 2019, S. 1–6.
- [8] Georg Lindemann, Niklas Himker und Axel Mertens. "Enhanced observer with adaptive reference frame for self-sensing control of PMSM". In: *2019 IEEE 10th International Symposium on Sensorless Control for Electrical Drives (SLED)*. IEEE. 2019, S. 1–6.

ing a Phase-Locked Loop (PLL) with empirical parameter setting reducing the dynamic response of the method. In contrast, the new method relies on quasi-direct (QD) calculation. QD calculation enables rotor position estimation from the error equation without additional time delay, thus increasing the dynamic response of the closed loop. The parameters of the QD calculation can be determined based on machine parameters [7], ensuring stability over the entire operating range. This is a major advantage compared to the use of a PLL.

Another advantage of QD calculation of the estimation is an easy compensation of machine effects like the saturation-dependent cross coupling [8]. Fig. 14 shows the measuring results for disturbance compensation at zero speed, comparable to Fig. 12. The bottom row depicts the rotor position estimation error. The method is comparable with a simple incremental encoder.

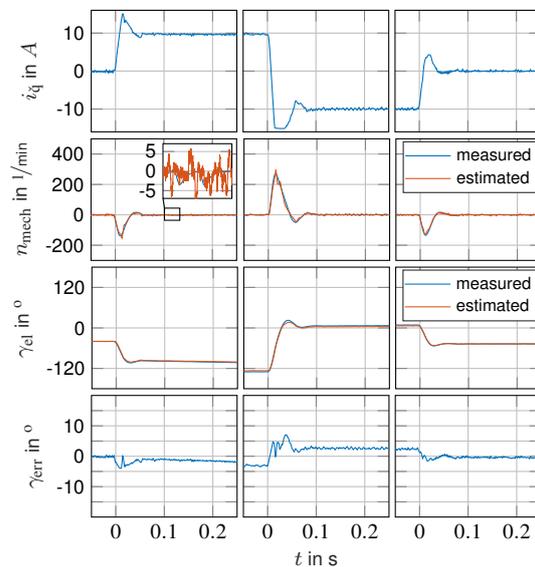


Abb. 14: Geberlose Drehzahlregelung im Stillstand. Das Lastdrehmoment wird aufgebracht (links), reversiert (Mitte) und auf Null reduziert (rechts)

Fig. 14: Self-sensing speed control at zero speed. Load torque applied (left), reversed (middle) and reduced to zero (right)

Verbesserte Verlustberechnung in Großgeneratoren

von Torben Fricke, M.Sc.
und Dr.-Ing. Alexander Rehfeldt

Aufgrund ihrer geringen Stückzahl ist es für die Dimensionierung von Großgeneratoren besonders wichtig, auf schnelle und verlässliche Berechnungsverfahren zurückgreifen zu können. Daher werden am IAL neue Verlustberechnungsverfahren entwickelt, die schnell genug sind, um in bestehende Dimensionierungstools integriert zu werden, und dennoch eine zu Finite-Elemente-Verfahren vergleichbare Genauigkeit aufweisen. Im letzten Institutsbericht wurde bereits ein neues Verfahren zur Berechnung von Schlingströmen und Schlingstromverlusten in Roebelstäben vorgestellt. Aktuell liegt der Forschungsschwerpunkt auf den ebenfalls durch Stirnraumfelder hervorgerufenen Wirbelstromverlusten in Statordruckplatten (in Abb. 15 dargestellt) und Druckfingern, der Ermittlung von parasitären Verlusten aufgrund von Kühlkanälen sowie auf einer verbesserten Berechnung der Feld- und Verlustverteilung im homogenen Teil des Blechpakets.

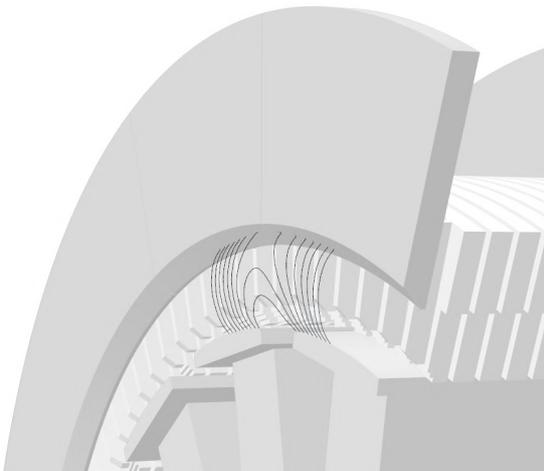


Abb. 15: Stirnraumfeld in einem Wasserkraftgenerator tritt in die Statordruckplatte ein.

Fig. 15: Magnetic field in the end region of a hydrogenerator entering the stator clamping plate.

Die Feldberechnung im homogenen Teil des Blechpakets baut, wie in Abb. 17 dargestellt, neben analytischen auch auf numerischen Schwarz-Christoffel-Transformationen auf. Letztere werden durch einen am IAL entwickelten Algorithmus berechnet. Auf diese Weise kann die durch das analytische Lösen der Laplace-Gleichung für eine Rechteckgeometrie ermittelte Feldverteilung direkt auf den in Abb. 17 dargestellten Nut-Joch-Übergang übertragen werden. So ergeben sich für die Eisenverlustberechnung im Vergleich zur FEM Fehler im Bereich einzelner Prozentpunkte bei Rechenzeiten von wenigen Hundert

Improved Loss Calculation in Large Generators

by Torben Fricke, M.Sc.,
and Dr.-Ing. Alexander Rehfeldt

The design of large generators, which are typically produced in small lot sizes, notably requires the use of fast and reliable calculation methods. At IAL, we are developing new calculation methods that are fast enough to be integrated into existing design tool chains and nevertheless have an accuracy comparable to finite-element methods. The last institute report has already presented a new method for calculating circulating currents and the resulting losses in Roebel bars. Currently, our research is focused on new calculation methods for eddy current losses, also caused by the magnetic field in the end winding region, shown in Fig. 15, in solid stator clamping plates and pressure fingers, on calculation methods for parasitic iron losses due to cooling channels and on an improved calculation of the field and loss distribution in the homogeneous part of the stator core.

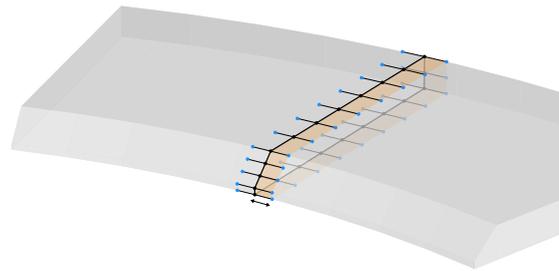


Abb. 16: Knotenkette des am IAL entwickelten *Node Loop Surface Impedance Loss Models*.

Fig. 16: Node chain of the *Node Loop Surface Impedance Loss Model* developed at IAL.

The improved calculation of the field and loss distribution in the homogeneous part of the stator core relies on both analytical and numerical Schwarz-Christoffel mappings, as can be seen in Fig. 17. The latter are mapped using an algorithm developed at IAL. This way, the field distribution inside a rectangular geometry, obtained by analytically solving the Laplace equation, can be mapped to the much more complex geometry of the slot-yoke transition, where an analytical solution of the Laplace equation would be unachievable. Iron losses calculated this way within just a few milliseconds up to some seconds only differ by single digit percentages compared to FEA simulations.

Numerical Schwarz-Christoffel mappings are also used to calculate the magnetic field in the end region required for our clamping plate and pressure finger loss calculations. The results of this field calculation differ only by $1\% \pm 11\%$ compared to magnetostatic 3D FEA simulations, when applied to six very diverse, manufactured hydrogenerators. This

Millisekunden bis zu einzelnen Sekunden. Für die Berechnung der Stirnraumfelder, die für Druckplatten- und Druckfingerverluste benötigt werden, kommen ebenfalls numerische Schwarz-Christoffel-Transformationen zum Einsatz. Die Ergebnisse dieser Feldberechnung weichen, angewendet auf sechs sehr unterschiedliche, gebaute Wasserkraftgeneratoren, nur um $1\% \pm 11\%$ von den Ergebnissen magnetostatischer 3D-FEM-Vergleichsrechnungen ab. Die Ergebnisse dieser Feldberechnung werden dann in Verlustmodelle für Druckfinger und Druckplatte auf Basis von Oberflächenimpedanzen und magnetischen Ersatznetzwerken gespeist. Abb. 16 zeigt das am IAL erarbeitete *Node Loop Surface Impedance Loss Model*, welches zur Bestimmung der Druckplattenverluste beiträgt. Dieses Verfahren kommt durch die geschickte Wahl von Randbedingungen und durch ein durchdachtes Netz mit sehr wenigen Knoten aus. Für die Geometrie des Testgenerators mit einem Bohrungsdurchmesser von mehr als einem Meter reichen nur 61 Knoten, um eine Abweichung von 3% zur transienten Zeitschritt-3D-FEM-Simulation zu erreichen (zum Vergleich wurde das B-Feld aus der FEM-Simulation verwendet). Das gesamte Berechnungsverfahren für Druckplatten- und Druckfingerverluste benötigt nur ca. 2 Sekunden auf einem handelsüblichen Laptop im Vergleich zu Stunden für eine transienten Zeitschritt-3D-FEM-Simulation auf einer Desktop-Workstation.

Alle Berechnungsansätze werden durch Vergleich mit 3D-FEM-Simulationen und Messungen an einem Testgenerator am GeCoLab-Großmaschinenprüfstand des IALs in Marienwerder, Hannover, validiert.

field calculation is the foundation for our clamping plate and pressure finger loss models based on surface impedance boundary conditions and magnetic equivalent circuits. Fig. 16 shows one building block of the clamping plate loss calculation: the *Node Loop Surface Impedance Loss Model*. By carefully choosing boundary conditions and creating a well thought out mesh, this method requires very few nodes. The clamping plate geometry of our test generator with an inner stator diameter exceeding one meter just requires 61 nodes to achieve an error of 3% compared to a transient time step 3D FEA simulation (here, the B-field was extracted from the FEA simulation). The entire clamping plate and pressure finger loss calculation method only takes around 2 seconds computing time on a standard laptop, compared to some hours on a desktop workstation for a transient time step 3D FEA simulation.

All loss calculation methods are validated using 3D FEA simulations as well as measurements on our test generator at the GeCoLab test stand for large electrical machines in Marienwerder, Hannover.

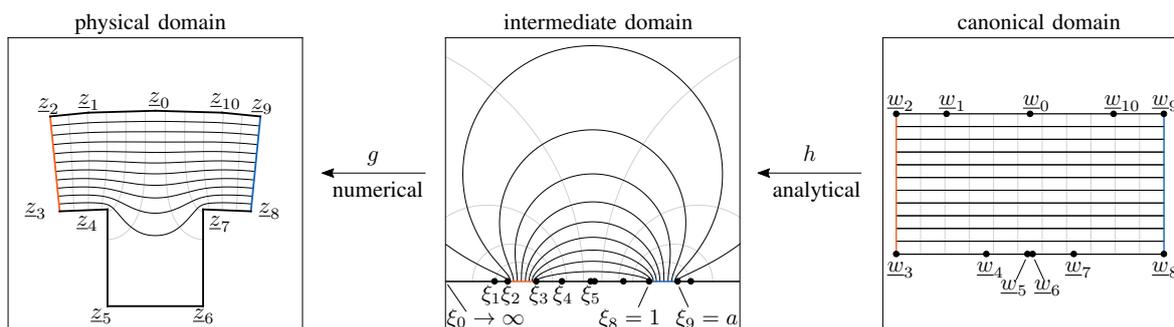


Abb. 17: Schwarz-Christoffel-Transformation eines Rechtecks über die unendliche Halbebene in die Geometrie eines Nut-Joch-Übergangs. Die Transformation g von der Halbebene in die physische Ebene erfolgt über einen am IAL entwickelten numerischen Algorithmus.

Fig. 17: Schwarz-Christoffel mapping between a rectangle and a slot-yoke transition, via an infinite half-plane. Mapping g from the infinite half-plane to the physical domain is calculated by a numerical algorithm.

Elektrische Antriebssysteme für Flugwindkraftanlagen (SkyPower100)

von Bakr Bagaber, M.Sc.
und Daniel Heide, M.Sc.

In den letzten zehn Jahren wurden immer mehr Offshore-Windturbinen gebaut, um den wachsenden Energiebedarf mit erneuerbaren Energien zu decken und die Verfügbarkeit dieser Energiequelle zu erhöhen. Diese Infrastrukturen erfordern jedoch sehr hohe Kapitalkosten, was zur Suche nach Alternativen motiviert. Eine mögliche Lösung besteht darin, Wind in größeren Höhen - über 300 Meter - nutzbar zu machen, wo die Windgeschwindigkeit größer und beständiger ist. Das Projekt SkyPower100 soll demonstrieren, dass der groß angelegte, vollautomatische Betrieb und die Stromerzeugung in Flugwindkraftanlagen einschließlich automatisierter Starts und Landungen möglich und zuverlässig ist. Eingebettet in das Gesamtprojekt verfolgt das IAL die systematische Konzeption geeigneter Antriebsstränge für Anlagen mit einer angestrebten Ausgangsleistung von bis zu 5 MW, die den Vergleich und die Bewertung von Motor-Generatoren und den zugehörigen Umrichterkonzepten ermöglichen. Eine schematische Übersicht über ein solches Antriebssystem ist in Abb. 18 dargestellt.

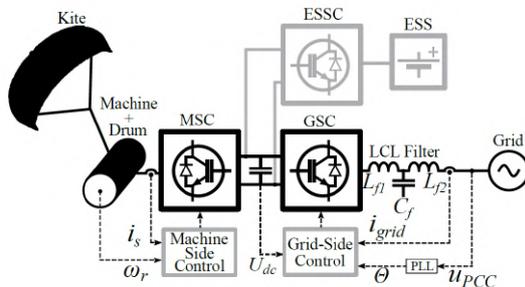


Abb. 18: Schematische Darstellung des Antriebssystems
Fig. 18: Schematic overview of the complete drive system

Es basiert auf einem flexiblen Flugdrachen, der über ein Seil und eine Winde mit einem Generator in einer Bodenstation verbunden ist. Im sog. Auswindschbetrieb wird der Flugdrachen im Wind fortbewegt und treibt den Generator an. Wenn die maximale Seillänge erreicht ist, wird der Drachen im Windfenster in neutrale Position gelenkt und von der nun als Motor arbeitenden elektrischen Maschine eingeholt. Dann beginnt der Zyklus von neuem. Im Auswindschbetrieb wird mehr elektrische Energie erzeugt als in der Einwindschphase verbraucht wird, da der Drachen hierbei dynamisch so im Windfenster fliegt, dass sich die auf das Seil wirkende Kraft gegenüber der Einwindschphase vervielfacht.

Electrical Powertrains for Airborne Wind Power Plants (SkyPower100)

by Bakr Bagaber, M.Sc.,
and Daniel Heide, M.Sc.

Over the past decade, more and more offshore wind turbines have been built in order to meet the growing energy demand using renewable energies and reduce the intermittency of this technology. However, these infrastructures require very high capital cost, which is the motivation for searching for alternatives. One possible solution is to utilize high-altitude winds (above 300 metres) - where wind speeds are higher and more consistent. The aim of the SkyPower100 project is to demonstrate that large-scale fully automated operation and power generation of an airborne wind energy system including automated starting and landing is possible and reliable. Embedded in the overall joint project, IAL pursues the systematic development and examination of suitable drive trains for plants with a target output power of up to 5 MW to allow comparison and evaluation of motor-generators and power converter concepts. A schematic overview of a suitable drive system is shown in Fig. 18. It is based on a flexible flying kite, which is powered by wind and attached to a winch and a generator in a ground station using a long tether. In downwind operation, the kite is winched out and powers the generator. When the end of the tether is reached, the kite is steered windward in neutral position and winched in by the electrical machine now working as a motor. Then the cycle starts again. In the reel-out phase, more electrical energy is generated than is consumed in the reel-in phase, because the kite flies dynamically in the wind window, so that the force acting on the rope is multiplied compared to the reel-in phase.

Therefore, the system should be designed so as to provide high efficiencies over a wide operating range, overload capability, stability, redundancy, and long lifetime especially for offshore applications. Different drive train concepts are under investigation for this application; this includes designing and investigating several types of electrical machines and frequency converters. With regard to the electrical machine, synchronous reluctance machines and permanent-magnet synchronous machines with external rotor were identified as particularly promising concepts. Major advantages of these machines are not only the low power losses, which enable a high overall efficiency in the flight cycle, but also the gearless integration of the generator into the winch. On the other hand, this concept is accompanied by special challenges such as heat transfer and cooling of the generator.

Das Antriebssystem muss daher so konzipiert sein, dass es hohe Wirkungsgrade über einen weiten Betriebsbereich, Überlastbarkeit, Stabilität, Redundanz und eine lange Lebensdauer insbesondere für Offshore-Anwendungen bietet. Hierfür werden am IAL verschiedene Arten von elektrischen Maschinen sowie Frequenzumrichter dimensioniert und simuliert. Im Hinblick auf die elektrische Maschine wurden synchrone Reluktanzmaschinen und permanentmagnet-Synchronmaschinen mit Außenrotor als besonders vielversprechende Konzepte identifiziert. Wesentliche Vorteile dieser Maschinen sind nicht nur die geringen Verlustleistungen im Rotor und ein hoher Gesamtwirkungsgrad im Flugzyklus, sondern auch die getriebelose Integrierbarkeit des Generators in die Seilwinde. Auf der anderen Seite geht dieses Konzept mit besonderen Anforderungen zum Beispiel an die Erwärmung und Kühlung des Generators einher. Im Rahmen des Projekts wurde ein Pilot-Generator mit Permanentmagnet-Rotor und einer Spitzenleistung von mehr als 300 kW realisiert. Als Magnetmaterial wurde ein Hart-Ferrit aufgrund der besseren Nachhaltigkeit im Vergleich mit aktuellen Hochenergiemagneten ausgewählt.

Im Hinblick auf die Leistungselektronik sind die wichtigsten Komponenten der maschinenseitige Umrichter, der netzseitige Umrichter, ein Energiespeicher, der als Leistungsfilter die an das Netz abgegebene Leistung von der Flugphase des Kites entkoppelt, und als Backup-Versorgung dient, sowie die Steuereinheiten. Allerdings haben Flugwindkraftanlagen auch ihre eigenen Herausforderungen. Der Betrieb des Flugdrachens in der vorgestellten Weise führt zu ungleichförmigen Drehmoment- und Drehzahlverläufen, die wiederum eine fluktuierende Leistung der elektrischen Maschine verursachen. Dies und der sich wiederholende Aus- und Einwisch-Prozess und die dazwischen liegende Transferphase bewirken belastende thermische Zyklen in den Halbleiterbauelementen des maschinenseitigen Umrichters.

Die Integration von Flugwindkraftanlagen in das Netz ist ein weiterer Forschungsschwerpunkt. Insbesondere werden die Einhaltung von Netzanschlussbedingungen sowie die Synchronisation verschiedener Anlagen in einem Windparkszenario untersucht. Ein wesentliches Ziel des Projekts ist es, die Funktionsfähigkeit und den Nutzen der Technologien auch praktisch zu validieren. Im Sommer 2020 ist der Antriebsstrang im Generator-Umrichter-Labor am IAL bereits erfolgreich untersucht worden (siehe Abb. 19). Nach dem Einbau des Antriebs in die Seilwinde wird dieser in einer vollautomatischen Flugwindkraftanlage mit einer durchschnittlichen Netzeinspeiseleistung von 100 kW unter realen Bedingungen den Dauertestbetrieb aufnehmen.

A pilot generator with permanent magnet rotor and a peak power of more than 300 kW has been built within the scope of the project. A hard ferrite material was selected as the magnet material because of its better sustainability compared to current high-energy magnets.

With regard to power electronics, the main components are the machine-side converter, the grid-side converter, an energy storage serving as power filter and backup supply, and the control units. However, airborne wind energy systems have their own challenges. Operating the kite in the presented manner yields complex torque and speed characteristics which in turn cause a fluctuating power behaviour at the machine terminals. This and the repetitive reel-in/reel-out process creates stressful thermal cycles in the semiconductor devices of the machine-side converter.

The integration of airborne wind power systems into the grid is another point of research. In particular, compliance with grid codes as well as synchronization of different units in a wind farm scenario are investigated.

A major goal of the project is to validate the functionality and benefits of the technologies in practice. Therefore, a fully automated pilot plant, capable of producing an average grid feed-in power of 100 kW has been developed and built. In summer 2020, the drivetrain has been successfully examined in the Generator-Converter Laboratory at IAL (Fig. 19). After installation of the drive into the winch, the drive will be put into continuous test operation under real conditions in a fully automated pilot airborne wind power plant.



Abb. 19: GeCoLab Prüfstands Aufbau: SkyPower-Umrichter, Transformator, SkyPower-Generator, Kettengeräte und Lastmaschine (von rechts nach links)

Fig. 19: GeCoLab drivetrain test setup: SkyPower converter, transformer, SkyPower generator, chain drive and load machine (from right to left)

Additive Fertigung von Elektromotoren

von Stefan Urbanek, M.Sc.
und Maximilian Bieber, M.Sc.

Die additive Fertigung – gemeinhin auch als 3D-Druck bezeichnet – gilt branchenübergreifend als eine der Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts. Dank der schichtweisen Herstellung und der damit einhergehenden freien Gestaltungsmöglichkeiten in allen drei Raumrichtungen können Bauteile nahezu jede denkbare Geometrie annehmen. Insbesondere der technologische Fortschritt bei der additiven Verarbeitung von metallischen Werkstoffen erlaubt es, z.B. Fachwerkstrukturen, bionische Gebilde oder funktionserweiternde Effekte ohne formgebende Werkzeuge zu implementieren.

Die Potentiale der additiven Fertigung im Elektromaschinenbau lassen sich vorteilhaft am Beispiel von Rotoren permanentmagneterregter Synchronmaschinen aufzeigen. So kann mithilfe von 3D-Finite-Elemente-Simulationen die magnetische Flussführung verbessert werden und weichmagnetisches Vollmaterial nur an den Stellen innerhalb des Aktivteils eingebracht werden, wo es aus magnetischer, mechanischer oder thermodynamischer Sicht zweckmäßig ist. Im Fall vergrabener Magnete ist es weiterhin möglich, den Rotorkern um die Magnete herum zu tordieren, um so eine Schrägungswirkung zu erzielen, und gleichzeitig die Magnet Taschen axial gerade zu belassen. Abb. 20 zeigt das Modell eines in Zusammenarbeit mit der Universität Paderborn entstandenen Demonstrators, welcher additiv gefertigt und in einem konventionellen Stator am IAL messtechnisch untersucht wurde.

Aufgrund der Tatsache, dass additiv gefertigte Rotoraktivteile aus einem einzigen, elektrisch leitfähigen Material bestehen, sind insbesondere auf der Rotoroberfläche erhöhte Wirbelstromverluste zu erwarten. Um diese Wirbelstromeffekte möglichst effektiv zu verringern, wurden unterschiedliche Schlitzmuster und Schraffierungen untersucht, die direkt während der Herstellung in die Oberfläche gedruckt werden können.

Weiterhin ist es dank der additiven Fertigung möglich, die Kraftleitung von der Rotoroberfläche bis zur Drehmomentabnahme am Wellenende zu verbessern. Die klassische Montage von Rotoraktivteilen auf zylinderförmigen Wellen kann zu lokalen Überhöhungen der mechanischen Spannung führen und hat zudem meist zur Folge, dass mehr Material verbaut wird, als es aus mechanischer oder magnetischer Sicht nötig wäre. Wie ebenfalls in Abb. 20 zu sehen, ist der Wellenbereich rautenförmig und hohl ausgeführt. Axial kann der Übergang zum Wellenende nun so gestaltet werden, dass das Aktivteil fließend in die Zylinderform der Lager übergeht. So

Additive Manufacturing of Electric Motors

by Stefan Urbanek, M.Sc.,
and Maximilian Bieber, M.Sc.

Additive manufacturing – also known as 3D printing – is one of the key technologies of the 21st century. Thanks to layer-by-layer production and three-dimensional freedom when designing parts, components can take almost any imaginable form or geometry. In particular, the technical progress in additive manufacturing of metallic materials enables the implementation of e.g. lattice structures, bionic forms or additional functionality without using conventional shaping tools.

The potentials of additive manufacturing in electrical engineering are demonstrated by using the example of permanent magnet synchronous machine rotors. For instance, it is possible to improve the magnetic flux paths using 3D finite-element simulations and add soft-magnetic material inside the active part, only where it is needed from the magnetic, mechanic or thermodynamic point of view. In case of buried magnets, it is possible to twist the rotor core continuously around the axially straight magnets in order to obtain a skewing effect, while leaving the magnet pockets axially straight. Fig. 20 shows the model of an additively manufactured demonstrator developed in cooperation with the University of Paderborn. The demonstrator was manufactured using laser beam melting and tested in a conventional stator at IAL test benches.

Since additively manufactured rotor active parts consist of a single, electrically conductive material, increased eddy current losses are expected especially on the rotor surface. In order to reduce these eddy current effects, we studied different groove patterns which can be printed directly onto the rotor sur-

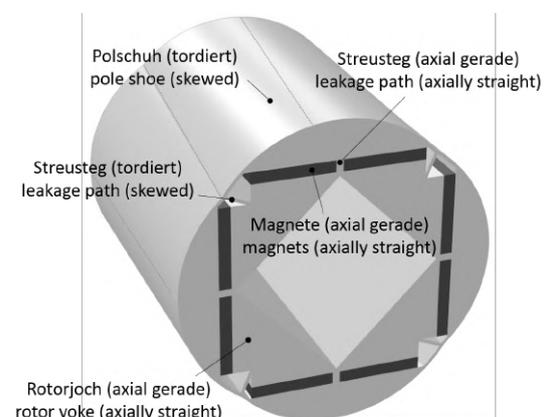


Abb. 20: Modell eines geschrägten Rotoraktivteils mit geraden Magnet Taschen

Fig. 20: Model of a skewed rotor active part with axially straight magnet pockets

kann Gewicht eingespart und somit letztlich der Wirkungsgrad und die Dynamik der Maschine erhöht werden.

Ein weiterer Aspekt, der mithilfe additiver Fertigung neu bewertet werden kann, ist die Kühlung von elektrischen Maschinen. Sowohl im Gehäuse als auch im Rotor können durch die Möglichkeiten der additiven Fertigung neuartige Kühlkonzepte erarbeitet werden. Durch die dreidimensionalen Gestaltungsmöglichkeiten von Kühlkanälen kann die Verlustwärme aus dem Inneren des Aktivteils besser abgeführt werden als bei herkömmlichen Konzepten, die durch die konventionellen Herstellungsverfahren in ihrer Gestaltungsfreiheit begrenzt werden.

In das Gehäuse können z.B. sehr feine, wasserführende Kühlkanalstrukturen integriert werden, die durch eine große Kühloberfläche, geringen Druckabfall und eine gleichmäßige Kühlung der Maschine eine größtmögliche Wärmeabfuhr ermöglichen. In Kühlkanälen im Rotoraktivteil können mittels additiver Fertigung sowohl Schaufelgeometrien implementiert als auch die Fliehkraftwirkung genutzt werden, um ein Druckgefälle zu erzeugen und so den Luftstrom zu initiieren. Die Fliehkraftwirkung entsteht, wenn die Luft vom Ansaugpunkt im Rotor auf einem kleineren Radius zu einem Auslasspunkt auf einem größeren Radius geführt wird. In Abb. 21 ist ein Schnittbild eines Rotors zu sehen, dessen Kühlkonzept die Fliehkraftwirkung der Luft bei einer sich drehenden Maschine nutzt und zudem integrierte Schaufelgeometrien aufweist.

Die additive Fertigung eröffnet also im Elektromaschinenbau aus elektromagnetischer, mechanischer und thermischer Sicht vielfältige Verbesserungsmöglichkeiten, zu deren Erforschung auch das IAL beiträgt.

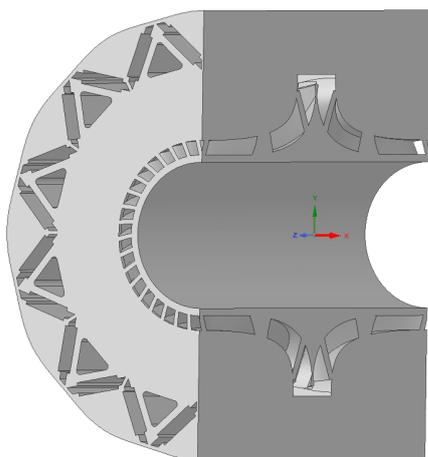


Abb. 21: Schnittdarstellung einer Rotorgeometrie mit innovativen, dreidimensionalen Kühlkanälen

Fig. 21: Sectional view of a rotor geometry with innovative 3D cooling channels

face during the additive manufacturing process.

Furthermore, it is possible to improve the force and torque transmission from the rotor surface to the shaft with the help of additive manufacturing. Conventionally assembling the rotor active part on a cylindrical shaft can cause a local rise of mechanical stress. As a result, more material is used than required from the mechanical or magnetic point of view. As also shown in Fig. 20, the shaft area is hollow with a rhombic shape. Thus, weight can be saved and the efficiency and dynamics of the machine is improved.

Another aspect that can be reevaluated using additive manufacturing is the cooling of electrical machines. Especially inside the housing and inside the rotor, novel cooling concepts can be realized through additive manufacturing. Due to the three-dimensional design freedom of cooling channels, the heat loss can be dissipated more efficiently from the inside of the active part, compared to conventional cooling channels.

The housing can, for example, contain fine water-carrying cooling channel structures that allow the greatest possible heat transfer through a large cooling surface, low pressure loss and consistent cooling of the machine. In rotor active part cooling channels, additive manufacturing can be employed to implement vane-like geometries and make use of the centrifugal force effect to generate a pressure gradient and thus initiate the air flow. In general, the centrifugal force effect occurs when the air is guided from the intake point on a smaller radius to an outlet point on a larger radius on the rotor. Fig. 21 shows a sectional view of a rotor with a cooling concept that uses the centrifugal force of the air in a rotating machine and also has integrated vane geometries. From the electromagnetic, mechanical and thermal point of view, additive manufacturing thus opens up a wide range of possibilities for improvement in electromechanical engineering. The IAL will also contribute to further research on this topic.

Charakterisierung von elektrischen Maschinen mit magnetischen Ersatznetzwerken

von Constantin Wohlers, M.Sc.
und Elmar Haschen, M.Sc.

Magnetische Ersatznetzwerke (MEC) sind trotz steigender Rechenleistung nach wie vor eine Alternative zur FEM, um elektromagnetische Größen von elektrischen Maschinen zu berechnen. Durch die gezielte Annahme der Feldverteilung in Form von Flussröhren lässt sich die Maschinengeometrie im Vergleich zur FEM-Vermaschung durch wenige Knoten und magnetische Leitwerte diskretisieren. Dies resultiert in einer vielfach schnelleren Feldlösung, die je nach Diskretisierung und Sättigung sehr nah an das FEM-Ergebnis heranreicht. Damit sind besonders schnelle Kennfeld-Identifikationen z.B. von Induktivitäten in Abhängigkeit von Strömen realisierbar. Außerdem ist durch die feste Struktur des MEC je nach Maschinentyp eine einfache Erstellung vieler geometrisch abgeänderter Varianten in Form einer Parameterstudie für eine effiziente Grobdimensionierung möglich.

Zur Modellierung einer elektrischen Maschine mittels MEC wird jeweils ein Netzwerk für den Ständer (siehe Abb. 22) und den Läufer (siehe Abb. 23) aufgebaut, welche durch Leitwerte im Luftspalt zu einem Gesamtnetzwerk verbunden werden.

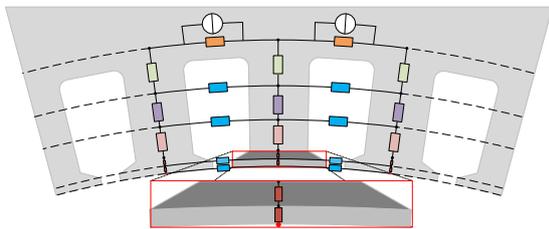


Abb. 22: Beispiel eines Ständernetzwerks
Fig. 22: Example of a stator network

Prinzipiell sind für die Charakterisierung des Maschinenverhaltens die vom Drehwinkel abhängigen Größen wie Flussverkettung oder Drehmoment zu berechnen. Dies wird erreicht, indem das Läufernetzwerk gegenüber dem Ständernetzwerk verdreht und durch angepasste Leitwerte im Luftspalt neu verbunden wird. Die Verbindungsleitwerte im Luftspalt können anhand der Luftspaltgeometrie über die Luftspaltleitwertfunktion ermittelt werden. Dafür wird jeweils eine Funktion für den Ständer λ_{stat} und für den Läufer λ_{rot} aufgestellt, die zu einer resultierenden Leitwertfunktion λ_{res} überlagert werden (siehe Abb. 25). Der Verbindungsleitwert ergibt sich anschließend durch Integration der Leitwertfunktion im Luftspalt. Aufgrund der analytischen Zusammenhänge der Luftspaltleitwertfunktionen lassen sich

Characterization of Electrical Machines with Magnetic Equivalent Circuits

by Constantin Wohlers, M.Sc.,
and Elmar Haschen, M.Sc.

Despite increasing computing power, magnetic equivalent circuits (MEC) are still an alternative to FEM programmes in order to calculate the electromagnetic behaviour of electrical machines. Assuming flux tubes based on the machine geometry, the magnetic field distribution can be modelled with just a few nodes and magnetic permeances, compared to the more detailed FEM mesh. This results in a much faster field solution with an accuracy almost equal to FEM, depending on discretization and saturation. This enables a fast map identification, for instance of inductances depending on currents. Due to the fixed structure of the MEC (according to the machine type), a lot of geometrically modified machine variants can be easily created and calculated in parameter studies which makes the first dimensioning highly efficient.

For modelling an electrical machine with an MEC, the rotor network (see Fig. 23) and the stator network (see Fig. 22) are built separately and are then connected by air-gap permeances to a full network.

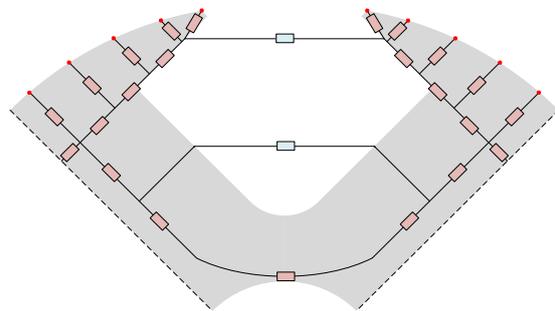


Abb. 23: Beispiel eines Läufernetzwerks über eine Polteilung
Fig. 23: Example of a rotor network across one pole pitch

The values depending on the rotor position, like flux linkage or torque, are essential for identifying the machine behaviour. With an MEC, this can be achieved by rotation of the rotor network against the stator network and its reconnection to the latter using adjusted air-gap permeances. These connecting permeances can be estimated by the air-gap permeance function, which is dependent on the air-gap geometry. Air-gap permeance functions are defined from the viewpoint of the stator λ_{stat} and the rotor λ_{rot} separately and are superimposed to the resulting air-gap permeance function λ_{res} . The connecting magnetic permeances can be derived from the resulting function via integration. Due to the analytical relation of the air-gap permeance functions, they can be shifted against each other into any desired

diese beliebig gegeneinander verschieben, was die Abbildung einer kontinuierlichen Läuferdrehung ermöglicht. Typischerweise wird bei der Simulation einer Maschine mit Ganzloch- oder Halblochwicklung um eine doppelte Polteilung in über 50 Drehschritten, gedreht.

Dienen die Berechnungen jedoch als Grundlage zur Veränderung der geometrischen Parameter der elektrischen Maschine, führt dies zu einer Vielzahl an Berechnungen und zu einem dementsprechend großen Zeitaufwand. Daher wird am IAL ein Ansatz verfolgt, um die Rechenzeit mit FEM oder MEC weiter zu verkürzen. Zur Bestimmung der charakteristischen Größen der elektrischen Maschine werden die harmonischen Spektren a priori als bekannt vorausgesetzt. Diese Größen können dann am Beispiel von Gleichung 1 beschrieben werden. Für die Identifikation einer Harmonischen der Stranginduktivitäten sind zwei Informationen nötig: Zum einen ist die Amplitude und zum anderen ist die Phasenlage, die jedoch beim Gleichanteil entfällt, zu identifizieren. Pro Drehposition können je drei Punkte der Induktivitätsverläufe identifiziert werden, was an der Symmetrie der Induktivitäten liegt. Aus fünf Drehpositionen lassen sich sowohl die Oberschwingungen der Stranginduktivitäten bis $k = 14$ als auch der Gleichanteil korrekt ermitteln. Somit ist eine Identifikation der elektrischen Maschine mit fünf Rotorpositionen eine sinnvolle Wahl, um die wichtigsten Harmonischen der Induktivitäten zu ermitteln. Ein weiterer Vorteil ist, dass beim Drehmoment aus fünf bekannten Werten sowohl das Nutrastrmoment als auch das Pendelmoment sechsfacher Frequenz zusätzlich zum mittleren Drehmoment ermittelt werden kann. Somit muss für die Berechnung für jede zu bestimmende Drehposition nur jeweils ein statisches MEC aufgebaut und gelöst werden.

In Abb. 24 ist der Verlauf der Selbstinduktivität eines Ständerstrangs berechnet mittels FEM, MEC und MEC mit dem Interpolationsverfahren dargestellt. Die dem letztgenannten zu Grunde gelegten Werte sind mit * markiert. Dies zeigt, dass der Verlauf von MEC (kontinuierlich und interpoliert) gut mit dem FEM-Ergebnis übereinstimmt.

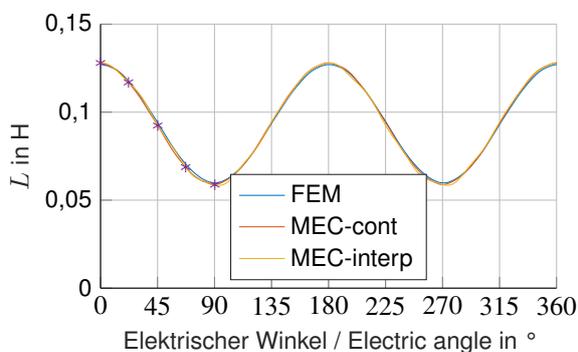


Abb. 24: Verlauf der Selbstinduktivität eines Ständerstrangs
 Fig. 24: Self-inductance curve of a stator phase

position, thus allowing the rotor to rotate continuously. In a machine characterization, the rotor typically rotates over two pole pitches with more than 50 steps.

When using this form of analysis for varying the geometrical parameters, a large number of calculations is needed which is very time-consuming. Therefore, IAL researchers are pursuing an approach to decrease the calculation time with FEM or MEC even further. To estimate the characteristic values of the electrical machine, an a priori knowledge of the harmonic spectrum is assumed. These values can be described using the equation

$$L_{aa} = \sum_{k=2n} \hat{L}_{aa,k} \cos(k\omega t - \varphi_{aa,k}) \quad (1)$$

for an inductance. To identify a harmonic of a phase inductance, two information are necessary: Firstly, the amplitude and secondly, the phase angle (not required for the steady component) need to be calculated. For each rotor step, three points of the inductance curve can be determined, which is possible because of the symmetry of the inductance curve for each phase. With five rotor steps, it is possible to calculate the phase inductance harmonics up to $k = 14$ as well as the steady-state component correctly. Thus, the identification of an electrical machine with five rotational steps is a sensible choice to determine the most important harmonics of inductance curves. Another advantage is that with five values of torque, the cogging torque as well as the pulsation torque with six times the fundamental frequency can be determined in addition to the mean torque. In this case, only one static MEC for each rotational step is needed.

In Fig. 24, the self-inductance curve calculated by FEM, MEC and the described interpolation method is shown. The five underlying values for the latter are marked with *. It can be seen that the MEC values (continuous and interpolation) are in good accordance with the FEM result.

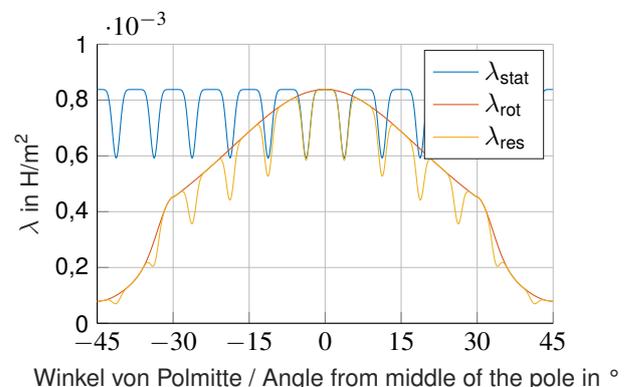


Abb. 25: Lufspaltleitwertfunktion von Ständer und Läufer mit Überlagerung zur resultierenden Leitwertfunktion

Fig. 25: Air-gap permeance function of stator and rotor with resulting function from superposition

Akustik und Schwingungen

**von Stephan Vip, M.Sc.,
Jan Andresen, M.Sc.,
Martin Enno Gerlach, M.Sc.
und Allan De Barros, M.Sc.**

Die Analyse des Geräuschverhaltens von elektrischen Maschinen stellt seit langem eine Kernkompetenz des IAL dar. Bereits 1950 beschrieb Prof. Heinz Jordan in seinem vielbeachteten Buch „Geräuscharme Elektromotoren“ die Grundlagen der Geräuschvorausberechnung: Basierend auf der Drehfeldtheorie wird das Spektrum der auf den Ständer wirkenden Maxwell'schen Grenzflächenkräfte vorausberechnet. Zusammen mit der Kenntnis des mechanischen Schwingungsverhaltens und des akustischen Abstrahlungsverhaltens können so die Schallemissionen vorausberechnet werden.

In der aktuellen Forschung des IALs wurden die bestehenden Verfahren und Berechnungsprogramme erweitert. So ist jetzt eine Berücksichtigung nicht kreissymmetrischer dreidimensionaler Strukturen möglich. Durch die Nutzung eines modalen Ansatzes konnte hier eine besonders zeiteffiziente Berechnungsmethodik umgesetzt werden. Eine passende Modellierung der dreidimensionalen Struktur ist dabei die Grundlage für eine präzise Vorausberechnung.

Darüber hinaus wird der Einfluss einzelner Komponenten, wie z.B. der Wicklung, dem Verguss und dem Gehäuse, auf das Schwingungsverhalten am IAL mittels experimenteller Modalanalysen erforscht. Daraus sollen auch Verbesserungen für die Vorausberechnung des Schwingungsverhaltens abgeleitet werden. Die Berücksichtigung der Besonderheiten von Wasserkraftgeneratoren, bei denen statt der Schallemissionen vor allem Strukturschwingungen im Vordergrund stehen, sind ebenfalls Gegenstand aktueller Forschung.

Auch im Querschnittsthema Akustik und Schwingungen zeigen sich die Vorteile einer engen Verzahnung der Fachgebiete Leistungselektronik und Antriebssysteme. So konnte die Kenntnis der Geräuschentstehung als Basis für die Erforschung einer aktiven Geräuschkompensation genutzt werden. Mit Hilfe von schnellen Stromreglern können Oberschwingungsströme zur gezielten Kompensation von Geräuschen eingesetzt werden.

Die Forschung wird in öffentlich geförderten Projekten und mit einer Reihe industrieller Partner durchgeführt, für deren Vertrauen wir uns an dieser Stelle bedanken möchten. Die Forschungsergebnisse wurden auf unterschiedlichen internationalen Konferenzen präsentiert.

Acoustics and Vibrations

**by Stephan Vip, M.Sc.,
Jan Andresen, M.Sc.,
Martin Enno Gerlach, M.Sc.,
and Allan De Barros, M.Sc.**

Analysing the acoustic noise behaviour of electrical machines has been a core competence of IAL for a long time. As early as 1950, Prof. Heinz Jordan described the basics of noise prediction in his well-respected book "Geräuscharme Elektromotoren": The spectrum of Maxwell's boundary forces is predicted based on the rotating field theory. Together with the knowledge of the behaviour of mechanical vibrations and acoustic radiation, the acoustic emissions can then be predicted.

In current research, researchers at IAL have extended the existing methods and calculation programmes. In this way, it is possible to consider three-dimensional structures with non-circular symmetry. A particularly time-efficient calculation methodology could be implemented by using a modal approach. A suitable modelling of the three-dimensional structure is the basis for a precise prediction.

In addition, the influence of individual components like the winding, encapsulation and housing on the vibration behaviour is currently being researched at the IAL using experimental modal analysis. From this, improvements for the prediction of the vibration behaviour shall be derived. The consideration of the special features of hydropower generators, where instead of sound emissions the focus is mainly on structural vibrations, is also the subject of current research.

The advantages of the close cooperation between the two chairs "Power Electronics" and "Drive Systems" also include the cross-sectional topic of acoustics and vibrations. Thus, the knowledge of noise generation could be used as a basis for the research of active noise compensation. With the help of fast current controllers, time harmonic currents are used for a targeted compensation of acoustic noise.

Our research is performed in publicly funded projects and with a number of industrial partners, whom we would like to thank on this occasion for their support. The research results were presented at various international conferences.

Zeiteffiziente Berechnung der Magnetgeräusche

Das Geräuschspektrum elektrischer Maschinen wird durch diskrete Einzeltöne elektromagnetischen Ursprungs im einstelligen Kilohertz-Frequenzbereich dominiert. Diese tonalen Komponenten können von einem Menschen als unangenehm wahrgenommen oder gar als Hinweis auf eine Beschädigung des Antriebssystems aufgefasst werden. Daher ist eine Vorausberechnung der Geräuschemissionen eines Antriebssystems für viele Anwendungen bereits in der Entwicklungsphase von Bedeutung. Die Geräuschberechnung umfasst hierbei die physikalischen Domänen Elektromagnetik, Strukturmechanik und Akustik. Die vorgestellte Berechnungsmethode kombiniert analytische Verfahren mit numerischen Simulationen.

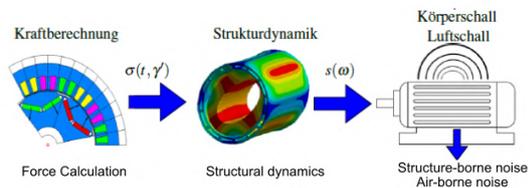


Abb. 26: Physikalische Domänen der Geräuschberechnung.
Fig. 26: Physical domains of acoustic noise calculation

Der Vorteil der Methode besteht darin, dass auf die für einen störenden Einzelton kausal verantwortliche Kräfte zurückgeschlossen werden kann. Im Mittelpunkt der Studie steht eine Methode, die aus einem dreidimensionalen strukturdynamischen Modell Übertragungsfunktionen extrahiert. So wird die Komplexität und der Zeitaufwand für den strukturdynamischen Berechnungsanteil erheblich reduziert. Dreidimensionale Effekte, wie axial veränderliche Eigenschwingungsformen (Moden) oder der Einfluss der Lagerung, bleiben in diesem reduzierten Modell erhalten. Im Falle der untersuchten permanentmagneterregten Synchronmaschinen werden die anregenden Kräfte durch zweidimensionale Finite-Elemente-Simulationen bestimmt. In diesem Zusammenhang wird gezeigt, wie der Einfluss der speisenden Leistungselektronik in die Geräuschberechnung integriert werden kann. Anschließend werden die Ergebnisse der elektromagnetischen und der strukturdynamischen Simulationen aufbereitet und miteinander verknüpft, um die Vibration der abstrahlenden Oberfläche in einem Hochlauf oder für ein ganzes Betriebskennfeld zu bestimmen. Mit Hilfe analytischer Strahlermodelle wird dann der abgestrahlte Schalldruck berechnet. Eine Validierung der Berechnungsergebnisse wird anhand einer experimentellen Modalanalyse und einer Betriebsschwingungsanalyse zweier Beispiel-PMSMs durchgeführt. Darüber hinaus wird gezeigt, wie die Methode mit einer messtechnisch bestimm-

Time-efficient Calculation of Magnetic Noise

The noise spectrum of electrical machines is dominated by discrete single tones of electromagnetic origin in the kilohertz range. Humans may consider these tones as unpleasant or even as an indication of damage to the drive system. Therefore, noise prediction already in the development phase is important for many applications. Noise calculation includes the physical domains of electromagnetics, structural dynamics and acoustics. The presented calculation method combines analytical calculations with numerical simulations.

The origin of the single tones can be allocated to the exciting force-density wave. To reduce the calculation time and the complexity of the calculation process, transfer functions are extracted from a 3D structural design simulation. 3D effects, such as axially variable eigenmodes or the influence of the mounting, are considered in this reduced model. A 2D finite element simulation is used to calculate the exciting force-density waves of the used PMSMs. Furthermore, it is shown how the influence of the power converter can be integrated in the calculation process by considering the current harmonics. At the end, the results of the electromagnetic and structural calculations are combined to calculate the vibration on the radiating surface of the machine. This can be done for a start up or for a torque-speed diagram. The resulting sound level is calculated using analytical radiator models. [9] [10]

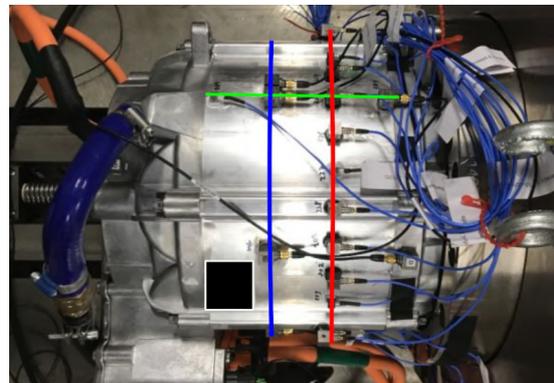


Abb. 27: Beispiel-PMSM mit Beschleunigungssensoren.
Fig. 27: Test PMSM with acceleration sensors.

The calculation method is validated by conducting a modal analysis and an experimental vibration analysis on two sample PMSMs. Furthermore, the results are used to calculate the acoustic noise inside the vehicle by using a transfer path analysis (TPA).

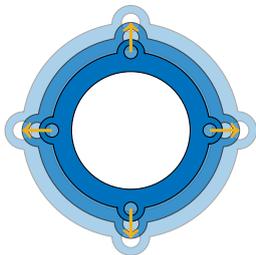
- [9] S. Vip, J. Hollmann, and B. Ponick. "NVH-Simulation of Salient-Pole Synchronous Machines for Traction Applications". In: *2019 International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP) &*

ten Transferpfadanalyse (TPA) verbunden werden kann, um den Einfluss der elektrischen Maschine auf die Geräuschkulisse in der Fahrerkabine eines Fahrzeugs zu bestimmen. [9] [10]

Aktive Geräuschkompensation mit Oberschwingungsströmen

Durch die aktive Geräuschkompensation werden tonale Komponenten des Antriebs reduziert. Die betrachteten tonalen Komponenten werden von Maxwell'schen Grenzflächenkräften angeregt und durch mechanische Resonanzen verstärkt. Bei diesen mechanischen Resonanzen schwingt die Maschine mit einer charakteristischen Eigenschwingungsform, auch Mode genannt. Eine besondere Bedeutung haben in permanentmagneterregten automobilen Hauptantrieben die radiale und die tangential Mode-0. Zur Verdeutlichung sind diese in Abb. 28 gezeigt. Bei der radialen Mode-0 expandiert und schrumpft der gesamte Stator. Die tangential Mode-0 sorgt für eine Verdrehung des Stators.

a) Radial mode-0 vibration



b) Circumferential mode-0 vibration

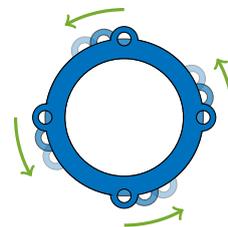


Abb. 28: Darstellung der radialen (a) und der tangentialen (b) Mode-0.
Fig. 28: Representation of the radial (a) and circumferential (b) mode-0

Durch Einprägen von Oberschwingungsströmen wird eine Kompensation dieser Vibrationen erreicht. Diese Oberschwingungsströme werden mit Hilfe von Stromreglern eingepreßt. Zur Kompensation wird die bestehende Vibration bestimmt. Anschließend wird ein Kompensationsstrom berechnet. Dieser erzeugt eine gleich große gegenphasige Vibration. Durch die negative Interferenz reduziert sich die Oberflächenvibration. Die Kompensation ermöglicht eine unabhängige Kompensation der radialen und der tangentialen Mode-0. Dies stellt eine Besonderheit des Verfahrens dar. Die Details des Verfahrens werden in [11] beschrieben. Zur Validierung der Ergebnisse wurde ein Ring aus 28 Beschleunigungssensoren verwendet. Es wurde der in Abb. 27 gezeigte Aufbau verwendet. Durch die gleichzeitige Messung an vielen Punkten kann aus den lo-

2019 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM). IEEE. 2019, pp. 246–253.

- [10] S. Vip, J. Andresen, F. Dräger, and B. Ponick. “NVH-Simulation of Permanent Magnet Synchronous Traction Drives Including Torsional Mode Shapes”. In: *International Conference on Electrical Machines (ICEM)*. 2020.

Active Noise Cancelling Using Harmonic Currents

Active noise compensation reduces tonal components of the drive. The considered tonal components are excited by Maxwell boundary forces and are amplified by mechanical resonances. At these resonance frequencies, the machine vibrates with a characteristic shape, also called mode. In permanent magnet machines for electric vehicles, the radial and circumferential mode-0 are of particular importance. As illustration, the modes are shown in Fig. 28. The radial mode-0 expands and shrinks the whole stator. The circumferential mode-0 causes the stator to twist.

The vibrations can be compensated by injecting harmonic currents using a feedback current controller. For compensation, the existing vibration is determined. Next, the compensation current is calculated. The currents lead to a vibration of the same magnitude but with opposing phase. The resulting negative interference reduces the surface vibration. The compensation enables an independent compensation of the radial and circumferential mode-0 vibration, a specific feature of the approach. The details of the approach are given in [11]. The results were verified using a ring of 28 acceleration sensors, as can be seen in Fig. 27. By simultaneously measuring at multiple points, the behaviour of the mode-0 can be deduced for the local vibrations. Fig. 29 depicts the measurement result of the circumferential mode-0. In the picture, the cir-

kalen Vibrationen auf das Verhalten der Mode-0 geschlossen werden. Abb. 29 zeigt das messtechnische Ergebnis für die tangentielle Mode-0. Die tangentielle Mode-0 wird in Abb. 29 mit ihrer Resonanzfrequenz angeregt. Durch das Einprägen der vorausberechneten Kompensationsströme ist in Abb. 29 eine deutliche Reduzierung der Mode-0 erkennbar. Damit einhergehend wird auch die von den einzelnen Sensoren gemessene Beschleunigung reduziert. Die gezeigte Reduzierung der Vibration führt auch zu einer deutlichen Reduzierung des ermittelten Schalldruckpegels bei der kompensierten Frequenz.

circumferential mode-0 is excited with its resonance frequency. Through the injection of compensation currents, a significant reduction of the mode-0 can be observed. At the same time, the measured acceleration of the individual sensors is reduced, too. The presented reduction of the vibration also leads to a significant reduction of the determined sound pressure level of the compensated frequency.

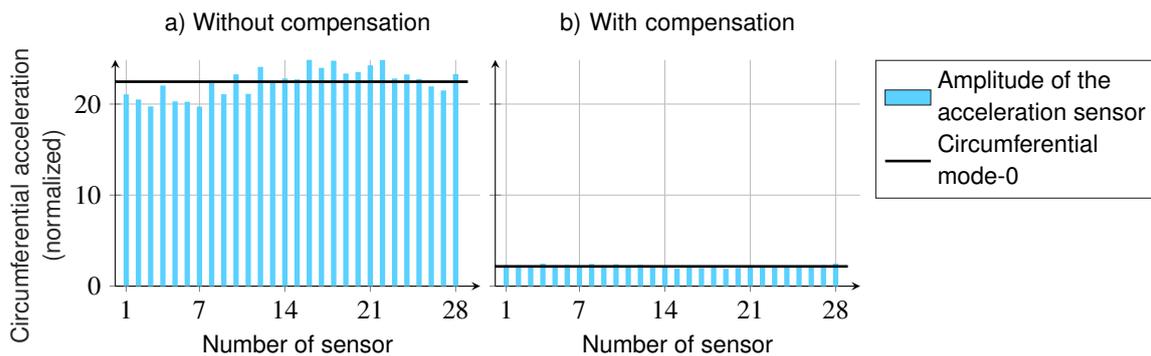


Abb. 29: Vergleich der Vibration der tangentialen Mode-0 der Ordnung 48 ohne (a) und mit (b) Kompensation.
Fig. 29: Comparison of the circumferential mode-0 vibration order 48 without (a) and with (b) compensation.

Die Zusammenhänge zwischen eingepprägtem Oberschwingungsstrom und verursachten Kraftpulsationen können auch analytisch beschrieben werden [12]. Untersuchungsgegenstand ist das vereinfachte Modell einer permanentmagneterregten Synchronmaschine mit vergrabenen Magneten. Aufgrund der magnetischen Eigenschaften dieses Maschinentyps entsteht bekanntermaßen ein signifikantes Reluktanzmoment. Die gleichen magnetischen Eigenschaften müssen auch bei der Wahl der Oberschwingungsströme berücksichtigt werden. Insbesondere der Grundschwingungsstrom hat einen großen Einfluss auf die zu wählenden Oberschwingungsströme. Die analytischen Betrachtungen bestätigen, dass eine getrennte Beeinflussung der radialen und tangentialen Mode-0 möglich ist.

The relationship between injected harmonic current and resulting force pulsation can also be described analytically [12]. The object of investigation is a simplified model of a permanent magnet synchronous machine with buried magnets. The magnetic characteristics of this type of machine yield a significant reluctance torque. The same magnetic properties also have to be considered when choosing the harmonic currents. Especially, the fundamental current has a significant influence on the choice of harmonic currents. The analytic considerations confirm that an independent excitation of the radial and circumferential mode-0 is possible.

- [11] J. Andresen, S. Vip, A. Mertens, and S. Paulus. "Compensation of the Radial and Circumferential Mode 0 Vibration of a Permanent Magnet Electric Machine based on an Experimental Characterisation". In: *2020 22nd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'20 ECCE Europe)*. IEEE, 2020, P–1.
- [12] J. Andresen, S. Vip, A. Mertens, and S. Paulus. "Theory of Influencing the Breathing Mode and Torque Pulsations of Permanent Magnet Electric Machines with Harmonic Currents". In: *2020 22nd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'20 ECCE Europe)*. IEEE, 2020, P–1.

Schwingungsverhalten elektrischer Maschinen

Die Berechnung des Schwingungsverhaltens elektrischer Maschinen ist ein elementarer Bestandteil der akustischen Vorausberechnung. Der schallabstrahlende Teil der elektrischen Maschine besteht aus dem Blechpaket, der Wicklung, der Isolierung sowie dem Gehäuse.

Die Lage der Eigenfrequenzen, die Eigenformen und die modale Dämpfung werden durch die einzelnen Komponenten und deren Wechselwirkungen untereinander signifikant beeinflusst. Um dies in zukünftigen Berechnungen zu berücksichtigen, wird der Einfluss der Wicklung und der Gehäusekomponenten auf das Schwingungsverhalten einer elektrischen Maschine anhand experimenteller Modalanalysen untersucht. Dazu wurden mehrere Versuchsträger aus dem Verbundprojekt *Speed4E* dem Produktionsprozess entnommen. Der Produktionsprozess ist in Abb. 30 zu sehen.

Bei der Modalanalyse wird ein Beschleunigungssensor auf dem Körper befestigt und die Struktur an mehreren Stellen mit einem Impulshammer ange-regt. Die Beschleunigung und der Kräfteintrag des Hammers werden gemessen und die Übertragungsfunktionen $f_{\text{FRF}}(\omega) = \frac{a(\omega)}{F(\omega)}$ bestimmt. Die Sensoren und der Modalhammer sind über eine Messkarte angeschlossen, die Messdaten werden mit der Software *M+P Analyzer* ausgewertet. Die Modalanalyse wird mit Hilfe der Software durchgeführt und die Eigenfrequenzen, die Eigenformen und die modale Dämpfung des Systems anhand der Übertragungsfunktionen bestimmt. Die elektrische Maschine wird dafür an elastischen Bändern aufgehängt, um eine möglichst niederfrequente Anbindung zu ermöglichen.

Ein Vergleich der Übertragungsfunktionen der unbewickelten Blechpakete der ersten Produktionsstufe aus Abb. 30 sind in Abb. 31 dargestellt. Die Eigenfrequenzen, die Eigenformen und die modale Dämpfung können durch die experimentelle Modalanalyse in ausreichender Genauigkeit bestimmt werden. Im Bereich bis zu $f = 10\text{kHz}$ können die Eigenformen $\rho = 0, 2, 3, 4$ und 5 identifiziert werden. Im Laufe des Produktionsprozesses wird die Identifikation der Eigenformen, Eigenfrequenzen und der modalen Dämpfung mit Zunahme der Komponenten wie Verguss und Gehäuse schwieriger.

Die Wicklung hat zunächst keinen signifikanten Einfluss auf die Eigenfrequenzen des Statorblechpakets, jedoch eine stark dämpfende Wirkung. Wird die Wicklung anschließend getränkt, wird das Gesamtsystem steifer und die Eigenfrequenzen für die Moden $\rho = 2, 3, 4$ steigen an, während die Eigenfrequenz der Mode $\rho = 0$ abnimmt. Die Dämpfung nimmt durch das Tränken wieder ab, da keine Relativbewegungen zwischen den einzelnen Leitern der

Vibration Behaviour of Electrical Machines

One important step in the acoustic prediction of electrical machines is the calculation of the vibration behaviour. The sound-radiating part of the machine consists of different components: the stator core, the winding, the impregnation and the housing.

Eigenfrequencies, eigenmodes, and modal damping are influenced significantly by each of the components and their mutual interaction. To analyse this behaviour, experimental modal analyses are performed on different states of an electrical machine during its production process. The results are used to improve the acoustic prediction of electrical machines. Fig. 30 illustrates the production process of the used machine. The machines were manufactured for the project *Speed4E*,



Abb. 30: Produktionsprozess.

Fig. 30: Manufacturing process.

To perform the modal analysis, an acceleration sensor is mounted on the machine, which is then excited at different positions using a modal hammer. The applied force and the resulting acceleration are measured and the transfer function $f_{\text{FRF}}(\omega) = \frac{a(\omega)}{F(\omega)}$ is determined. The sensor and the modal hammer are connected to a measurement card and the results are analysed using the software *M+P Analyzer*. The modal analysis is conducted using the software and eigenfrequencies, eigenmodes and modal damping are determined according the measured transfer functions. The electrical machine is hung on elastic bands that are fixed to a frame. This enables a low-frequency connection that has small influence on the eigenfrequencies of the stator cores themselves.

The transfer functions of the unwound stator cores, the first step of the production process, is depicted in Fig. 31. Eigenfrequencies, eigenmodes and modal damping can be derived with sufficient accuracy. In the frequency range up to $f = 10\text{kHz}$, the eigenmodes $\rho = 0, 2, 3, 4$ and 5 can be identified. During the production process with an increasing number of components, the identification of eigenfrequencies, eigenmodes and modal damping becomes more difficult.

The winding itself has no significant influence on the value of the eigenfrequencies, but a strong damping effect. If the winding is impregnated, the entire system becomes stiffer and the eigenfrequencies of the modes $\rho = 2, 3, 4$ increase, while the eigenfrequency of the mode $\rho = 0$ decreases. The damping is decreased again due to the impregnation. The

Wicklung mehr möglich ist. Das Gehäuse hat eine weitere versteifende Wirkung. Aus den Ergebnissen werden Hinweise für eine verbesserte Vorausberechnung des Schwingungsverhaltens abgeleitet.

housing makes the system even stiffer. The results can be used to derive information for an improved acoustic prediction of electrical machines.

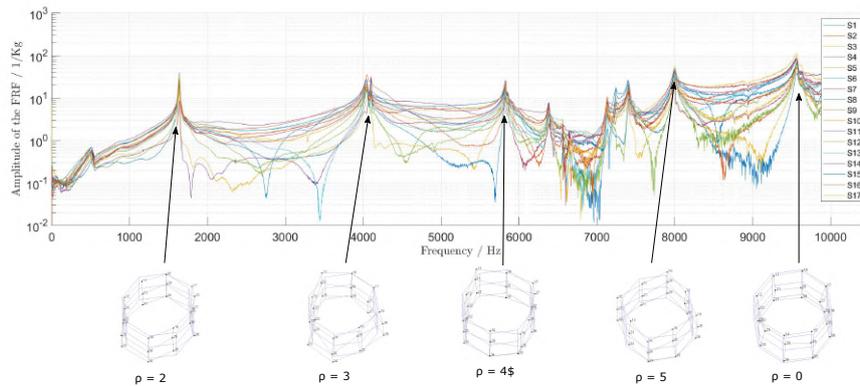


Abb. 31: Übertragungsfunktionen der Statorblechpakete im Vergleich.

Fig. 31: Frequency response function of the stator laminations.

Strukturschwingungen in Wasserkraftgeneratoren

Eine der Hauptursachen für Strukturschwingungen in elektrischen Maschinen sind wechselnde magnetische Kräfte, die am Luftspalt der Maschine auf das Blechpaket wirken (Abb. 32). Diese Kräfte können in Abhängigkeit vom Schwingungsverhalten des mechanischen Systems, bestehend aus Blechpaket, Wicklung und dem Gehäuse, zu großen Schwingungsamplituden führen. Das kann die Ursache für Schäden, die Reduzierung der Lebensdauer oder unerwünschte akustische Schallabstrahlung sein.

Im besonderen Fall der Wasserkraftgeneratoren, bei denen es sich in der Regel um Synchronmaschinen mit Schenkelpolen und einer hohen Anzahl von Polpaaren handelt, gibt es einige Besonderheiten: Aus konstruktiven Gründen werden die Generatoren oft mit einer Bruchlochwicklung gebaut, deren Urwicklung mehr als ein Polpaar umfasst. Folglich entstehen Luftspaltfeld- und Magnetkraftsubharmonische, deren Winkelperiode größer als die der Hauptwelle ist. Diese Kraftsubharmonischen sind die Hauptursache für Strukturschwingungen in diesen Maschinen, da die Eigenfrequenzen des Systems für Eigenmoden niedriger Ordnungszahl im Bereich der dominierenden doppelten elektrischen Speisefrequenz (typischerweise 100Hz bzw. 120Hz) liegen.

Eine weitere Besonderheit ist, dass das Statorgehäuse einen erheblichen Einfluss auf die Eigenmoden hat. Wie in Abb. 33 dargestellt, werden Wasserkraftgeneratoren mit kleinen Drehzahlen vertikal ausgeführt. Das Gehäuse besteht aus einem Tragsystem, der das Gewicht des Generators und des Turbinenläufers trägt und der auf dem Maschinenfundament montiert ist. Das Statorjoch ist im Vergleich zu

Structural Vibrations in Hydrogenerators

One of the root causes for structural vibrations in electrical machines are alternating magnetic forces originating from the air-gap field and acting on the core laminations (Fig. 32), also called electromagnetic vibration. Such forces combined with the dynamic response of the mechanical system may cause excessive vibration of the stator core and other structures. This can be the cause of damages, life span reduction and undesirable audible noise.

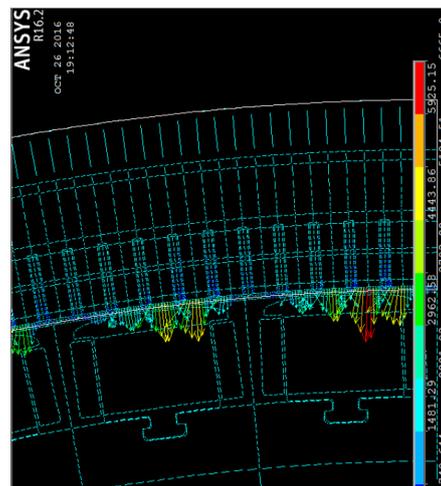


Abb. 32: Auf den Stator wirkende elektromagnetische Kräfte.

Fig. 32: Electromagnetic forces acting on the stator.

In the particular case of hydrogenerators, which are commonly salient-pole synchronous machines with a high number of pole pairs, there are some peculiarities. Due to design restrictions, they are often constructed with a fractional-slot stator winding, whose source winding comprises more than one

den Teilen des Tragsterns relativ dünn, wodurch das Gehäuse einen großen Einfluss auf das strukturdynamische Verhalten hat. Das Schwingungsverhalten einer so großen Struktur im Konstruktionsprozess zeit- und kosteneffizient zu berücksichtigen, stellt eine echte Herausforderung dar. In analytischen Modellen wird das Statorblechpaket als ein freier Zylinder im Raum angenommen und das Gehäuse nicht berücksichtigt. Um dies einzubeziehen, müssten aufwendige 3D-FEM-Berechnungen durchgeführt werden, die eine sehr hohe Anzahl von Knoten und Elementen erforderten. Zudem hängen die Ergebnisse von der Genauigkeit der verwendeten Materialeigenschaften und von den Kontaktbedingungen zwischen Gehäuse, Statorblechpaket und Fundament ab. Aufgrund der Komplexität der mechanischen Struktur, die aus gestapelten, durch Lüftungskanäle getrennten Teilpaketen besteht, sind Messungen zur Kalibrierung der genannten Modelleigenschaften zwingend erforderlich. Dennoch kann es schwierig sein, die Eigenmoden und Frequenzen einer großen Maschine mit traditionellen Methoden experimentell zu bestimmen, wie es bereits in der Literatur berichtet wurde. Es ist möglich, dass ein Mangel an physischem Zugang für die Anregung mit einem Modalhammer in einer installierten Maschine besteht. Dies könnte dazu führen, dass die Größe des erzeugten Impulses nicht ausreicht, um eine messbare Strukturantwort zu erzeugen, wenn man Störungen durch die Schwingungsanregungen anderer Maschinen im selben Kraftwerk berücksichtigt.

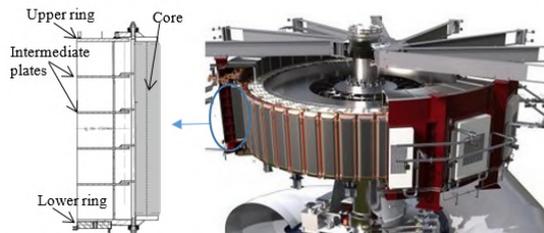


Abb. 33: Typischer Querschnitt eines Wasserkraftgenerators.
Fig. 33: Typical cross-section of a hydrogenerator.

Ziel der Forschungsarbeiten ist ein besseres Verständnis des Schwingungsverhaltens und der elektromagnetischen Schwingungsanregungen des Statorblechpakets in Wasserkraftgeneratoren. Dazu sollen Modelle zur Berechnung der magnetischen Kräfte sowie des strukturmechanischen Systemverhaltens aufgebaut und anhand von Messungen validiert werden. [13] [14]

- [13] A. De Barros and I. Chabu. "Modeling of airgap flux density for the study of stator core vibration in low speed synchronous machines". In: *COMPEL-The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering* (2020).
- [14] A. de Barros, A. D'Agostini, T. Z. Penteadó, N. Kato, A. A. Cunha, E. J. Faria, C. Haluska, F. H. Hamaji, S. I. Nabeta, and I. E. Chabu. "New method for experimental modal analysis of hydrogenerator's stator core using the excitation from the Poles". In: *The Journal of Engineering* 2019.17 (2019), pp. 4341–4344.

pole pair. Consequently, air-gap field and magnetic force subharmonics arise, having an angular period greater than the one of spatial fundamental wave. These force subharmonics become a major concern for vibration issues in these machines, since the mechanical system's eigenfrequencies for natural modes with a low number of nodes tend to be closer to the typically dominant double electrical frequency excitation (typically 100Hz or 120Hz). Another peculiarity is that the stator frame has a significant influence on the excited eigenmodes. As illustrated in Fig. 33, low-speed hydrogenerators are normally vertical machines. The housing consists of a bearing bracket that carries the generator and turbine rotor weight and that is mounted to the machine foundation. The stator yoke is relatively thin compared to the parts of the bearing bracket, which explains the housing's great influence on the structural dynamics behaviour. Taking into account the vibrational behaviour of such a large structure in a time- and cost-effective manner is a real challenge. Available analytical models assume the stator core to be a free cylinder in space without considering the housing. Including these effects would require complex 3D FEM calculations with a very high number of nodes and elements. Moreover, the results depend on the accuracy of the employed equivalent material properties and boundary conditions at interfaces between frame, core and foundations. Given the complexity of the mechanical structure, consisting of stacked lamination packs separated by ventilation ducts, measurements become mandatory for calibrating the mentioned model properties. Nevertheless, it may be difficult to experimentally extract the eigenmodes and frequencies of a large machine using traditional methods, as already reported in literature. An eventual lack of physical access for the excitation with a modal hammer in an installed machine, for example, could make the magnitude of the generated impulse to be insufficient to produce a measurable structural response, given the noise through excited vibrations of other machines operating in the same power plant.

The general aim of research is a better understanding of the vibration behaviour and the electromagnetic vibrations of the stator core in hydrogenerators. This includes obtaining models for the acting magnetic forces and the mechanical system response as well as defining and performing suitable tests for their validation. [13] [14]

SE²A - Sustainable and Energy-Efficient Aviation

von Janine Ebersberger, M.Sc.,
Leon Fauth, M.Sc.,
Ralf Keuter, M.Sc.
und Malte Lorenz, M.Sc.

Um das Fliegen in Zukunft nachhaltig und energieeffizient gestalten zu können, hat die *TU Braunschweig* das Exzellenzcluster *Sustainable and Energy-Efficient Aviation* ins Leben gerufen, an dem unter anderem die *Leibniz Universität Hannover* und das *Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt* beteiligt sind. In Exzellenzclustern fördert die *Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)* Spitzenforschung an Universitäten in Deutschland. In der Vergangenheit wurde bereits der Sonderforschungsbereich *SFB 880 Grundlagen des Hochleistungsantriebs künftiger Verkehrsflugzeuge* [15], der Basis des Exzellenzclusters SE²A war, durch die *DFG* unterstützt. Das Exzellenzcluster SE²A beschäftigt sich sowohl mit Luftverkehrssystemen als auch mit Flugdynamiken und Energiesystemen zukünftiger Flugzeuge. In letzterem Bereich beteiligt sich das IAL in Zusammenarbeit mit dem *Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen (IMAB)* und dem *Institut für Hochspannungstechnik und elektrische Anlagen (elenia)* der *TU Braunschweig*. Im Fokus stehen die Untersuchung des elektrischen Antriebsstrangs sowie des Bordnetzes für den Einsatz in zukünftigen elektrisch angetriebenen Flugzeugen. Es werden sowohl Systemaspekte, wie beispielsweise verschiedene Topologien, Wärmeabfuhr, Redundanz und Zuverlässigkeit, als auch Grundlagenforschung im Bereich der Leistungshalbleiter behandelt. Zusätzlich werden Methoden zur anforderungsgerechten Dimensionierung von elektrischen Maschinen entwickelt. Dabei spielt insbesondere eine hohe Leistungsdichte bei gleichzeitig hohen Wirkungsgraden und die optimale Integration der unterschiedlichen Komponenten eine entscheidende Rolle.

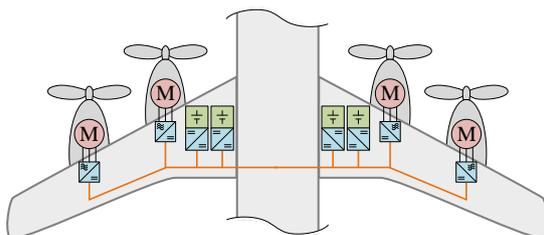


Abb. 34: Zentrales Energieversorgungssystem
Fig. 34: Centralized energy supply system

SE²A - Sustainable and Energy-Efficient Aviation

by Janine Ebersberger, M.Sc.,
Leon Fauth, M.Sc.,
Ralf Keuter, M.Sc.,
and Malte Lorenz M.Sc.

In order to shape a sustainable and energy-efficient future in aviation, *TU Braunschweig* launched the Cluster of Excellence *Sustainable and Energy-Efficient Aviation*, in which *Leibniz University Hannover* and the *German Aerospace Center* among others joined forces. The *German Research Foundation (DFG)* funds excellent research at universities in Germany in clusters of excellence. In the past, the Collaborative Research Centre *CRC 880 Fundamentals of High Lift for Future Civil Aircraft* [15], which was the basis of the Cluster of Excellence SE²A, has already been supported by *DFG*. The Cluster of Excellence SE²A investigates air transport systems as well as flight dynamics and energy systems of future aircraft. In the last-mentioned research area, IAL participates in cooperation with the *Institute for Electrical Machines, Traction and Drives (IMAB)* and the *Institute for High Voltage Technology and Power Systems (elenia)* of *TU Braunschweig*. The investigation focuses on the electric drive train as well as on the on-board power supply system for future electrical aircraft. The study includes system aspects such as different topologies, heat dissipation, redundancy and reliability as well as fundamental research in the field of power semiconductors. In addition, methods for the dimensioning of electrical machines tailored to the respective requirements are developed. In particular, a high power density in combination with a high efficiency and an optimal integration of the different components are crucial.

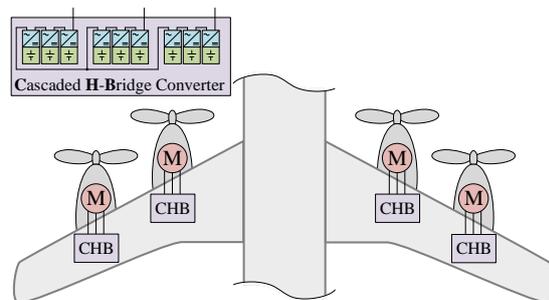


Abb. 35: Dezentrales Energieversorgungssystem
Fig. 35: Decentralized energy supply system

Bordnetz

Hauptverbraucher in elektrisch angetriebenen Flugzeugen sind die Propulsoren. Zur Versorgung werden zwei Ansätze des Energieversorgungssystems verfolgt. Abb. 34 zeigt einen zentralen Aufbau mit einem Gleichspannungsnetz, das alle Quellen und Verbraucher verbindet. Alternativ dazu ist in Abb. 35 ein dezentraler Ansatz zu sehen, bei dem es kein gemeinsames Gleichspannungsnetz gibt, sondern bei dem die Quellen direkt über Umrichtersysteme an die Antriebsmotoren angeschlossen sind. Durch die reduzierte Verkabelung und das Fehlen einer DC-Schiene bietet der dezentrale Ansatz die Möglichkeit, Gewicht einzusparen. Ein weiterer Vorteil kann das etwaige Entfallen von DC/DC-Wandlern sein, da die benötigte Spannung an der Maschine durch eine Serienschaltung der Quellen gestellt wird. Beide Systemansätze müssen hinsichtlich ihrer Eignung untersucht werden. Dabei spielt neben Gewicht und Bauraum auch die Zuverlässigkeit eine entscheidende Rolle. Beim dezentralen Ansatz können bei Ausfall einer Quelle die in Serie geschalteten Teilsysteme weiter betrieben werden, während beim zentralen Konzept die parallel angeschlossenen Teilsysteme weiter arbeiten können.

On-board power supply system

The propulsors are the main power load in electric aircraft. For their supply, two approaches of the energy supply system are considered. Fig. 34 shows a centralized structure with a DC backbone, which connects all sources and loads. Alternatively, Fig. 35 depicts a decentralized approach without a common DC voltage network, but instead the sources are directly connected to the drive motors by converter systems. Due to less wiring and the absence of a DC backbone, the decentralized approach offers the possibility to reduce the system's weight. A further benefit could be the possible elimination of DC/DC converters, since the required voltage at the machine is provided by connecting the sources in series. Both system approaches have to be examined regarding their suitability. In addition to weight and installation space, reliability is important. With the decentralized approach, if one source fails, the series-connected subsystems can continue to operate, whereas with the centralized concept, the parallel-connected subsystems can remain in operation.

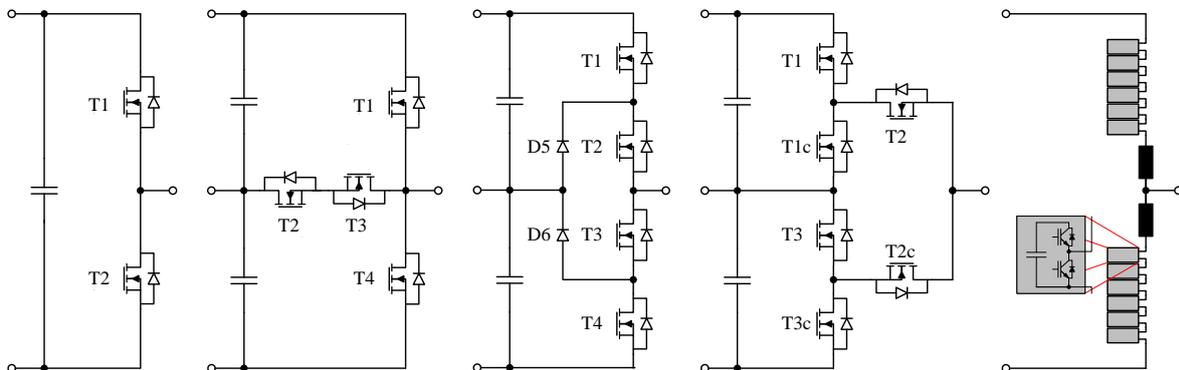


Abb. 36: Umrichtertopologien von links nach rechts:

2-Punkt, 3-Punkt T-Type, 3-Punkt NPC (Neutral Point Clamped), 3-Punkt ANPC (Active NPC), MMC (Modular Multilevel Converter)

Fig. 36: Inverter topologies from left to right:

2-Level, 3-Level T-Type, 3-Level NPC (Neutral Point Clamped), 3-Level ANPC (Active NPC), MMC (Modular Multilevel Converter)

Für beide Konzepte werden verschiedene Umrichtertopologien, wie sie in Abb. 36 zu sehen sind, untersucht und in Bezug auf Wirkungsgrad, Zuverlässigkeit, Volumen und Gewicht bewertet. Es werden chipflächenskalierte Modelle entwickelt, welche die genannten Größen in Abhängigkeit von den Parametern Eingangsspannung, Ausgangsleistung sowie Schaltfrequenz darstellen. Teil der Betrachtung sind 2-Punkt-, 3-Punkt- sowie verschiedene Arten von modularen Multilevel-Umrichtern. 2-Punkt-Umrichter weisen die geringste Komplexität sowie den kleinsten Ansteuerungsaufwand auf und haben auf der Gleichstromseite den ge-

For both concepts, different inverter topologies, which are depicted in Fig. 36, are investigated and evaluated regarding efficiency, reliability, volume and weight. Chip area scaled models are developed, which represent the abovementioned parameters as a function of the input voltage, the output power and the switching frequency. 2-level- and 3-level-inverters as well as different types of modular multilevel converters are part of the research. 2-level inverters have the lowest complexity and control effort as well as the lowest filter requirements on the DC side. However, higher harmonic losses occur in the connected machine

ringsten Filterbedarf. Allerdings entstehen höhere Oberschwingungsverluste in der angeschlossenen Maschine, und durch die steilen Spannungsflanken kann es zu Lagerströmen oder zu Überbeanspruchung der Wicklungsisolierung kommen, welche die Maschine beschädigen können. Auch ist die Verfügbarkeit von Wide-Bandgap-Halbleitern in hohen Spannungsklassen noch sehr begrenzt. Vorteilhaft kann daher der Einsatz von 3-Punkt-Umrichtern sein. In diesen können Leistungshalbleiter mit einer geringeren Sperrspannung verbaut werden und zusätzlich die Oberschwingungsverluste reduziert sowie der Wirkungsgrad insbesondere bei hohen Schaltfrequenzen erhöht werden. Im Vergleich zu 2-Punkt-Umrichtern sind Regelung und Ansteuerung nur wenig komplexer. Mit Hilfe von modularen Multilevel-Umrichtern können noch höhere Spannungen, bei gleichzeitigem Einsatz von Leistungshalbleitern mit geringeren Sperrspannungen, erreicht werden. Sie bieten den zusätzlichen Vorteil, kleine Spannungsstufen an den Ausgangsklemmen bereit zu stellen, sodass die Oberschwingungsverluste weiter reduziert werden. Problematisch ist ihr hohes Gewicht, das vor allem durch die großen Modulkapazitäten verursacht wird, und die Komplexität der Steuerung.

and the steep voltage slopes can cause bearing currents or overstress of the winding insulation that can damage the machine. Furthermore, the availability of wide-bandgap semiconductors in high voltage classes is currently very limited. Therefore, 3-level inverters can be advantageous towards 2-level inverters. In 3-level inverters, power semiconductors with a lower blocking voltage can be used. Additionally, the harmonic losses can be reduced and the efficiency increased, especially at high switching frequencies. Compared to 2-level inverters, the control is only slightly more complex. With the help of modular multilevel converters, even higher voltages can be achieved while using power semiconductors with lower blocking voltages. They offer the additional benefit of providing small voltage steps at the output terminals, so that the harmonic losses are reduced further. Problematic are their high weight, which is mainly caused by the large module capacitances, and the complexity of the control system.

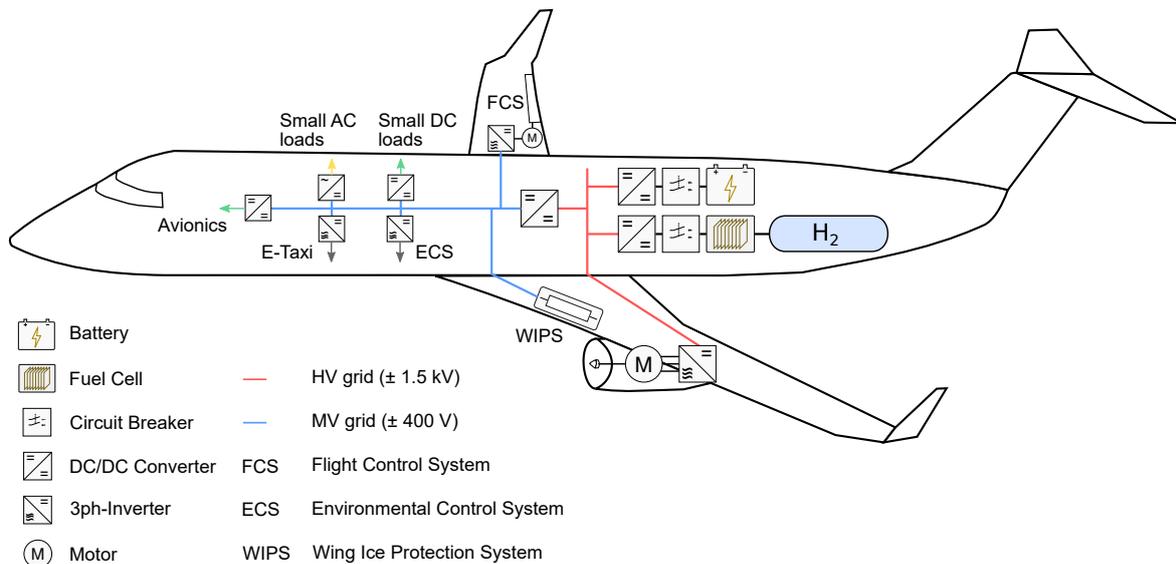


Abb. 37: Schematische Darstellung des vorgeschlagenen Bordnetzes
 Fig. 37: Schematic representation of the proposed on-board power supply system

Für das Bordnetz in einem zentralen System wird ein Gleichspannungs-Netz vorgeschlagen, da somit Verluste durch Blindleistungsübertragung vermieden werden und Gewicht durch den Wegfall von Gleichrichtern mit Leistungsfaktorkorrektur eingespart werden kann. Aufgrund der verschiedenen Lasten im vollelektrischen Flugzeug bietet sich die Aufteilung in mehrere Zonen an [16]. Die Hauptantriebe, welche bei einem Kurzstreckenflugzeug

For the on-board power supply in a centralized system, a DC system is proposed, as this avoids losses due to reactive power demand and saves weight by eliminating rectifiers with power factor correction. Due to the different loads in an all-electric aircraft, it is possible to divide the system into several zones [16]. The main propulsion units, which require a peak power of up to 4MW each for a short-haul aircraft for about 100 passengers, are

für ca. 100 Passagiere eine Spitzenleistung von jeweils bis zu 4MW benötigen, werden aus einem $\pm 1.5\text{kV}$ -Netz gespeist. Damit kann der Leiterquerschnitt verringert werden, allerdings treten neue Herausforderungen im Bereich des Isoliersystems auf. Für die leistungselektronischen Wandler können MOSFETs aus Siliziumcarbid mit einer Sperrspannung von 6.5kV verwendet werden. Die Untersuchung und Charakterisierung dieser neuartigen Bauteile ist Teil des Forschungsvorhabens. Für die weiteren flugzeugspezifischen Lasten wie Tragflächen-Enteisung, Klappensteuerung, Avionik und Klimatisierung wird ein Gleichspannungsnetz mit einer Spannung von $\pm 400\text{V}$ vorgesehen, wodurch die Isolierung weniger komplex ist.

Leistungshalbleiter

Für die hier eingesetzten Wandler können Multilevel-Topologien mit Gallium-Nitrid-Halbleitern verwendet werden. Durch die höhere realisierbare Schaltfrequenz wird eine Erhöhung der gravimetrischen Leistungsdichte ermöglicht.

Bei der Dimensionierung von elektrischen Systemen in Flugzeugen sind immer auch die besonderen Umweltbedingungen zu beachten. In einer typischen Reisehöhe für Kurzstreckenflugzeuge von 6 km sinkt die Durchschlagfeldstärke der Luft um über 40% in Folge des reduzierten Luftdrucks. Außerdem müssen die Eigenschaften von Leistungshalbleitern bei sehr niedrigen Temperaturen untersucht werden. Dafür werden die Leistungshalbleiter in einem Laborprüfschrank, der Temperaturen bis zu -70°C erreicht, elektrisch charakterisiert. Zusätzlich ist der Einfluss der Höhenstrahlung auf Halbleiter zu beachten. Leistungshalbleiter können durch ein einzelnes Neutron zerstört werden. Dieser Mechanismus ist als Single Event Effect (SEE) bekannt. Für eine Flughöhe von 6km erhöht sich der Teilchenfluss um den Faktor 70 verglichen mit Anwendungen auf der Erdoberfläche. Es wird daher deutlich, dass die Dimensionierung eines leistungselektronischen Systems mit den Zielen einer hohen Zuverlässigkeit bei gleichzeitig hoher Leistungsdichte eine genaue Kenntnis der Ausfallrate aufgrund von Höhenstrahlung voraussetzt. Aus diesem Grund werden vom IAL Untersuchungen zur Robustheit von Halbleitern gegen Höhenstrahlung durchgeführt. Es sind sowohl ein Langzeitversuch zur Untersuchung unter möglichst realer Belastung als auch beschleunigte Messungen zur Ableitung von Parametersensitivitäten geplant. Als Ergebnis wird die Ausfallrate von GaN-Transistoren in Abhängigkeit von der angelegten Spannung gewonnen. Diese Daten sind entscheidend für die Dimensionierung von leistungselektronischen Wandlern für die Luftfahrt und bisher nicht verfügbar. Die Betrachtung der

fed from a $\pm 1.5\text{kV}$ grid. This allows the conductor cross-section to be reduced, but new challenges arise for the insulation. MOSFETs made of silicon carbide with a blocking voltage of 6.5kV can be used for the power electronic converters. The investigation and characterization of these novel devices is part of the research project. For the other aircraft-specific loads, such as wing ice protection system, flight control, avionics and environmental control system, a DC system with a reduced voltage of $\pm 400\text{V}$ is planned, which makes the insulation less complex.

Power semiconductors

For the converters used here, multilevel topologies with gallium nitride semiconductors can be used. The higher switching frequency that can be realized allows an increase of the gravimetric power density. Designers of electrical systems in aircraft must always take into account the particular environmental conditions. At a typical cruising altitude of 6 km for short-haul aircraft, the breakdown field strength in air decreases by more than 40% due to the reduced air pressure. Furthermore, the properties of power semiconductors at very low temperatures have to be investigated. For this purpose, the power semiconductors are electrically characterized in a laboratory test chamber, which enables temperatures down to -70°C . Additionally, the influence of cosmic radiation on semiconductors has to be considered. Power semiconductors can witness sudden destruction by the impact of a single neutron. This mechanism is known as Single Event Effect (SEE). At a flight altitude of 6km, the particle flux increases by a factor of 70 compared to applications on the earth's surface. It becomes evident that the design of a highly reliable power electronic system with high power density requires precise knowledge of the failure rate due to cosmic radiation. For this reason, IAL is investigating the robustness of semiconductors against cosmic radiation. We are planning a long-term experiment under the most realistic conditions possible as well as accelerated measurements to derive parameter sensitivities. This test result will deliver us the failure rate of GaN transistors as a function of the applied voltage. These information are crucial for the design of power electronic transducers for aviation and are not available yet. Considering reliability on component level is complemented by a methodical design of power electronic converters with the aim of a system-inherent redundancy.

Ausfallsicherheit auf Bauteilebene wird ergänzt durch eine methodische Dimensionierung von leistungselektronischen Wandlern mit dem Ziel einer systeminhärenten Redundanz.

Antriebsmotoren

Hinsichtlich der elektrischen Maschine besteht das Ziel einer Optimierung bezüglich der Parameter Leistungsdichte und Wirkungsgrad. Dies darf jedoch nicht unter der Vernachlässigung der Zuverlässigkeit sowie der Sicherheit des Gesamtsystems und der technischen Umsetzbarkeit geschehen. Um das Ziel einer ganzheitlichen Optimierung des gesamten Antriebskonzepts z.B. in Bezug auf die Anzahl der Propulsoren und den Energiebedarf zu realisieren, werden Motoren-Familien mit unterschiedlichen technischen Ausprägungen mit verschiedenen Architekturen der Leistungselektronik verknüpft. Vielversprechende Technologien zum Erreichen der Ziele sind Hochdrehzahl-Konzepte, der Einsatz additiver Fertigungsverfahren, fortschrittliche Kühlkonzepte z.B. auf Basis einer Phasenwechsel-Kühlung und ein Integrationsansatz von Maschine, Leistungselektronik und Kühlung.

Eine weitere Technologie zur Erhöhung der Drehmomentdichte ist die direkte Leiterkühlung (siehe Abb. 38), welche in diesem Anwendungsfall besonders bei Synchronmaschinen sinnvoll ist [17]. Durch diese Kühlmethode ist eine deutliche Stromdichtesteigerung in der Statorwicklung möglich, da die Stromwärmeverluste effizient abgeführt werden können und die Wicklungstemperatur somit in einem für die Isolierstoffe zulässigen Temperaturbereich bleibt. Bei konventionellen Kühlverfahren wie der Wassermantelkühlung werden Stromdichten von 12 bis 18 A/mm² erreicht. Mit einer direkten Leiterkühlung hingegen sind 60 bis 100 A/mm² realisierbar [18]. Die Nachteile dieses Ansatzes sind der mit ansteigender Stromdichte abfallende Leistungsfaktor und überproportional zunehmende Stromwärmeverluste (siehe Abb. 39). Entsprechend ist hier ein Kompromiss zwischen hoher Leistungsdichte und einem guten Wirkungsgrad zu finden. Eine weitere Möglichkeit zur Erhöhung der Stromdichte bietet der Einsatz von supraleitenden Wicklungselementen. Die technische Umsetzbarkeit ist hier jedoch deutlich komplexer. Der Gewinn an Leistungsdichte durch den Einsatz der Aggregate für die Kryokühlung muss im Verhältnis zu deren Gewicht stehen, um eine technisch sinnvolle Realisierung zu ermöglichen.

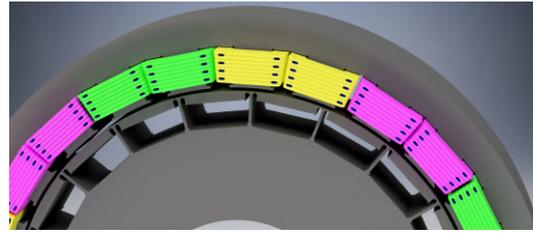


Abb. 38: CAD-Modell einer Maschine mit einer direkt leitergekühlten Zahnspulenwicklung

Fig. 38: CAD model of a machine with direct liquid-cooled tooth-coil windings

Drive motors

With regard to the electric machine, the goal is to optimize the parameters power density and efficiency. However, this must not be done without considering the reliability and safety of the overall system and the technical feasibility. In order to realize the goal of a holistic optimization of the entire drive concept, e.g. with regard to the number of drives and energy consumption, motor families with different technical characteristics are linked with different power electronic architectures. Promising technologies to achieve the goals are high-speed concepts, the use of additive manufacturing processes, advanced cooling concepts, e.g. based on phase-change cooling, and an integration approach of machine, power electronics and cooling.

Another technology for increasing torque density is direct conductor cooling (Fig. 38), which is particularly suitable for synchronous machines in this application [17]. Direct conductor cooling allows a significant increase of the current density in the stator winding, since the current copper losses can be efficiently dissipated and the winding temperature thus remains within a temperature range that is permissible for the insulating materials. With conventional cooling methods, such as water jacket cooling, current densities of 12 to 18 A/mm² can be achieved, whereas 60 to 100 A/mm² can be realized with direct conductor cooling [18].

Disadvantages of this approach are the power factor, which decreases with increasing current density, and disproportionately increasing current copper losses (Fig. 39). That is why we have to find a compromise between high power density and good efficiency. The use of superconducting winding elements is another possibility of increasing the current density. Its technical feasibility is certainly much more complex, therefore requiring an appropriate balance between increase in power density achieved by using cryogenic cooling aggregates and their weight.

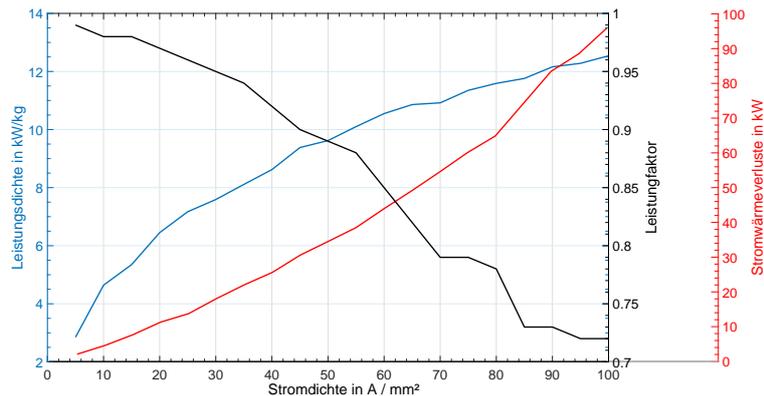


Abb. 39: Einfluss der Stromdichte auf Leistungsdichte, Stromwärmeverluste und Leistungsfaktor bei einer Serie von Antrieben mit einer maximalen Leistung von $P = 2000$ kW bei einer Drehzahl von $n = 2000$ 1/min
Fig. 39: Influence of current density on power density, current copper losses and power factor of a series of drives with a maximum output of $P = 2000$ kW and a speed of $n = 2000$ 1/min

Systemoptimierung

Die Erkenntnisse aus der Optimierung des elektrischen Antriebssystems werden anschließend an die Projektpartner am *Lehrstuhl für Elektrische Energiespeichersysteme der Leibniz Universität Hannover* zur Optimierung der gesamten Energieversorgung übergeben. Es kann somit eine optimale Dimensionierung des Gesamtsystems einschließlich der Netzstruktur hinsichtlich einer maximalen Energie- und Leistungsdichte unter Berücksichtigung der erforderlichen Ausfallsicherheit erfolgen.

Um die erarbeiteten Konzepte für das Energieversorgungssystem messtechnisch zu validieren, werden am IMAB und am IAL parallel Laborumgebungen aufgebaut, die jeweils die zentrale und die dezentrale Struktur nachbilden sollen. Dafür wird ein Power-Hardware-in-the-Loop-Prüfstand aufgebaut, in dem DC/DC-Wandler, Wechselrichter, Trennschalter, elektrische Maschinen und verschiedene Regelungsstrategien untersucht werden können. Dabei wird das Verhalten der Flugzeugs und der einzelnen Komponenten in Echtzeit berechnet und über eine Lastmaschine, Batterie- bzw. Brennstoffzellen-Emulatoren und Temperiergeräte abgebildet. Ziel ist unter anderem der gemeinsame Betrieb der Komponenten gemäß typischen Flugprofilen, Überlastmanövern und Fehlerszenarien sowie die Untersuchung der elektromagnetischen Verträglichkeit.

- [15] R. Radespiel und R. Semaan. "Fundamentals of High Lift for Future Civil Aircraft". In: 2021.
- [16] H. Schefer, L. Fauth, T. H. Kopp, R. Mallwitz, J. Friebe und M. Kurrat. "Discussion on Electric Power Supply Systems for All Electric Aircraft". In: *IEEE Access* 8 (2020), S. 84188–84216.
- [17] M. Henke, G. Narjes, J. Hoffmann, C. Wohlers, S. Urbanek, C. Heister, J. Steinbrink, W. Candors und B. Ponick. "Challenges and opportunities of very light high-performance electric drives for aviation". In: *Energies* 11.2 (2018), S. 344.
- [18] C. Wohlers, P. Juris, S. Kabelac und B. Ponick. "Design and direct liquid cooling of tooth-coil windings". In: *Electrical Engineering* 100.4 (2018), S. 2299–2308.

System Optimization

The optimization results of the electric drive system are then handed over to the project partners at the *Chair of Electric Energy Storage Systems of Leibniz University Hannover* for the optimization of the overall energy supply. This enables an optimal dimensioning of the overall system including the system structure with regard to a maximum energy and power density in consideration of the required reliability.

In order to validate the concepts developed for the energy supply system by measurements, lab environments are set up in parallel at IMAB and IAL, one emulating the centralized and the other one the decentralized structure. For this purpose, a power hardware-in-the-loop test bench will be set up for research on DC/DC converters, inverters, disconnectors, electrical machines and various control strategies. The behaviour of the aircraft and the individual components will be calculated in real time and simulated by a load machine, battery/fuel cell emulators and temperature control units. One of the goals is the joint operation of the components according to typical flight profiles, overload maneuvers and failure scenarios as well as the investigation of electromagnetic compatibility.

Fahrmotoren mit Haarnadelwicklung in Stern- oder Dreieckschaltung

von Jürgen Redlich, M.Sc.
und Anton Suchan, M.Sc.

Mit der steigenden Marktdurchdringung batterieelektrischer Fahrzeuge sind die Hersteller zur Reduzierung des Kostendrucks bestrebt, modulare Baukastensysteme für den elektrischen Antriebsstrang zu etablieren, um eine große Leistungsspreizung unter Wiederverwendung von Gleichanteilen zu ermöglichen. Da sowohl die Spannung als auch die Ausnutzung des Magnetkreises einer E-Maschine innerhalb des Baukastens unverändert bleiben sollen, muss zur sinnvollen Nutzung von Skaleneffekten die Maschinenlänge sowie die Windungszahl individuell angepasst werden. Durch die gleichzeitige Forderung eines hohen Automatisierungsgrads im Fertigungsprozess der elektrischen Maschine werden zunehmend Haarnadelwicklungen verwendet. Zentraler Nachteil von Haarnadelwicklungen ist, neben den Stromverdrängungseinflüssen, der komplexe Schaltungsaufwand. Dabei muss u.a. bei Verwendung von parallelen Zweigen die Symmetrie in der Zusammenschaltung gewahrt werden, um Ausgleichsströme innerhalb der Zweige zu vermeiden. Darüber hinaus kommt es durch Kreuzungen der Haarnadeln zu ausladenden Wicklungsköpfen sowie zu einer großen Anzahl an verschiedenen Haarnadellängen und Verbindungsschweißpunkten. Aus diesen Gründen ist die Windungszahlvariation mit Restriktionen verbunden. Durch den Einsatz von Stern- und Dreieckschaltungen kann die Anzahl an realisierbaren Windungszahlen nahezu verdoppelt werden.

Der entscheidende Nachteil einer Dreieckschaltung gegenüber einer Sternschaltung mit isoliertem Sternpunkt ist der in den Wicklungssträngen gleichphasig fließende Kreisstrom, der zu zusätzlichen Stromwärmeverlusten in der E-Maschine führt. Die Ursachen des Kreisstroms innerhalb der Dreieckschaltung beruhen auf Oberfeldern der Ordnungszahl $\nu' = 3p$ im Luftspaltfeld, die eine gleichphasige Spannung in den Strängen induzieren. In Zusammenarbeit mit einem Industriepartner untersucht das IAL, ob die Verwendung einer Dreieckschaltung für Fahrmotoren geeignet ist. Zur Bewertung des elektromagnetischen Verhaltens von Fahrtrieben und zur genauen Vorhersage des Wirkungsgrads im Fahrzyklus ist es unumgänglich, zeitintensive, numerische Kennfeldberechnungen durchzuführen. Zur Analyse des Betriebsverhaltens von E-Maschinen in Dreieckschaltung musste dabei bisher auf eine zeitschrittbasierte FEM zurückgegriffen werden, in der es möglich ist, eine elektri-

Traction Motors with Hairpin Winding in Star or Delta Connection

by Jürgen Redlich, M.Sc.,
and Anton Suchan, M.Sc.

With the increasing market penetration of battery-electric vehicles, manufacturers are striving to reduce cost pressure by establishing modular systems for the electric powertrain, in order to enable a wide performance spread while reusing direct components. Since both the voltage and the utilization of the magnetic circuit of an electric machine should remain unchanged within the modular system, the machine length as well as the number of turns of the winding must be adapted individually, in order to take advantage of economies of scale. Due to the simultaneous demand for a high degree of automation in the production process of the electric machine, hairpin windings are increasingly used. The central disadvantage of hairpin windings, apart from the current displacement influence, is the complex circuit design. When using parallel branches, the symmetry in the interconnection must be maintained, in order to avoid compensation currents within the branches. In addition, crossing the hairpins results in end-winding overhangs as well as in a large number of different hairpin lengths and connection welding points. For these reasons, the variation of the number of turns is associated with restrictions. By the use of star and delta connections, the number of realizable turns can be nearly doubled. The major disadvantage of a delta connection compared to a star connection with insulated star point is the in-phase circulating current in the winding phases, which leads to additional ohmic losses in the electric machine. Circulating current in the delta connection is caused by spatial harmonics with the order $\nu' = 3p$ in the air-gap field, which induce an in-phase voltage in the winding phases. In cooperation with an industrial partner, IAL is investigating the suitability of delta connections for traction motors. To evaluate the electromagnetic behaviour of traction drives and to accurately predict the efficiency in the driving cycle, it is inevitable to perform time-consuming, numerical map calculations. For the analysis of the operating behaviour of electric machines in delta connection, it was previously necessary to rely on a time-step-based FEM, where it is possible to create an electrical circuit for the calculation model and to couple it with the FE model, since otherwise the circuit current cannot be detected. FE calculations, which are carried out using a time-stepping method, are usually very time-consuming. A special problem arises because of the transient behaviour of the circular current (see

sche Schaltung für das Berechnungsmodell zu erstellen und mit dem FE-Modell zu koppeln, da sonst der Kreisstrom nicht erfasst werden kann. FE-Berechnungen, die im Zeitschrittverfahren durchgeführt werden, sind i.d.R. sehr zeitintensiv. Eine besondere Problematik ergibt sich dabei aufgrund des Einschwingverhaltens des Kreisstroms (siehe Abb. 40), das die Berechnungszeit bedeutend erhöht.

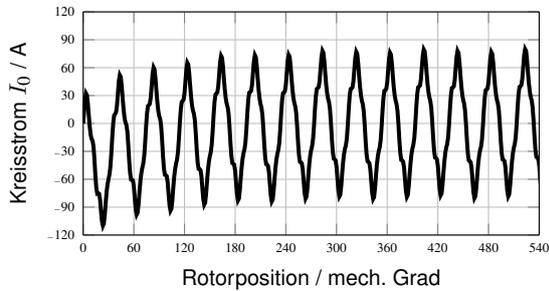


Abb. 40: Verlauf des Kreisstroms unter Verwendung der transienten FEM am Beispiel einer PSM

Fig. 40: Circulating current of a PSM using the transient FEM

Im Rahmen der Untersuchungen von Dreieckschaltungen für magnetisch hoch ausgenutzte Fahrmotoren wurde am IAL daher ein analytisch-numerisch gekoppelter Ansatz erarbeitet, der es erlaubt, Kreisströme zeiteffizient mit Hilfe der quasistationären FEM in Drehzahl-Drehmoment-Kennfeldern zu berechnen, ohne Einschwingzeiten in Kauf nehmen zu müssen (siehe Abb. 41).

Mit Kenntnis des Kreisstroms können dessen technische Wirkungen und das Betriebsverhalten von Synchronmaschinen in Dreieckschaltung analysiert werden. Die Untersuchungen zeigen, dass die zusätzlichen Stromwärmeverluste im Fahrzyklus durch verminderte Ummagnetisierungsverluste nahezu kompensiert werden, sodass Maschinen in Stern- und in Dreieckschaltung praktisch denselben Zykluswirkungsgrad aufweisen. Die messtechnische Validierung der erarbeiteten Berechnungsmethodik erfolgte an einer PSM in Dreieckschaltung. Das Ziel der Forschung ist eine ganzheitliche Bewertung der Verwendung der Dreieckschaltung für PSM und ESM als Fahrtriebe.

Fig. 40), which increases the calculation time significantly. In our investigations of delta connections for magnetically highly utilized traction motors, we therefore developed a coupled analytical-numerical approach, which allows time-efficient calculation of circulating currents with the help of quasi-stationary FEM in speed-torque maps without having to accept transient recovery times (see Fig. 41).

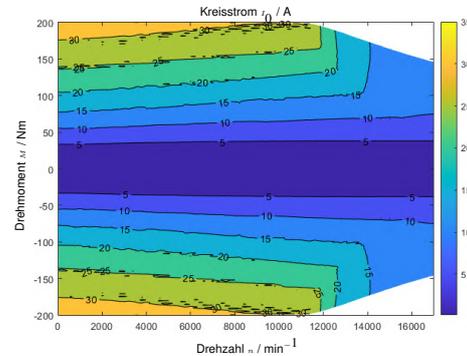


Abb. 41: Kreisstrom I_0 im Drehzahl-Drehmoment-Kennfeld einer PSM für den Einsatz im Elektrofahrzeug

Fig. 41: Circulating current I_0 in a torque-speed map of a PSM with delta-connected windings

Knowing the circulating current, we can analyse its technical effects and the operating behaviour of synchronous machines in delta connection. The investigations show that the additional ohmic losses in the drive cycle are almost completely compensated by reduced iron losses, so that machines in star and delta connection have practically the same drive cycle efficiency. The validation of the developed calculation methodology by measurements was performed on a PSM in delta connection. The research goal is a comprehensive evaluation of the use of the delta connection for PSM and ESM as traction drives.

HF-Effekte in elektrischen Antriebssystemen

**von Mohammad Ali, M.Sc.,
Jochen Dittmann, M.Sc.,
Alexander Hoffmann, M.Sc.,
Benjamin Knebusch, M.Sc.,
Hedieh Movagharnejad, M.Sc.
und Jan Ole Stockbrügger, M.Sc.**

Innerhalb der letzten Jahre haben viele Hersteller von Leistungshalbleitern ihr Portfolio mit Wide-Bandgap (WBG)-Leistungshalbleitern aus Siliziumkarbid (SiC) oder Galliumnitrid (GaN) erweitert. Insbesondere SiC-Bauelemente in Form von MOSFETs sind dadurch mittlerweile auch für Anwendungen höherer Leistung bis in den dreistelligen Kilowatt-Bereich am Markt verfügbar und stellen eine Konkurrenztechnologie zu den konventionellen Silizium (Si)-Leistungshalbleitern (IGBT, MOSFET) dar. WBG-Leistungshalbleiter ermöglichen ein deutlich schnelleres Schalten gegenüber konventionellen Si-Halbleitern, wodurch die Schaltverluste signifikant reduziert werden können. Infolgedessen steigt der Wirkungsgrad, und es werden höhere Schaltfrequenzen ermöglicht, wodurch die Größe der passiven Bauelemente im Umrichtersystem deutlich reduziert werden kann. Diese Eigenschaften machen die Technologie insbesondere bei hohen Anforderungen an die Leistungsdichte, wie beispielsweise in der Elektromobilität, interessant. Den genannten Vorteilen stehen aber auch Nachteile gegenüber, die durch das schnelle Schalten der WBG-Halbleiter hervorgerufen werden: Die Flankensteilheit der Ströme (di/dt) und Spannungen (du/dt) steigt um etwa eine Größenordnung an. Daraus resultiert zum einen eine dynamische Isolationsbeanspruchung aufgrund von Überspannungen im Wicklungssystem, und zum anderen können Ströme durch die Lager der elektrischen Maschine getrieben werden. Insbesondere die steileren Spannungsflanken und die höheren Taktfrequenzen verursachen kritische hochfrequente Anregungen und erhöhen die Gleichtaktströme durch parasitäre Kapazitäten, was zu einem erhöhten Filteraufwand im Bereich der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) führt. Vor diesem Hintergrund forscht das IAL im Rahmen verschiedener Projekte an der HF-Modellbildung in elektrischen Antriebssystemen sowie an einem besseren Verständnis der physikalischen Wechselwirkung und an Methoden zur Systemsimulation und zur optimalen Systemkonfiguration und -dimensionierung.

HF Effects in Electrical Drive Systems

**by Mohammad Ali, M.Sc.,
Jochen Dittmann, M.Sc.,
Alexander Hoffmann, M.Sc.,
Benjamin Knebusch, M.Sc.,
Hedieh Movagharnejad, M.Sc.,
and Jan Ole Stockbrügger, M.Sc.**

In recent years, many power semiconductor manufacturers have expanded their portfolio with wide-bandgap (WBG) power semiconductors made of silicon carbide (SiC) or gallium nitride (GaN). In particular, SiC components in the form of MOSFETs are now available on the market even for higher power applications up to the three-digit kilowatt range, thus being a competitive technology to conventional silicon (Si) power semiconductors (IGBT, MOSFET). WBG power semiconductors allow a much faster switching compared to conventional Si semiconductors, which significantly reduces switching losses. The result: increased efficiency and higher switching frequencies which reduces the size of the passive components in the converter system significantly. These properties make the technology particularly interesting for systems with high power density requirements like in electric mobility. Besides the aforementioned advantages, there are also disadvantages caused by the fast switching of WBG semiconductors: The current (di/dt) and voltage (du/dt) rate of change increases by about one order of magnitude. On the one hand, this results in a dynamic insulation stress due to overvoltages in the winding system, and on the other hand, currents can be driven through the bearings of the electrical machine. Especially, steeper voltage slopes and higher pulse frequencies cause critical high-frequency excitations and increase the common-mode currents due to parasitic capacitances, which leads to an increased filter effort with respect to electromagnetic compatibility (EMC). Hence, IAL is conducting various research projects on HF modelling in electrical drive systems as well as on a better understanding of the physical interaction and on methods for system simulation and for optimal system configuration and dimensioning.

EMV und Filter

Um den genannten Problemen entgegenzuwirken, kann der Einsatz von Ausgangsfiltern, wie z.B. einem du/dt-Filter zur Begrenzung der Steilheit oder einem Sinusfilter zur Erzeugung sinusförmiger Ausgangsspannungen, erwogen werden. Zur Unterdrückung der EMV-Störungen wird das entsprechende Filter zwischen die schnell schaltenden Wechselrichter und die elektrische Maschine und/oder die Stromversorgung geschaltet. Im Rahmen eines FVA-Projekts beschäftigt sich das IAL mit der genauen HF-Modellierung der Leistungselektronik, der Filter und der Zuleitungen. Dabei werden mit Hilfe von analytischen Gleichungen oder mit 3D-FEM die parasitären Elemente und insbesondere die Kapazitäten gegen Erde ermittelt, um die Gleichtakt-Effekte im System korrekt zu modellieren. Hier gelingt derzeit eine Vorausberechnung bis ca. 15 MHz. In einem weiteren Verbundprojekt werden verschiedene Filtertopologien (du/dt-Filter, Sinusfilter, EMV-Filter) aus Systemsicht untersucht. Die wichtigsten Parameter wie EMV-Grenzwerte, maximale Filter-Volumina und maximale Spannungssteilheiten werden zuvor definiert. Ziel ist es, ein Systemoptimum des SiC-Antriebsstrangs zu finden und dabei einen geeigneten Kompromiss zwischen Wirkung und Aufwand zu erreichen. Die Faktoren sind hierbei der Wirkungsgrad, das EMV-Verhalten, der Filteraufwand und die Belastung des Isoliersystems und die Lagerung der E-Maschine. Die Freiheitsgrade sind die Wahl der Filtertopologien auf Gleich- und auf Wechselstromseite sowie die Schaltfrequenz und der Spannungsgradient. In Abb. 42 sind Filter verschiedener Stufen und deren beanspruchtes Volumen über der Schaltfrequenz aufgetragen.

Die in diesem Projekt vorgeschlagene Filter-Auslegungsmethodik wird auf das System mit verschiedenen Schaltfrequenzen angewandt, um die Auswirkung der Schaltfrequenz auf den EMV-Filterbedarf zu untersuchen, was für den gesamten Systementwurf wichtig ist. Die Kenntnis des EMV-Filterbedarfs und der Systemeigenschaften in Abhängigkeit von der Schaltfrequenz sind für die Designer hilfreich, um das Volumen und das Verhalten ihres leistungselektronischen Designs vor der Implementierung eines Testaufbaus vorherzusagen. Die Verwendung eines konventionellen EMV-Filter-Auslegungsverfahrens verhindert dagegen einen flexiblen und schnellen Entwurfsprozess des gesamten Systems.

EMC and Filter

To avoid the problems mentioned above, the use of output filters, such as a du/dt filter to limit the steepness or a sine filter to generate sinusoidal output voltages, can be considered. To suppress EMC interference, the appropriate filter is connected between the fast switching inverters and the electrical machine and/or power supply. Within the scope of an FVA project, IAL is working on precise HF modelling of the power electronics, the filters and the supply lines. Thereby, the parasitic elements and especially the capacitances against ground are determined with the help of analytical equations or with 3D-FEM in order to model the common-mode effects in the system correctly. At present, a prediction up to approx. 15 MHz is possible. In a further joint project, different filter topologies (du/dt filter, sinusoidal filter, EMC filter) are investigated from a system perspective. The most important parameters, such as EMC limits, maximum filter volumes and maximum voltage slopes, are defined in advance. The aim is to find a system optimum of the SiC powertrain and to achieve a suitable trade-off between effect and effort. The factors here are efficiency, EMC behaviour, filter effort and load, insulation system and bearing of the electrical machine. The degrees of freedom are the choice of filter topologies on the DC and AC side as well as the switching frequency and the voltage gradient. In Fig. 42, filters of different stages and their loaded volume are plotted against the switching frequency.

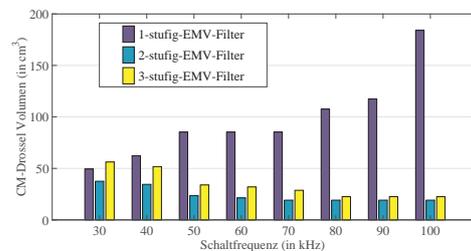


Abb. 42: Gegenüberstellung verschiedener EMV-Filterstufen und deren Volumina in Abhängigkeit von der Schaltfrequenz
Fig. 42: Comparison of different EMC filter stages and their volumes depending on the switching frequency

The filter design methodology proposed in this project is applied to the system with different switching frequencies to investigate the effect of the switching frequency on the EMC filter requirements, which is important for the overall system design. Knowledge of the EMC filter requirement and system characteristics as a function of switching frequency is helpful for designers to predict the volume and behaviour of their power electronic design prior to implementing a test setup. In contrast, the use of a conventional EMC filter design process prevents a flexible and fast design process of the entire system.

Vorausberechnung zirkularer Lagerströme

Die vom Frequenzrichter verursachte hochfrequente Gleichtaktspannung hat einen kapazitiven Stromfluss über die parasitäre Kapazität zwischen Ständerwicklung und Blechpaket zur Folge. Dieser hochfrequente Strom wird auch als Erdstrom bezeichnet. Durch den Erdstrom entsteht ein zirkulares Magnetfeld im Statorjoch. Dieses Feld induziert eine Spannung in der Leiterschleife aus Rotorwelle, Lager, Lagerschilden und Gehäuse. Ziel der Untersuchungen am IAL ist es unter anderem, den entstehenden Erdstrom und die dadurch entstehenden zirkularen Lagerströme vorzuberechnen und damit bereits im Dimensionierungsprozess die gegebenenfalls wirksamste und wirtschaftlichste Konfiguration zur Vermeidung von Lager- oder Getriebebeschäden zu erarbeiten. Mit Hilfe eines verteilten Netzwerks, welches die elektrischen Eigenschaften jeder Windung der Maschine durch Ersatzparameter abbildet, ist eine Berechnung der auftretenden Erdströme bei verschiedenen Spannungsbeanspruchungen möglich. Die Ersatzparameter berücksichtigen zum einen die sich ausbildenden parasitären Kapazitäten und zum anderen den Widerstand sowie die jeweilige Induktivität der einzelnen Windungen. Eine Validierung der vorausgerechneten zirkularen Lagerströme wird an verschiedenen Statoren durchgeführt. Die auftretenden Spannungsverläufe werden messtechnisch erfasst und dienen als Eingangsgröße für das verteilte Netzwerk. Wie in Abb. 43 dargestellt, zeigen Untersuchungen, dass das Maximum des auftretenden Erdstroms, welches für den zirkularen Lagerstrom maßgeblich ist, gut vorausberechnet werden kann.

Durch die Berücksichtigung von induktiven Kopplungen zwischen den Leitern und die Berechnung von frequenzabhängigen Ersatzparametern ist eine Erhöhung der Genauigkeit der Vorausberechnung möglich. Zukünftig soll der Modellierungsgrad mit der Berücksichtigung von weiteren auftretenden Effekten, wie den kapazitiven Kopplungen zwischen den Leitern im Wicklungskopf sowie einer genaueren Abbildung der parasitären Kapazitäten innerhalb einer Nut, vergrößert werden und damit eine noch bessere Vorausberechnung möglich sein.

Prediction of Circular Bearing Currents

The high-frequency common-mode voltage caused by the frequency converter results in a capacitive current flowing via the parasitic capacitance between the stator winding and the laminated core. The high-frequency current, which is also called ground current, creates a circular magnetic field in the stator yoke. The magnetic field induces a voltage in the conductor loop formed by rotor shaft, bearing, end shields and housing. The aim of the investigations conducted at IAL is, among other things, to predict the generated ground current and the resulting circular bearing currents. A prediction allows the development of the most effective and cost-efficient configuration already in the dimensioning process, in order to avoid bearing or gearbox damage. With the help of a distributed network, which maps the electrical parameters of each winding in the machine by means of equivalent parameters, it is possible to predict the occurring ground currents for different voltage stresses. The equivalent parameters consider the developing capacitances as well as the resistance and the respective inductance of the individual windings. The predicted circular bearing currents are validated on various stators. The voltage curves are measured and used as input variable for the distributed network. As shown in Fig. 43, the maximum occurring ground current, which is decisive for the circular bearing current, can be predicted very well.

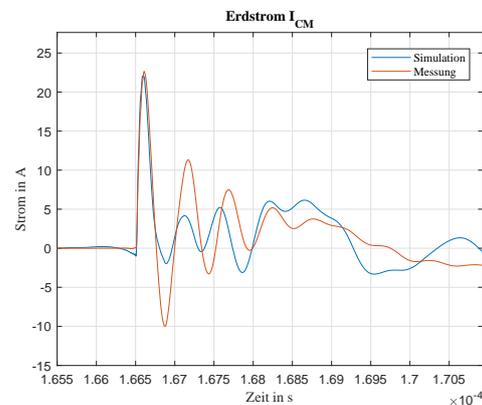


Abb. 43: Gegenüberstellung des berechneten und des gemessenen Erdstroms

Fig. 43: Comparison of the calculated and the measured ground current

The prediction accuracy can be further increased by considering inductive couplings between the conductors and calculating frequency-dependent equivalent parameters. The aim of future research is to enhance the modelling depth by considering other effects like capacitive couplings between the conductors in the end-winding region and by improving the mapping of parasitic capacitances in a slot, thus enabling an even better prediction accuracy.

Ermittlung der Potentialverteilung in der Ständerwicklung

Neben der resultierenden Gleichtaktspannung erfährt die elektrische Maschine bei Umrichterspeisung auch eine erhöhte Beanspruchung der Wicklungsisolierung durch die immer steiler werdenden Spannungsfanken. Unabhängig davon, ob ein Spannungszwischenkreisumrichter oder eine andere leistungselektronische Topologie verwendet wird, ist die resultierende Änderung an den Anschlussklemmen ein Spannungsimpuls, der ursächlich für die Überbeanspruchung der Wicklungsisolierung ist. Ziel von Untersuchungen am IAL ist es, diese Beanspruchungen innerhalb der Wicklung vorauszurechnen, dies messtechnisch zu validieren und so Kriterien für die Dimensionierung des Isoliersystems oder eine beanspruchungsarme Gestaltung der Maschine zu erarbeiten.

Die messtechnische Validierung wird an einem Statorversuchsmuster durchgeführt, wie es in Abb. 44 dargestellt ist. Die Anschlüsse sind mit den einzelnen Windungen der Spulen verbunden und ermöglichen es so, die Spannung jeder Windung zu messen.

Die aus der Messung abgeleiteten Erkenntnisse werden zusammen mit dem Wissen über den Aufbau der elektrischen Maschine in eine Methode zur Vorausberechnung der Potentialverteilung innerhalb der Wicklung überführt. Erste Ergebnisse sind, dass die Spannung zwischen den Windungen die Zwischenkreisspannung überschreiten kann, dass ein Zusammenhang mit der Gegentaktimpedanz der elektrischen Maschine vorliegt und dass die Modellierung als verteiltes elektrisches Netzwerk eine brauchbare Abbildung des zugrundeliegenden Feldproblems darstellt. Zukünftig soll neben der Vorausberechnung anhand von Konstruktionsdaten der elektrischen Maschine der Einfluss auf die Lebensdauer sowie der Einfluss von Filtern auf die Spannungsverteilung untersucht werden. Sind diese Arbeiten abgeschlossen, soll es möglich sein, elektrische Maschinen zu entwerfen, die mit schnell schaltenden Leistungshalbleitern ohne Filter betrieben werden können.

Determination of the Potential Distribution in the Stator Winding

In addition to the resulting common-mode voltage, a converter-fed electrical machine is also subjected to increased stress on the winding insulation due to the increasingly steep voltage slope. Regardless of whether a voltage source inverter or another power electronic topology is used, the resulting change at the motor terminals is a voltage pulse which excessively stresses the winding insulation. The aim of investigations done at IAL is to predict these stresses within the winding, to validate them by measurements and thus to develop criteria for the dimensioning of the insulation system or for a low-stress design of the machine.

The validation by measurements is performed on a stator test sample as shown in Fig. 44. The terminals are connected to the individual turns of the coils, allowing the voltage of each turn to be measured.



Abb. 44: Statorversuchsmuster mit Anschlüssen auf der rechten Seite zur Messung der Potentialverteilung

Fig. 44: Stator test sample with connections on the right side for measuring the potential distribution

The findings derived from the measurement, together with the knowledge about the design of the electrical machine, is transformed into a method for the prediction of the potential distribution within the winding. First results are that the voltage between the windings can exceed the DC link voltage, that there is a correlation with the differential-mode impedance of the electrical machine, and that the modelling as a distributed electrical network suitably maps the underlying field problem. Besides the prediction based on design data of the electrical machine, future research will deal with the influence on the lifetime as well as with the influence of filters on the voltage distribution. The ultimate goal is to design electrical machines that can be operated with fast switching power semiconductors without filters.

Rechnerische Bestimmung parasitärer Kapazitäten

Um die jeweils vorgestellten Belastungen der elektrischen Maschine durch Hochfrequenzanteile in der speisenden Spannung vorausberechnen zu können, ist es nötig, die sich ausprägenden parasitären Kapazitäten genau zu bestimmen. In der Grobdimensionierung von elektrischen Maschinen bieten sich einfache und zeiteffiziente analytische Bestimmungsgleichungen zu deren Abschätzung an. Die Anwendung der Gleichung eines Platten- oder Zylinderkondensators als einfachstes Modell führt jedoch auf Grund der Annahme eines eindimensionalen Feldgebiets zu signifikanten Abweichungen gegenüber FEM-Simulationen und Messungen. In der Elektrostatik gilt es, für die Bestimmung des skalaren Potentialfelds in einem betrachteten Raumgebiet mit linearen, isotropen und homogenen Materialien die Poisson-Gleichung zu lösen. Sofern keine Raumladungen in dem Gebiet vorhanden sind, vereinfacht sich die Poisson-Gleichung zur Laplace-Gleichung. Diese kann mit den in der Elektrostatik bekannten Verfahren der Separationsmethode sowie der Spiegelungs- und der Ersatzladungsmethode gelöst werden. Die Auswahl einer Methode erfolgt in Abhängigkeit vom betrachteten Feldgebiet. Bei der Separationsmethode wird in dem gewählten Koordinatensystem die partielle Differentialgleichung mittels eines Produktansatzes in gewöhnliche Differentialgleichungen überführt. Abschließend erfolgt die Anpassung der Lösung an die gestellten Randbedingungen. Diese Methode eignet sich zur Bestimmung der Potentialfelder zwischen der Ständerwicklung und dem Rotor im Aktivteil und im Stirnraum sowie des Potentialfelds zwischen der Ständerwicklung und dem Statorblechpaket im Stirnraum einer elektrischen Maschine. Mit Hilfe der Spiegelungsmethode werden in das Lösungsgebiet eingebettete dielektrische Grenzflächen oder ideale Leiter durch sogenannte „Spiegelladungen“ ersetzt. Nach dieser Substitution entsteht ein Ersatzproblem, bei dem nur noch natürliche Randbedingungen auftreten und das resultierende Potentialfeld durch Superposition der entsprechenden Werte der Potentiale der Einzelladungen ermittelt werden kann. In Kombination mit der Ersatzladungsmethode zur korrekten Ermittlung des Nahfelds dient die Spiegelungsmethode zur Bestimmung des Potentialfelds zwischen den Leitern der Ständerwicklung und dem Statorblechpaket. Im Anschluss an die Berechnung der skalaren Potentialfelder werden die influenzierten Ladungen auf den Elektroden ermittelt, und unter Anwendung der maxwellschen Kapazitätskoeffizienten erfolgt abschließend die Bestimmung der parasitären Kapazitäten. Die Anwendung der Methoden führt schließlich zur Bestimmung des Nutschlitz- und des Stirnraumanteils der Ständerwicklung-Rotor-Kapazität, des

Computational Determination of Parasitic Capacitances

In order to be able to predict the loads on the electrical machine caused by high-frequency components in the supply voltage, it is necessary to precisely determine the parasitic capacitances. In the rough dimensioning of electrical machines, simple and time-efficient analytical conditional equations can be used for their estimation. However, the use of the equation of a plate or cylindrical capacitor as the simplest model leads to significant deviations compared to FEM simulations and measurements due to the assumption of a one-dimensional field region. In electrostatics, the Poisson equation has to be solved for the determination of the scalar potential field in a considered space region with linear, isotropic and homogeneous materials. If there are no space charges in the region, the Poisson equation is simplified to the Laplace equation. It can be solved with the Fourier method (separation of variables) as well as with the method of image charges and the charge simulation method known in electrostatics. The choice of method depends on the field region under consideration. With the separation method, the partial differential equation is transformed into ordinary differential equations in the selected coordinate system using a method of separation of variables. Finally, the solution is adapted to the given boundary conditions. This method is suitable for determining the potential fields between the stator winding and the rotor in the active part and in the end-winding as well as the potential field between the stator winding and the stator lamination in the end-winding of an electrical machine. With the help of the method of image charges, dielectric interfaces or ideal conductors embedded in the solution region are replaced by so-called "mirror charges". The result is a substitution problem with natural boundary conditions where the resulting potential field can be determined by superposition of the corresponding values of the potentials of the individual charges. In combination with the charge simulation method for correct determination of the near field, the method of image charges is used to determine the potential field between the conductors of the stator winding and the stator lamination. Following the calculation of the scalar potential fields, the influenced charges on the electrodes are determined, and finally the parasitic capacitances are determined by applying the Maxwell capacitance coefficients. The application of the methods finally leads to the determination of the slot and end-winding portion of the stator winding-to-rotor capacitance, the slot and end-winding portion of the stator winding-to-stator core capacitance and the conductor-to-conductor capacitances.

Nut- und des Stirnraumanteils der Ständerwicklung-Statorblechpaket-Kapazität und der Leiter-Leiter-Kapazitäten.

Bewertung von Wellenerdungssystemen

Zur Reduktion der kapazitiv eingekoppelten Lager-spannung werden im industriellen wie auch im auto-mobilen Umfeld häufig Wellenerdungssysteme ein-gesetzt. Diese verbinden die Motorwelle nieder-impedant mit dem Statorgehäuse und reduzieren damit die Spannung am Lager. Neben konven-tionellen Kohlebürsten werden hier neuere Mate-rialien wie beispielsweise Kohlenstofffasern einge-setzt, welche eine geringere Reibung aufweisen. Im Pulswechselrichter-Betrieb mit steilen Schaltflanken ist aber nicht nur der reine Erdungswiderstand, son-dern die Gesamtimpedanz der Verbindung von In-teresse. Die Erdungsbürste muss im Betrieb dafür sorgen, die Spannung am Lager auf ein vertretbares Maß zu reduzieren. Das IAL befasst sich mit dem Entwurf und Aufbau von Messapparatur, um einer-seits die geeigneten Messabläufe und Messverfah-ren zu vergleichen. Andererseits werden Ableittech-nologien sowie Oberflächen und deren Beschich-tung hinsichtlich der Eignung zur Ableitung unter-sucht.

Characterization of Shaft Grounding Devices

In automotive and industrial environments, shaft grounding systems are used to reduce of the capaci-tively coupled bearing voltage. These systems con-nect the motor shaft with low impedance to the stator housing and thus reduce the bearing voltage. Be-side conventional carbon brushes, more recent ma-terials such as carbon fibres are used, which have a lower coefficient of friction and wear compared to the conventional systems. In frequency converter operation with steep switching edges, however, not only the pure shaft-to-ground resistance is of inter-est. Also the total impedance of the connection must be investigated to ensure that the bearing voltage is reduced to an acceptable level. The institute is concerned with the design and construction of mea-suring equipment in order to compare suitable mea-suring procedures and measuring methods for the characterization of shaft grounding devices. On the other hand, grounding technologies as well as shaft surfaces and their coating are examined with regard to their suitability for grounding rotating shafts.

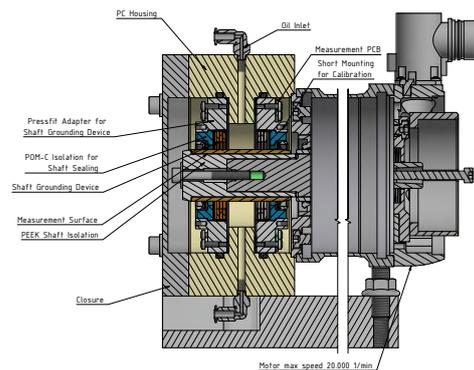


Abb. 45: Prüfstand zur Qualifizierung von Wellenerdungssystemen

Fig. 45: Test bench for characterization of shaft grounding devices

Besondere Aktivitäten | Special Activities

Neues in und von FEMAG

von Dr.-Ing. Jörn Steinbrink

Die Arbeit an FEMAG mit den Berechnungsmodulen DC, AC, ME, TH und TS bleibt eine Konstante. Die weitere Ausrichtung der Programmfamilie auf aktuelle Fragestellungen für eine zukünftige Nutzung zeigt sich unter anderem in der Erstellung einer neuen Oberfläche, die aus iFEMAG weiterentwickelt wurde und in einer Umbenennung der Produktfamilie mündete. Die bisherigen Module werden unter dem Namenszusatz Classic weitergeführt und die Oberfläche iFEMAG wurde in FEMAG umbenannt. Eine weitere wesentliche Neuerung ist die Möglichkeit, FEMAG als ein Service als Cloudapplikation auszuführen. Hinzugekommen ist auch die Anwendung unter Mac OS, so dass eine breite Nutzungsmöglichkeit in allen gängigen Betriebssystemen besteht.

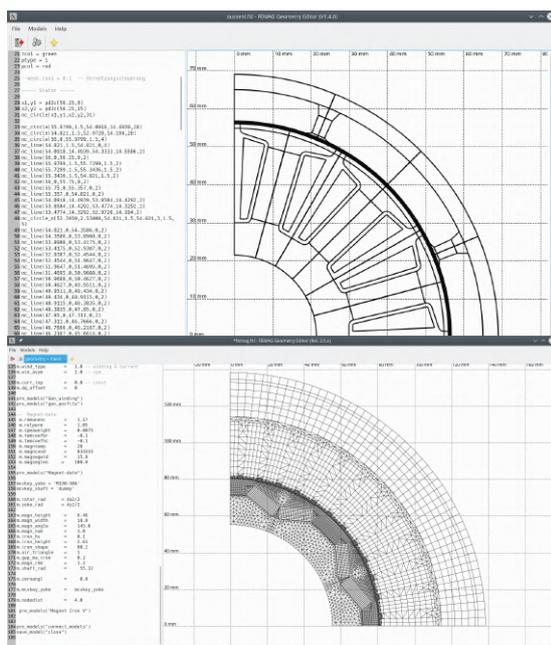


Abb. 46: Geometrie Editor, neu in 2019
Fig. 46: Geometry editor, new in 2019

In 2019 konnten wir noch das gewohnte Format des Anwendertreffens mit Unterstützung von SEW in Bruchsal durchführen. Besonders spannend und kurzweilig fand ich den Vortrag von Herrn Hillmann zu Schadensfällen elektrischer Maschinen, weil diese über den Tellerrand der täglichen Arbeit hinausging. Über einen interessanten Einsatz von FEMAG berichtete Herr Grabs mit der Gleichteilkonzeption. Die Vorbereitungen für das Treffen 2020 mussten dann im Frühjahr auf ein Online-Format und damit auch das Programm umgestellt werden. Ver-

Novelties around FEMAG

by Dr.-Ing. Jörn Steinbrink

The work on FEMAG with the calculation modules DC, AC, ME, TH and TS remains a constant. The continuing orientation of the programme family to current questions for future use is shown, among other things, in the creation of a new user interface, which was developed from iFEMAG, resulting in a renaming of the product family. The previous modules will be continued under the name affix Classic and the interface iFEMAG was renamed as FEMAG. Another significant innovation is the possibility to run FEMAG as a service as a cloud application. The application under Mac OS was also added, so that there are many utilisation possibilities in all common operating systems.



Abb. 48: Auditorium des Anwendertreffens 2019 in Bruchsal
Fig. 48: Auditorium of User Meeting 2019 in Bruchsal

In 2019, we were still able to hold the usual format of the user meeting with the support of SEW in Bruchsal. I found Mr Hillmann's lecture on damage to electrical machines particularly exciting and entertaining, because it showed us the bigger picture of our daily work. Mr Grabs reported on an interesting use of FEMAG with the concept of equal parts. The preparations for the 2020 meeting then had to be changed to an online format in spring, and with it the programme. Spread over several days, the virtual user meeting took place with a very large response, unfortunately the direct personal discussion possibilities were missing. Nevertheless, an important criterion of machine dimensioning could be dealt with, with the focus on loss calculation in permanent magnets. There will be further activities in this area and FEMAG users will be provided with a precise and comprehensible tool. As in previous years, we would like to thank all users for their numerous creative suggestions and hope for further impulses for future developments. Moreover, we would appreciate ref-

teilt auf mehrere Tage fand das virtuelle Anwendertreffen mit sehr großer Resonanz statt, leider fehlten die direkten persönlichen Diskussionsmöglichkeiten. Trotzdem konnte mit dem Schwerpunkt der Verlustberechnung in Permanentmagneten ein wichtiges Kriterium der Maschinendimensionierung behandelt werden. In dem Bereich wird es weitere Aktivitäten geben und den Nutzern von FEMAG ein präzises und nachvollziehbares Werkzeug zur Verfügung gestellt.

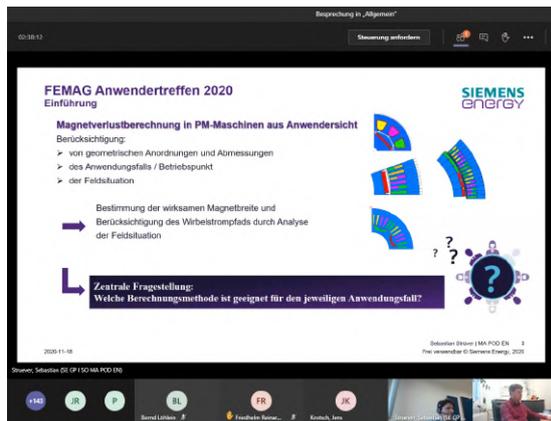


Abb. 47: Eine Szene des virtuellen Anwendertreffens 2020
 Fig. 47: One screenshot of virtual User Meeting 2020

Wir bedanken uns bei den Anwendern wie in den Vorjahren für die vielen kreativen Anregungen und hoffen auf weitere Impulse zur Weiterentwicklung sowie Hinweise bei bislang unentdeckten Unstimmigkeiten. Ich bin überzeugt, dass nur gemeinsam die Werkzeuge für unsere tägliche Arbeit verbessert werden können. Die Ideen werden Ihnen und uns auch in Zukunft mit Sicherheit nicht ausgehen.

ferences to previously undiscovered discrepancies. I am convinced that only together we can improve the tools for our daily work. All of us will certainly not run out of ideas in the time to come.

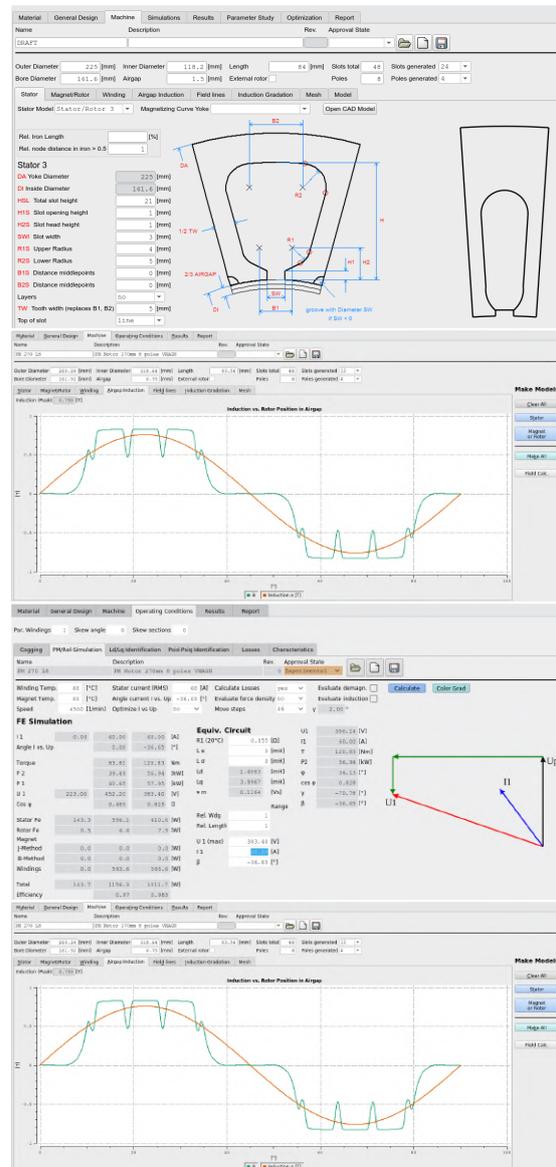


Abb. 49: Neue Oberfläche von FEMAG
 Fig. 49: New front end panel of FEMAG

Lehre am IAL | Teaching at IAL

Lehrveranstaltungen

Auch auf dem Gebiet der Lehre gibt es einige Neuigkeiten, die besondere Erwähnung verdienen. Die größten Veränderungen – zwar nicht inhaltlich, aber in Bezug auf die Lehrformate – sind natürlich den coronabedingten Einschränkungen geschuldet. Nachdem im März 2020 klar wurde, dass Präsenzlehre zumindest bei Vorlesungen und Übungen im Sommersemester unmöglich sein wird, musste in Windeseile darüber entschieden werden, welches der möglichen digitalen Lehrformate wir für am besten geeignet halten, und die technischen Voraussetzungen für dessen Umsetzung geschaffen werden. Prof. Mertens und Prof. Ponick haben sich für ihre Vorlesungen für die Erstellung von Videoaufzeichnungen entschieden, bei denen ein wissenschaftlicher Mitarbeiter jeweils die Bildregie hatte und zwischen Kamerabild, Folienpräsentation und Tafel- bzw. Smartboardanschrieb gewechselt wird, was dem Ablauf von Präsenzvorlesungen schon recht nahekommt. Zur Beantwortung von Fragen der Studierenden wurden die Videoaufzeichnungen durch Live-Sprechstunden – natürlich ebenfalls online – ergänzt. Die vorlesungsbegleitenden Übungen wurden durch die wissenschaftlichen Mitarbeiter ebenfalls durchweg live und online gehalten, was zwar die didaktischen Möglichkeiten einschränkt, aber zumindest unmittelbare Rückfragen von Studierenden zulässt. Die vorlesungsbegleitenden Labore konnten in den virusärmeren Sommermonaten unter Beachtung besonderer Hygieneregeln fast durchweg in gewohnter Form vor Ort durchgeführt werden. Während des strikteren Lockdowns hat sich Prof. Mertens für eine Umstellung einiger Laborversuche auf ein digitales Format entschieden, wobei sich die Studierenden mit Hilfe von gängigen Simulationsprogrammen ein besseres Verständnis der Schaltungen und Funktionsweisen erarbeiten konnten. Dadurch wurde die Situation im Labor entzerrt, was der Durchführung der restlichen Versuche zugute kam.

Prof. Ebrahimi und Prof. Friebe haben sich ebenso wie unsere Lehrbeauftragten Dr. Möller und Prof. Gent für ihre Vorlesungen für ein digitales Live-Format entschieden, was bei kleineren Hörerzahlen sicher eine bessere Interaktion mit den Studierenden ermöglicht.

Im Wintersemester 2020/21 gelten dieselben Rahmenbedingungen. Lediglich die Übung zur Vorlesung Grundlagen der elektromagnetischen Energie wandlung durfte in den ersten Wochen als Präsenzveranstaltung angeboten werden – natürlich mit wenigen Personen verteilt auf große Räume (das Audimax war z. B. für ca. 90 Personen zugelassen); seit

Lectures

There is also some news in the field of teaching that is worth mentioning. The biggest changes - not in terms of content, but in terms of teaching formats - are of course due to the corona-related restrictions. After it became clear in March 2020 that face-to-face teaching would be impossible, at least for lectures and exercises in the summer term, a decision had to be made in a hurry as to which of the possible digital teaching formats we consider most suitable, and the technical framework for its implementation had to be created. Prof. Mertens and Prof. Ponick decided to create video recordings for their lectures, with a research assistant directing the images and alternating between camera images, slide presentations and blackboard or smartboard writing, which is quite similar to the process of face-to-face lectures. To answer students' questions, the video recordings were supplemented by live consultations - also online, of course. The exercises accompanying the lectures were also held live and online by the research assistants, which limits the didactic options, but at least allows direct questions from students. In the summer months, when the virus situation was less severe, the labs accompanying the lectures could be held almost entirely on site in the usual way, observing special hygiene rules. During the stricter lockdown, Prof. Mertens opted to switch some of the lab experiments to a digital format, using common simulation programmes to help students gain a better understanding of the circuitry and how it works. This eased the situation in the lab, which was beneficial for conducting the other experiments.

Prof. Ebrahimi and Prof. Friebe as well as our lecturers Dr. Möller and Prof. Gent opted for a live digital format for their lectures, which certainly allows for better interaction with the students in smaller audiences.

The same general conditions applied in the 2020/21 winter term. Only the exercise for the lecture Basics of Electromagnetical Power Conversion was allowed to be presented as a face-to-face event in the first few weeks - naturally with a few people distributed over large rooms (the Audimax, for example, was licensed for approx. 90 people); since mid-November, we had to switch back to a digital live format here as well.

There is news above all about our lectureships: With Dr. Boris Dotz, we were able to gain an expert in vehicle drives, enriching the English-language curriculum with a lecture on Electrical Machines for eAutomotive Traction Applications from the winter term 2020/21. And our long-time lecturer Dr. Möller lectured on Electrical Traction and Vehicle Drives for

Mitte November musste auch hier wieder auf ein digitales Live-Format umgestellt werden.

Neuigkeiten gibt es vor allem rund um unsere Lehraufträge: Mit Dr. Boris Dotz konnten wir einen Experten für Fahrzeugantriebe gewinnen, der seit dem Wintersemester 2020/21 das englischsprachige Lehrangebot mit einer Vorlesung zu Electrical Machines for eAutomotive Traction Applications bereichert. Und unser langjähriger Lehrbeauftragter Dr. Möller hat Vorlesung über Elektrische Bahnen und Fahrzeugantriebe auf eigenen Wunsch im Sommersemester 2020 zum letzten Mal gehalten. Wir freuen uns, dass wir mit Dr. Germishuizen einen erfahrenen Fachmann für Bahnantriebe gewinnen konnten, der die Vorlesung ab dem Sommersemester 2021 übernehmen wird.

Ganz neu ist auch ein Seminar zu ethische Aspekte des Ingenieurberufs, das erstmals im Wintersemester 2020/21 gemeinsam von Prof. Ponick und Frau Dr. Preißler aus dem Studiendekanat der Fakultät angeboten wird und auf Anhieb so großes Interesse auf Seiten der Studierenden gefunden hat, dass es in Zukunft voraussichtlich sowohl in Sommer- als auch in Wintersemestern angeboten wird und das erste Lehrangebot der Fakultät zu den ethischen Dilemmata ist, mit denen ein Ingenieur in seinem Berufsleben konfrontiert sein kann.

All denen, die dazu beigetragen haben, den Studierenden auch unter schwierigen Bedingungen ein attraktives Lehrangebot bieten zu können, gilt unser herzlicher Dank.

the last time in the 2020 summer term at his own request. We are pleased to have been able to recruit Dr. Germishuizen, an experienced expert in traction drives, who will take over the lecture from the summer term 2021.

Another brand-new seminar is on ethical aspects of the engineering profession, offered for the first time in the 2020/21 winter term jointly by Prof. Ponick and Dr. Preißler from the Faculty's Dean of Studies' Office and immediately attracting so much interest among students that it will probably be held in both summer and winter term in future. It is the first course offered by the Faculty on the ethical dilemmas that an engineer can be confronted with in his professional life.

Our deepest thanks go to all those who have contributed to being able to offer students an attractive curriculum even under difficult conditions.

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, Segmentspannungskurve.

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

Labore: Permanentmagneterregter Servosynchronmotor und Gleichstrom-Reihenschlussmotor am Gleichstrom-Pulswandler

Lernziel: Aufbauend auf den Grundlagen elektrischer Maschinen (wird als Vorkenntnis vorausgesetzt!) vermittelt dieses Modul anwendungsorientierte Grundkenntnisse über drehzahlveränderliche elektrische Antriebssysteme.

Stoffplan: Nach erfolgreichem Abschluss dieses Moduls können die Studierenden

- die Struktur von geregelten elektrischen Antriebssystemen erläutern,
- typische Lasten und ihre stationäre Kennlinie beschreiben,
- Getriebe, lineare Übersetzungen und weitere Antriebselemente beschreiben,
- die Anforderungen an den elektrischen Antrieb aus der Antriebsaufgabe ableiten,
- Bestandteile und Eigenschaften von drehzahlveränderbaren Antrieben mit Gleichstrom-, Permanentmagnet-Synchron- und Induktionsmaschinen erläutern,
- Betriebsverhalten, Belastungsdaten und die Betriebsgrenzen der genannten Antriebsarten für den drehzahlveränderlichen Betrieb berechnen,
- Aufbau und prinzipielle Funktionsweise der leistungselektronischen Stellglieder für die genannten Antriebe wiedergeben,
- die Struktur einer Kaskadenregelung für elektrische Antriebe wiedergeben,
- verschiedene mechanische Gebersysteme für Drehzahl und Lage beschreiben,
- das thermische Verhalten anhand vereinfachter thermischer Modelle von Maschine und Leistungselektronik im Dauer- und Kurzzeitbetrieb berechnen,
- für eine Antriebsaufgabe auf Basis der qualitativen und quantitativen Anforderungen die passenden Komponenten auswählen und zusammenstellen.

Vorkenntnisse: Grundlagen elektrischer Maschinen (Gleichstrommaschine, Permanentmagnet-Synchronmaschine, Induktionsmaschine) z.B. aus dem Modul *Grundlagen der elektromagnetischen Energiewandlung* sind unerlässliche Voraussetzung für das erfolgreiche Absolvieren der Prüfung!

Electric Drives

(4th term), V2, U1, L1

Lecture: Prof. Dr.-Ing. A. Mertens

Laboratories: Permanent magnet synchronous servo motor and DC series-wound motor on DC pulse converter

Learning Target: Based on the fundamentals of electrical machines (assumed as previous knowledge!), this module provides application-oriented basic knowledge of variable-speed electrical drive systems.

Contents: After successful completion of this module, the students can

- explain the structure of controlled electrical drive systems,
- describe typical loads and their steady-state characteristics,
- describe gearboxes, linear transmission ratios and other drive elements,
- derive the requirements for the electric drive from the drive task,
- explain the components and properties of variable-speed drives with DC, permanent magnet synchronous and induction machines,
- calculate the operating behaviour, load data and the operating limits of the above-mentioned drive types for variable-speed operation,
- describe the structure and principle function of the power electronic actuators for the abovementioned drives,
- reproduce the structure of a cascade control for electric drives,
- describe different mechanical encoder systems for speed and position,
- calculate the thermal behaviour using simplified thermal models of the machine and power electronics in continuous and short-time operation,
- select and assemble the appropriate components for a drive task on the basis of the qualitative and quantitative requirements.

Previous Knowledge: Basics of electrical machines (DC machine, permanent magnet synchronous machine, induction machine) e.g. from the module *Basics of Electromagnetical Power Conversion* are an indispensable prerequisite for successfully completing the examination!

Berechnung elektrischer Maschinen

(5. Semester), V2, Ü1, L1

Vorlesung: Prof. Dr.-Ing. B. Ponick

Labore: Unsymmetrische Induktionsmaschine und Reaktanzmessungen an einer Schenkelpol-Synchronmaschine

Inhalt:

Synchronmaschinen: Konstruktiver Aufbau und Kühlmethoden; Betriebsverhalten von Schenkelpolmaschinen im stationären Betrieb: Zeigerdiagramm, Ersatzschaltbild, Stromortskurve, Spannungsgleichungen, Potier-Dreiecke; permanenterregte 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 Felderreggerkurve 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

Laboratories: Asymmetrical induction machine and reactance measurements on a salient-pole synchronous machine

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

Labore (2 aus 5): Universalmotor, Wechselstrom-Induktionsmotor, permanentmagneterregter Servosynchronmotor, Gleichstrommaschine und permanentmagneterregte Synchronmaschine

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. Klauen-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

Laboratories (2 out of 5): Universal motor, AC induction motor, permanent magnet synchronous servo motor, DC machine and permanent magnet synchronous machine

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.

Elektronisch betriebene Kleinmaschinen

(6. bzw 8. Semester), V2, Ü1

Vorlesung: Prof. Dr.-Ing. B. Ponick

Inhalt:

Grundsätzliche Eigenschaften und Vergleich von Schritt- und Elektronik-Motoren; Magnetwerkstoffe.

Schrittmotoren: Ausführungen (Magnet-, Reluktanz- oder Hybridläufer), Betriebsarten, Kenngrößen, Ansteuerung, Dämpfungsverfahren, dynamisches Betriebsverhalten.

Elektronikmotoren: Ausführungen mit verschiedenen Strangzahlen, Walzen- und Scheibenläufer, Motoren mit genutetem Ständer oder Luftspaltwicklungen, Hybridmotoren, Switched-Reluctance-Motoren; Betriebsverhalten.

Rotorlagegeber: Inkremental- und Absolutgeber, magnetische oder optische Wirkprinzipien, Resolver.

Elektronische Schaltungen für Kleinmotoren: Netzgeführte Stromrichter (ungesteuerte Gleichrichter, halbgesteuerte Brücken) und selbstgeführte Stromrichter (Gleich- und Wechselstromsteller, Phasenanschnitt-Steuerung)

Schutzarten und Normen

Berechnungsverfahren und –werkzeuge für Kleinmaschinen (numerische Feldberechnung, Simulation transienter Vorgänge)

Small Electronically Controlled Motors

(6 or 8th term), V2, U1

Lecture: Prof. Dr.-Ing. B. Ponick

Contents:

Basic features and comparison of stepping and B.L.D.C. motors; magnet materials.

Stepping motors: designs (PM, reluctance or hybrid rotor), operating modes, characteristics, control, damping methods, dynamic performance.

B.L.D.C. motors: designs for different number of phases, drum-type and disktype rotors, motors with slotted stator or air-gap windings, hybrid motors, switched reluctance motors; performance.

Rotor position sensors: incremental and absolute value sensor, magnetic or optic principles of functioning, resolver.

Electronic supply circuits for small machines and actuators: line-commutated converters (uncontrolled rectifiers, half-controlled bridges) and selfcommutated converters (DC and AC power controller, phase control)

Types of protection and standards

Procedure and tools for the analysis of small machines (FEM analysis, dynamic simulations)

Elektrische Maschinen für eAutomotive- Traktionsanwendungen*

Studium Generale, V2, S2
Vorlesung, Journal Club: Dr.-Ing. Boris Dotz

Inhalt:

Die Vorlesung *Elektrische Maschinen für eAutomotive Traction Applications* ermöglicht es den Studierenden, die wesentlichen Anforderungen sowie die konstruktiven Herausforderungen für elektrische Maschinen im Kontext des eAutomotive-Marktes zu verstehen. Neben den Grundlagen und Funktionsprinzipien elektrischer Maschinen werden verschiedene Designaspekte, Fertigungstechniken und die Produktionskosten behandelt. Grundlegende und neue Technologien werden vorgestellt und entsprechend den Marktanforderungen verglichen.

* wird auf Englisch abgehalten

Electrical Machines for eAutomotive Traction Applications*

Studium Generale, V2, S2
Lecture, Journal Club: Dr.-Ing. Boris Dotz

Contents:

The lecture *Electrical Machines for eAutomotive Traction Applications* enables students to understand key requirements as well as design challenges for electrical machines in the context of the eautomotive market. Apart from fundamentals and working principles of electrical machines, several design aspects, manufacturing techniques and product costs are covered. Basic and new technologies are presented and compared according to market demands.

* held in English language

Elektrische Antriebssysteme

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

Labore (2 aus 4): Induktionsmaschine mit Käfigläufer am Pulsumrichter, doppeltgespeister Asynchrongenerator, Drehstrom Induktionsmaschine und Vollpolsynchronmaschine

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, Netzschnittschaltung 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

Laboratories (2 out of 4): Induction machine with squirrel-cage rotor on pulse converter, double-fed asynchronous generator, three-phase induction machine and synchronous machine with cylindrical rotor

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.

Ethische Aspekte des Ingenieurberufs

(4. Semester), S1

**Vorlesung: Prof. Dr.-Ing. B. Ponick, Dr. Inske
Preißler**

Inhalt:

In diesem Seminar werden grundlegende Ansätze und Methoden einer interdisziplinären, angewandten Ethik behandelt. Dabei werden ethische, soziale und kulturelle Dimensionen der Ingenieurwissenschaften und Fragen der Verantwortung anhand von Texten und Fallstudien diskutiert und bewertet. Voraussetzung ist die Bereitschaft, Texte zu lesen und sich aktiv in Diskussionen einzubringen. Die Studierenden erhalten die Möglichkeit, Themen zu recherchieren, eigene Themenwünsche einzubringen und das Seminar dadurch aktiv mitzugestalten. Die Studierenden gewinnen anhand von Texten und Fallstudien aus unterschiedlichen Bereichen ein vertieftes Verständnis für die gesellschaftliche Bedeutung der Ingenieurwissenschaften. Dabei wird bei jedem Termin ein neues Thema wie beispielsweise Ethikkodizes für Ingenieure, Chancen und Risiken künstlicher Intelligenz oder Forschung für militärische Zwecke behandelt, wobei die Diskussion durch Studierende vorbereitet und moderiert wird.

Ethical Aspects of the Engineering Profession

(4th term), S1

**Lecture: Prof. Dr.-Ing. B. Ponick, Dr. Inske
Preißler**

Contents:

This seminar addresses basic approaches and methods of an interdisciplinary, applied ethics. Ethical, social and cultural dimensions of engineering sciences and questions of responsibility are discussed and evaluated on the basis of reports and case studies. The willingness to read texts and actively participate in discussions is a prerequisite. The students get the possibility to research topics, introduce their own topic requests and thus to actively participate in shaping the seminar. The students gain a deeper understanding of the social significance of engineering sciences by analysing texts and case studies from different fields. A specific topic, such as ethical codes for engineers, opportunities and risks of artificial intelligence or research for military purposes, is addressed at each session, with the discussion being prepared and moderated by students.

Leistungselektronik I

(5. Semester), V2, Ü1, L1

Vorlesung: Prof. Dr.-Ing. A. Mertens

Labore: Gleichstromwandler und Wechselstromsteller

Lernziel:

Das Modul vermittelt grundlegende Kenntnisse der Funktionsprinzipien, Bauelemente und Schaltungen der Leistungselektronik. Nach erfolgreichem Abschluss der LV können die Studierenden

- Aufbau und Eigenschaften von Leistungshalbleitern darlegen,
- aktive und passive Bauelemente für die jeweilige Anwendung passend auswählen und dimensionieren,
- netzgeführte Stromrichter und ihr Betriebsverhalten sowie ihre Netzurückwirkungen charakterisieren und berechnen,
- einfache selbstgeführte Stromrichter (Gleichstromsteller) konfigurieren und berechnen,
- dreiphasige Wechselrichter erläutern und für den jeweiligen Einsatzfall berechnen,
- einfache Systeme aus mehreren Stromrichtern konfigurieren.

Stoffplan:

Leistungselektronik (LE) zur Energieumformung mit hohem Wirkungsgrad, Anwendungsfelder der LE, Bauelemente der LE, netzgeführte Gleichrichter, Netzurückwirkungen, Gleichstromsteller, Wechselrichter mit eingepprägter Spannung, zusammengesetzte Stromrichter und Umrichter.

Vorkenntnisse:

Grundlagen der Elektrotechnik (notwendig), Grundlagen der Halbleitertechnik (empfohlen)

Power Electronics I

(5th term), V2, U1, L1

Lecture: Prof. Dr.-Ing. A. Mertens

Laboratories: DC-DC and AC-DC converters

Learning Target:

The module provides basic knowledge of the functional principles, components and circuits of power electronics. After successful completion of the course, students will be able to

- describe structure and properties of power semiconductors,
- select and dimension active and passive components appropriately for the respective application,
- characterise and calculate line-commutated power converters and their operating behaviour as well as their mains interaction,
- configure and calculate simple self-commutated power converters (DC choppers),
- explain three-phase inverters and calculate them for the respective application,
- configure simple systems consisting of several power converters.

Contents:

Power electronics (LE) for energy conversion with high efficiency, fields of application of LE, components of LE, line-commutated rectifiers, mains interaction, DC choppers, three-phase voltage source inverters, compound power converters and inverters.

Previous Knowledge:

Fundamentals of electrical engineering (required), fundamentals of semiconductor engineering (recommended).

Leistungselektronik II

(6. bzw. 8. Semester), V2, Ü1, L1

Vorlesung: Prof. Dr.-Ing. A. Mertens

Labore: Zweipunkt- und Schwingkreisumrichter

Lernziel:

Aufbauend auf den Grundlagen aus Leistungselektronik I werden in diesem Modul vertiefende und anwendungsorientierte Kenntnisse über leistungselektronische Schaltungen und Steuerverfahren vermittelt. Nach erfolgreichem Abschluss des Moduls können die Studierenden

- Raumzeiger-Modulationsverfahren für dreiphasige Pulswechselrichter darstellen und ihre Algorithmen an Beispielen durchführen,
- nichtideale Eigenschaften von dreiphasigen Pulswechselrichtern erläutern, die Auswirkungen charakterisieren und Gegenmaßnahmen benennen,
- leistungselektronische Schaltungen mit Schwingkreisen berechnen sowie die Konzepte des Soft Switching erläutern,
- einfache potentialtrennende Gleichspannungswandler sowie die darin verwendeten magnetischen Bauteile berechnen,
- Stromrichterkonzepte für hohe Spannungen und Leistungen wiedergeben.

Stoffplan:

Steuerverfahren für Pulswechselrichter, Nicht-ideale Eigenschaften von Pulswechselrichtern, Schwingkreis- und Resonanz-Stromrichter, Betrieb mit hoher Schaltfrequenz, Schaltnetzteile mit Potentialtrennung, selbstgeführte Umrichter hoher Leistung.

Vorkenntnisse:

Leistungselektronik I oder entsprechende Kenntnisse und Kompetenzen

Power Electronics II

(6th or 8th term), V2, U1, L1

Lecture: Prof. Dr.-Ing. A. Mertens

Laboratories: Two-level and parallel-tuned inverter

Learning Target:

Based on the fundamentals of Power Electronics I, the module provides detailed and application-oriented knowledge of power electronic circuits and control methods. After successful completion of the course, students will be able to

- present space vector modulation methods for three-phase voltage source inverters and perform their algorithms on examples,
- explain non-ideal properties of three-phase voltage source inverters, characterise the effects and name countermeasures,
- calculate power electronic circuits with oscillating circuits and explain the concepts of "soft switching",
- calculate simple isolating DC/DC converters and the magnetic components used in them,
- reflect power converter concepts for high voltages and powers.

Contents:

Control methods for voltage source inverters, non-ideal properties of voltage source inverters, oscillating circuit and resonance power converters, operation with high switching frequency, isolated DC/DC converters, self-commutated converters of high power.

Previous Knowledge:

Power Electronics I or equivalent knowledge and competences

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

Labor: Schaltversuch

Lernziel: Das Modul vermittelt vertiefendes und anwendungsorientiertes Wissen über die Funktionsweise von Leistungshalbleitern sowie über die Abhängigkeiten der Betriebseigenschaften vom inneren Aufbau sowie von der äußeren Beschaltung der Leistungshalbleiter. Nach erfolgreichem Abschluss können die Studierenden

- die Funktionsweise von p-n-Übergängen erläutern,
- die Durchbruchspannung von p-n-Übergängen aus wesentlichen Designparametern berechnen,
- den inneren Aufbau verschiedener Leistungshalbleiter erläutern,
- dynamische Vorgänge in Leistungshalbleitern darstellen,
- Zusammenhänge zwischen Beschaltungsdaten und dem Schaltverhalten von MOSFET und IGBT erläutern,
- Aufbau- und Verbindungstechnologien umreißen,
- aktuelle Entwicklungen bei Wide-Bandgap-Leistungshalbleitern wiedergeben.

Stoffplan:

- Unsymmetrischer p-n-Übergang
- p-s-n-Diode
- Raumladungszone und Sperrverhalten; Sperrschichtkapazität
- Durchlassverhalten und Trägerspeichereffekt
- Zusammenhänge zwischen Abmessungen und elektrischen Grenzdaten
- Thyristor, GTO und IGCT
- Feldeffekttransistor und IGBT
- Beschaltung, Ansteuerung und Schaltverhalten
- Aufbau und Eigenschaften von modernen MOSFETs und IGBTs
- Wide-Bandgap-Bauelemente

Vorkenntnisse: Notwendig: Leistungselektronik I, Halbleiter-Grundlagen z.B. aus Werkstoffkunde.

Power Semiconductors and Gate Drives

(5th or 7th term), V2, U1, L1

Lecture: Prof. Dr.-Ing. A. Mertens

Laboratory: Switching Experiment

Learning Target: The module provides in-depth and application-oriented knowledge about the functioning of power semiconductors as well as the dependencies of the operating characteristics on the internal structure and the external circuitry of power semiconductors. After successful completion, the students can

- explain the functioning of p-n junctions,
- calculate the breakdown voltage of p-n junctions from essential design parameters,
- explain the internal structure of different power semiconductors,
- illustrate dynamic processes in power semiconductors,
- explain the correlation between circuit data and the switching behaviour of MOSFETs and IGBTs,
- outline packaging and layout methods,
- reflect current developments in wide bandgap power semiconductors.

Contents:

- asymmetric p-n junction
- p-s-n diode
- space charge region and junction behaviour; junction capacitance
- Conduction behaviour and carrier memory effect
- Relationships between dimensions and electrical limit data
- Thyristor, GTO and IGCT
- Field effect transistor and IGBT
- Circuitry, control and switching behaviour
- Structure and properties of modern MOSFETs and IGBTs
- Wide bandgap devices

Previous Knowledge: Necessary: Power electronics I, semiconductor basics e.g. from materials science.

Regelung elektrischer Drehfeldmaschinen

(6. bzw. 8. Semester), V2, Ü1, L1

Vorlesung: Prof. Dr.-Ing. A. Mertens

Labor: Feldorientierte Regelung

Lernziel:

In diesem Modul werden anwendungsorientierte, vertiefende Kenntnisse zur Regelung von elektrischen Antrieben vermittelt. Nach erfolgreichem Abschluss des Moduls können die Studierenden

- die Drehmoment-, Drehzahl- und Lageregelung eines elektrischen Antriebs erläutern und parametrieren,
- das Konzept der Raumzeiger darstellen und interpretieren,
- stationäre und rotierende Koordinatensysteme ineinander umrechnen,
- ein Modell der Induktionsmaschine in rotorflussfesten Koordinaten wiedergeben und erläutern,
- die feldorientierte Regelung von Induktionsmaschinen darstellen sowie wichtige Einflussgrößen charakterisieren,
- verschiedene Verfahren zur gerberlosen feldorientierten Regelung wiedergeben,
- die feldorientierte Regelung der Permanentmagnet-Synchronmaschine erläutern.

Stoffplan:

Regelungstechnisches Modell, Drehmoment-, Drehzahl- und Lageregelung der Gleichstrommaschine, regelungstechnisches Modell der Drehfeldmaschinen, Prinzip der Feldorientierung, feldorientierte Regelung der Asynchronmaschine, Maschinenmodelle und Betriebsverhalten, Regelung der Synchronmaschine.

Vorkenntnisse:

Notwendig: Grundlagen der elektromagnetischen Energiewandlung (Elektrotechniker) oder Elektrische Antriebe (Mechatroniker). Empfohlen: Leistungselektronik I

Control of Electrical Three-phase Machines

(6th or 8th term), V2, U1, L1

Lecture: Prof. Dr.-Ing. A. Mertens

Laboratory: Field-oriented control

Learning Target:

In this module, application-oriented, in-depth knowledge of the control of electric drives is taught. After successful completion of the module, the students can

- explain and parameterise the torque, speed and position control of an electric drive,
- represent and interpret the concept of space phasors,
- convert stationary and rotating coordinate systems into each other,
- reproduce and explain a model of the induction machine in coordinates fixed to the rotor flux,
- describe the field-oriented control of induction machines and characterise important influencing variables,
- describe different methods for sensorless field-oriented control,
- explain the field-oriented control of the permanent magnet synchronous machine.

Contents:

Dynamic model, torque, speed and position control of DC machine, dynamic model of three-phase machines, principle of field orientation, field-oriented control of the asynchronous machine, machine models and operating behaviour, control of the synchronous machine.

Previous Knowledge:

Required: Fundamentals of Electromagnetical Power Conversion (Electrical Engineering) or Electrical Drives (Mechatronics). Recommended: Power Electronics I

Elektrische Bahnen und Fahrzeugantriebe

(6. bzw. 8. Semester), V2, S2
Vorlesung: Dr.-Ing. G. Möller

Antriebstechnik für elektrische Bahnen und Straßenfahrzeuge ist ein Beispiel für eine komplexe technische Aufgabenstellung, bei der die Auslegung vom Zusammenspiel zwischen den elektrischen, elektromechanischen und mechanischen Komponenten abhängt.

Lernziel:

- den Aufbau und die Hauptbestandteile eines elektrischen Traktionssystems kennen
- den Einfluss technologischer Neuerungen auf die Auswahl der optimalen Systemlösung erkennen
- die in den Grundlagenvorlesungen erworbenen Kenntnisse auf die Traktionssysteme anwenden
- eine grundlegende fahrdynamische Auslegung für Traktionsantriebe entwerfen können

Inhalt:

In der Vorlesung werden die Grundlagen der elektrischen Antriebstechnik für Traktionsanwendungen behandelt. Das Gebiet umfasst dabei Fahrzeuge von der Straßenbahn bis zum Hochgeschwindigkeitszug und elektrisch angetriebene Straßenfahrzeuge. Es wird eine Übersicht der technologischen Entwicklung und des aktuellen Stands der Technik gegeben. Die Grundzüge der Auslegung von Fahrzeugantrieben von den Anforderungen bis zur Dimensionierung werden erläutert.

1. Entwicklung der elektrischen Traktion
2. Aspekte der Energieversorgung elektrischer Bahnen
3. Fahrdynamik und Fahrwerk
4. Antriebstechnik mit Kommutatormotoren
5. Antriebstechnik mit Drehstrommotoren
6. Konventionelle Bahnen
7. Unkonventionelle Bahnen
8. Straßenfahrzeuge mit elektrischem Antrieb

Optional kann dieses Modul durch die Teilnahme an einem englischsprachigen *Journal Club* ergänzt werden, in dem sich Studierende die Inhalte wissenschaftlicher Veröffentlichungen unter Anleitung eines Doktoranden/einer Doktorandin erarbeiten, präsentieren und diskutieren.

Electrical Traction and Vehicle Drives

(6th or 8th term), V2, S2
Lecture: Dr.-Ing. G. Möller

Drive technology for electric railways and road vehicles is an example of a complex technical task, where the design depends on the interaction between the electrical, electromechanical and mechanical components.

Learning Target:

- know the structure and main components of an electric traction system
- recognize the impact of technological innovation on the design of the optimal system solution
- apply the knowledge acquired in the basic lectures to the traction systems
- be able to design a basic dynamic driving design for traction drives

Content:

The lecture covers the basics of electric drive technology for traction applications. This includes vehicles from trams to high-speed trains and electrically driven road vehicles. An overview of the technological development and the current state of the art is given. The main features of the design of vehicle drives from requirements to dimensioning are explained.

1. Development of electric traction technology
2. Aspects of the energy supply of electric railways
3. Vehicle dynamics and transmission
4. Drive technology with commutator motors
5. Drive technology with three-phase motors
6. Conventional railways
7. Unconventional railways
8. Road vehicles with electric drives

Optionally, this module can be extended by participation in an English-language *Journal Club*, in which students develop, present and discuss the contents of scientific publications under the mentoring of a PhD student.

Passive Komponenten der Leistungselektronik

(1./3. Semester im Master) 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.

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.

Previous Knowledge: Power Electronics I

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

Leistungselektronik *

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

Lernziel:

Die Vorlesung gibt eine Einführung in die allgemeinen Themen der modernen Leistungselektronik mit starkem Fokus auf die Funktionsweise von leistungselektronischen Schaltungen und deren Komponenten. Nach der Teilnahme sind die Studierenden in der Lage, die grundlegenden Eigenschaften von Leistungshalbleitern zu erklären, passive Bauelemente für typische Anwendungen auszulegen und Umrichterstufen zu berechnen und zu simulieren. Sie werden auch in der Lage sein, die Wechselwirkung zwischen einem oder mehreren Umrichtern mit dem Netz zu verstehen und zu charakterisieren.

Stoffplan:

Leistungselektronik für hocheffiziente Energieumwandlung, Anwendungen, Komponenten, selbstgeführte Umrichter, dc/dc-Wandler, dc/ac-Wandler

Vorkenntnisse:

Zwei Semester des internationalen Masterstudiengangs Energy Technology or International Mechatronics

Hinweis: Studierende, die ihr Bachelor-Studium an der LUH abgeschlossen haben, sollen alternativ an der Lehrveranstaltung *Leistungshalbleiter und Ansteuerungen* teilnehmen.

* wird auf Englisch abgehalten

Power Electronics *

(3rd term in master course, V2, U1, L1
Lecture: Jun.-Prof. Dr.-Ing. J. Friebe

Learning Target:

The lecture gives an introduction into the general topics of modern power electronics with a strong focus on the operation principle of power electronic circuits and their components. After participation, the students will be able to explain the basic characteristics of power semiconductors, design passive components for typical applications and calculate and simulate converter stages. They will also be able to understand and characterize the interaction between one or multiple converters and the grid.

Contents:

Power Electronics for highly efficient energy conversion, applications, components, line-commutated converter, dc/dc-converter, dc/ac-converter

Previous Knowledge:

Two terms of the international master program Energy Technology or International Mechatronics

Note: Students, who finished their Bachelor Degree at LUH shall alternatively take part in the course *Leistungshalbleiter und Ansteuerungen*.

* held in English language

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, Zeigerdiagramm, 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.

Elektrische Maschinen und Antriebe

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

Inhalt:

Grundlagen des Elektromagnetismus, Maxwellsche Gleichungen, Biot-Savart-Gesetz, Lorentzkraft, Maxwellscher Spannungstensor, Grundlage der elektromagnetischen Energiewandlung.

Berechnung magnetischer Kreise mithilfe magnetischer Ersatzschaltbilder, Durchflutungsgesetz, Induktionsgesetz, permanentmagnetische Werkstoffe, ferromagnetische Werkstoffe, nichtlineare BH-Kennlinien, Hysterese und Wirbelstromverluste. Permanentmagneterregte Gleichstrommaschine, Reihenschlussmaschine, fremderregte Gleichstrommaschine, Universalmotoren, Ersatzschaltbilder, Arbeitspunktberechnung, Schleifen- und Wellenwicklungen, Ankerrückwirkung, Regelung einer Gleichstrommaschine.

Drehfeldtheorie, Herleitung der Wicklungsfaktoren (Gruppenfaktor, Spulenfaktor, Nutfaktor), Wechselfelder, Oberwellen, Drehmomentbildung, Pendeldrehmomente, Wicklungstopologie (Zahnspulenwicklung, Ganzlochwicklung, Bruchlochwicklung), dq-Koordinaten, Parktransformation, Zeigerdiagramme, Schenkelpolmaschine, Vollpolmaschine, permanentmagneterregte Synchronmaschine (Oberflächen- und vergrabene Magnete).

Feldorientierte Regelung einer PMSM, Leistungselektronikhalbleiter, PWM, dreiphasiger Umrichter, Drehgeber (inkrementell und absolut), bürstenlose Gleichstrommaschine, digitale Hallsensoren, Blockkommutierung, Regelung einer BLDC-Maschine. Auslegung eines mechatronischen Systems, bio-mechanische Lastberechnung, elektromechanische Antriebsauslegung.

Electrical Machines and Drives

(3th term in master course), V2, Ü1, L1
Lecture: Jun.-Prof. Dr.-Ing. A. Ebrahimi

Contents:

Fundamentals of electromagnetism, Maxwell's equations, Biot-Savart law, Lorentz force, Maxwell's force tensor, basics of electromagnetic power conversion.

Calculation of magnetic circuits using magnetic equivalent circuit diagrams, Ampère's law, Faraday's law, permanent magnet materials, ferromagnetic materials, non-linear BH characteristics, hysteresis and eddy current losses. Permanent magnet dc machine, series-wound machine, externally excited dc machine, universal motors, equivalent circuit diagrams, working point calculation, lap and wave windings, armature reaction, control of a dc machine.

Rotary field theory, derivation of winding factors (group factor, coil factor, slot factor), alternating fields, harmonics, torque formation, pulsation torques, winding topology (tooth coil winding, integer-slot winding, fractional-slot winding), dq-coordinates, park transformation, phasor diagrams, salient-pole machine, cylindrical rotor machine, permanent magnet synchronous machine (surface and buried magnets).

Field-oriented control of a PMSM, power electronics semiconductors, PWM, three-phase inverter, encoder (incremental and absolute), brushless DC machine, digital Hall sensors, block commutation, control of a BLDC machine. Design of a mechatronic system, bio-mechanical load calculation, electromechanical drive design.

Studentische Arbeiten 2019/20 | Students' Theses 2019/20

Studienarbeiten 2019 | Short Theses 2019

Gu, Pengcheng:

Aufbau eines Tools für die Grobdimensionierung von Induktionsmaschinen
Development of a Tool for the Design of Induction Motors

Kechida, Oussama:

Vergleich von numerischen 2D- und 3D-Modalanalysen zur Ermittlung des Schwingungsverhaltens einer Hochdrehzahlmaschine
Study of the Vibration Characteristic of a High Speed Electric Machine Using a 2D and 3D Modal Analysis

Pei, Jianhe:

Analytische Vorausberechnung radialer Dämpfungskräfte
Analytical Calculation of Radial Damping Forces

Weinmeister, Lukas:

Methoden zur Bestimmung des Stirnraumanteils der Wicklung-Rotor-Kapazität von elektrischen Maschinen
Methods for Determining the Contribution of the End-Windings to Rotor Capacitance of Electrical Machines

Zhu, Xi:

Untersuchung von Synchronmaschinen mit nicht-äquidistanter Verteilung der Ständernuten
Examination of Synchronous Machines with non-equidistant Distribution of Stator Slots

Studienarbeiten 2020 | Short Theses 2020

Bziwech, Radhouen:

Dimensionierung und Vergleich von synchronen Reluktanzmaschinen mit etablierten Maschinenkonzepten
Design and Comparison of Synchronous Reluctance Machines with Established Machine Concepts

Chen, Jielin:

Untersuchung der Auswirkungen von unterschiedlichen Polformen und Ungleichförmigkeiten im Luftspalt auf das Betriebsverhalten von Schenkelpolsynchronmaschinen mittels magnetischer Ersatznetzwerke
Examining the Impact of Different Pole Shapes and Irregularities in the Air Gap on the Performance of Salient-Pole Synchronous Machines using Magnetic Circuits

Ghorbali, Wahib:

Validierung einer Methode zur Bestimmung der optimalen Zahnkopfstruktur mit FEM-Simulationen
Validation of a Method for the Determination of the Optimal Shape of Tooth Tips with FEM Simulations

Gu, Yufeng:

Entwicklung einer Vorrichtung zur Impedanzmessung unter Vorspannung
Development of a Device for Impedance Measurement under DC-Bias Preload

He, Ziheng:

Einfluss tangentialer Aussparungen auf die Streuinduktivität von Transformator-kernen für die berührungslose Energieübertragung
Impact of Tangential Gaps on the Stray Inductance of a Rotating Transformer

Holtkamp, Lukas:

Numerische Kapazitätsberechnung im Wicklungskopf von elektrischen Maschinen
Numerical Capacity Calculation in the End Windings of Electrical Machines

Jia, Shuqiao:

Berechnung einer permanentmagneterregten Gleichstrommaschine mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode
Calculation of a Permanentmagnet Excited DC-Motor Using Finite Element Method

Shiyang, Jia:

Kleinsignalmodellierung eines galvanisch trennenden DC/DC-Wandlers
Small-Signal Modelling of a Galvanically Isolated DC-DC Converter

Zhang, Yimin:

Bestimmung von magnetischen Widerständen anhand vereinfachter Maschinenmodelle
Determination of Magnetic Resistances on the Basis of Simplified Models of Electric Machines

Bachelorarbeiten 2019 | Bachelor Theses 2019

Al Jaber, Malek:

Entwicklung einer Hardware-in-the-Loop Testumgebung zur Verifizierung der Antriebsregelung von Elektrofahrzeugen
Development of a Hardware-in-the-Loop Test Environment for Verifying the Drive Control of Electric Vehicles

Araoud, Souheil:

Messfehlerbetrachtung bei Wechselrichterspeisung
Analysis of Measurement Uncertainties for Power Electronic Converters

Bender, Tim Niklas:

Dimensionierung einer Hochdrehzahl-PMSM mit vergrabenen Magneten unter Verwendung hochfester Karosseriebleche
Design of a High Speed PMSM with Buried Magnets by Using High Strength Steel

Borchers, Rene:

Auslegung und Realisierung eines Gatetreibers und Zwischenkreises für Si-IGBTs zum Vermessen von Leistungshalbleitern eines Serienelektrofahrzeuges
Design and Implementation of a Gate Driver and DC Link for Measurements of a Si-IGBT Power Module used in Electric Vehicles

Bouzouita, Ali:

Untersuchung des Synchronismus mehrerer Windenergieanlagen durch Grenzsprungvorgänge
Examination of the Synchronism of Several Wind Turbines triggered by Border Oscillation Processes

Brune, Ole:

Aufbau einer Toolkette zur FEM-Simulation von synchronen Reluktanzmaschinen mit Außenrotor in ANSYS Maxwell
Development of a Tool Chain for the FEM Simulation of Synchronous Reluctance Machines with exterior Rotor in ANSYS Maxwell

Esser, Maximilian:

Galliumnitrid-Wechselrichter zur Ansteuerung von Ultraschallwandlern
Gallium Nitride Inverter to Drive Ultrasonic Transducers

Gueriani, Achraf:

Aufbau und Inbetriebnahme eines Prüfstands zur Messung der Potenzialverteilung in Drehstromwicklungen
Construction and Implementation of a Test Bench for Measuring the Potential Distribution in Three-Phase Windings

Hammadi, Alaaeddine:

Bestimmung geeigneter magnetischer Ersatznetzwerke für elektrische Maschinen mit vergrabenen Magneten
Determination of Suitable Magnetic Equivalent Circuits for Electric Machines with Inner Magnets

Heeren, Hauke:

Implementierung eines Mikrocontroller-Steuerungssystems für einen Kleinspannungstraktionsumrichter
Implementation of a Microcontroller-Based Control System for a Low-Voltage Traction Inverter

Hoffmann, Long:

Berechnung von Ausgleichsströmen in parallelen Zweigen von Schenkelpolsynchronmaschinen aufgrund geometrischer Asymmetrien im Ständer und Rotor

Calculation of Equalizing Currents in Parallel Branches of Salient Pole Synchronous Machines due to Geometric Asymmetry of Stator and Rotor

Holtkamp, Lukas:

Entwicklung und Parametrisierung eines Motormodells zur Integration in einer Rundenzeitsimulation

Development and Parameter Identification of an Electric Motor Model for Integration in Lap Time Simulation

Kamdem Ngatchessi, Fabrice Lionel:

Erstellung eines magnetischen Netzwerks für aktiv gedämpfte Frässpindeln

Development of an Equivalent Magnetic Circuit Network for Actively Damped Motor Spindles

Kim, Denis:

Berechnung und Validierung des transienten und stationären Maschinenverhaltens einer Schenkelpolsynchronmaschine an einem Laboraufbau

Calculating and Validating the Transient and Steady-State Machine Performance of a Salient-Pole Synchronous Machine on a Laboratory Test Setup

Li, Xiaona:

Modellierung von Leistungsmodulen und Untersuchung der Erfassbarkeit üblicher Ausfallmechanismen

Modeling of Power Modules and Investigation of the Observability of Common Failure Mechanism

Manthey, Tobias:

Inbetriebnahme eines SiC-Wechselrichters und Vermessung der Wirkung und Effizienz von Ausgangsfiltern für Traktionsantriebe

SiC-Inverter Commissioning and Output Filter Efficiency Measurement and Characterization in Traction Drive Applications

Meiswinkel, Marius:

Untersuchung von elektromagnetischen Kräften auf die Leiterstäbe in einem Hydrogenerator

Investigation on Electromagnetic Forces on the Stator Bars of a Hydro Generator

Neschitsch, Tim:

Implementierung einer Simulationssoftware zur analytischen Berechnung von Kurzschlussströmen in fremderregten Schenkelpolmaschinen

Developing a Simulation Software for Analytic Calculation of Short Circuit Currents in Salient Pole Synchronous Machines

Nguyen, Thi Thuy An:

Numerische Berechnung der Grenzkennlinie hoch ausgenutzter Induktionsmaschinen

Numerical Calculation of Maximum Torque Characteristics for Highly Utilized Induction Motors

Peter, Emma:

Untersuchung von Streustegen additiv gefertigter Rotoren permanentmagneterregter Synchronmaschinen

Investigation of Stray Paths in Additively Manufactured Rotors of Permanent Magnet Synchronous Machines

Pickert, Phil:

Untersuchung von Stanzkanteneffekten im Ständer von elektrischen Maschinen

Analysis of Punching Effects in the Stator of Electrical Machines

Sassi, Mohamed Amine:

Analyse von zusätzlichen Verlusten im Rotor einer permanentmagneterregten Synchronmaschine

Analysis of Additional Losses in the Rotor of a Permanent Magnet Synchronous Machine

Schenke, Finn:

Leichtbaukonzepte für additiv gefertigte Rotoren permanentmagneterregter Synchronmaschinen
Lightweight Design of Additively Manufactured Permanent Magnet Synchronous Rotors

Schiefer, Philipp:

Entwicklung eines SiC-Frequenzumrichters für einen Hochdrehzahltraktionsantrieb zum Einsatz in Motorsportanwendungen
Development of a SiC Inverter for a High-Speed Traction Drive for Use in Motor Sports Applications

Seehausen, Malte:

Messtechnische Untersuchung von Wirbelstromeffekten auf der Oberfläche von additiv gefertigten Rotor-Ersatzprüfkörpern
Experimental Investigation of Eddy Current Effects on the Surface of Additively Manufactured Rotor Alternative Test Pieces

Sellami, Assil:

Einfluss des Betriebspunktes und der Wicklungskopfgeometrie auf Verluste und Feldverhältnisse im Stirnraum von Hydrogeneratoren
Impact of the Operating Point and Stator End Winding Geometry on the End Region Field and Clamping Plate Losses in Hydro Generators

Sellami, Youssef:

Berechnung der Zusatzverluste bei Stromverdrängung in elektrischen Maschinen unter Berücksichtigung des Nutquerfelds bei SiC-Umrichterspeisung
Calculation of the Additional Losses due to Current Displacement in Electrical Machines, Taking into Account the Slot Cross-Field in the Case of SiC Inverter Supply

Soula, Oussama:

Untersuchung und Implementierung einer FPGA-basierten feldorientierten Regelung mit Überabtastung der Ströme
Investigation and Implementation of an FPGA-Based Field-Oriented Control with Oversampling of the Currents

Strecker, Samuel:

Untersuchung von Polzahlkombinationen in aktiv gedämpften Frässpindelantrieben
Analysis of Pole Pair Combinations for Actively Damped Motor Spindles

Sun, Yang:

Untersuchung von Modellierungsansätzen des Polschuhs für ein magnetisches Ersatznetzwerk von Schenkelpol-synchronmaschinen
Investigation of Pole Shoe Modelling Approaches for a Magnetic Equivalent Circuit of Salient-Pole Synchronous Machines

Tangerding, Felix:

Dimensionierung eines elektrischen Hochdrehzahltraktionsantriebs für eine Motorsportanwendung
Design of a High Speed Electric Drive for a Motorsport Application

Topcu, Samet:

Untersuchung des akustischen Verhaltens einer Hochdrehzahl-PMSM
Study on the Acoustic Behaviour of a High-speed PMSM

Tounsi, Leila:

Untersuchung und Vergleich von Methoden zur Berechnung der Potentialverteilung in Wicklungen bei Beanspruchung mit Spannungsimpulsen
Study and Comparison of Methods for Calculating the Potential Distribution in Windings under Stress with Voltage Pulses

Trad, Ahmed Anis:

Auslegung und Aufbau eines zweistufigen Leistungsumrichters basierend auf einer spannungsverdoppelnden Kondensatorschaltung für einen E-Bike-Antrieb

Design and Assembly of a Dual Stage Power Converter based of a Voltage Doubling Capacitor Circuit for an Electric Bike Drive

Willer, Felix Oliver:

Auslegung und Aufbau eines zweistufigen Leistungsumrichters für einen E-Bike-Antrieb

Design and Assembly of a Dual Stage Power Converter for an Electric Bike Drive

Yi, Xuanyu:

Design und Optimierung passiver Komponenten für Elektrofahrradantriebe

Design and Optimization of Passive Components for Electric Bicycle Drives

von Oesen, Mats:

Mechanische Untersuchung des Endbereichs eines Hydrogenerators im Hinblick auf das Druckplattenmaterial

Mechanical Investigation of the Stator End Region of a Hydro Generator with Regard to the Clamping Plate Material

Bachelorarbeiten 2020 | Bachelor Theses 2020

Alhaj Khouder, Walid:

Implementierung einer FPGA-basierten Antriebsregelung mit Kompensation der nichtlinearen Übertragungseigenschaften eines Wechselrichters

Implementation of an FPGA-Based Drive Control with Compensation of the Nonlinear Characteristics of an Inverter

Ataya, Mahmoud:

Untersuchung eines neuartigen Konzepts für Sanftanlasser

Analysis of a Novel Concept for Motor Soft Starters

Bailey, David:

Labormaßstäbliche Emulation von Speichersystemen mittels Pulswechselrichter

Emulation of a Battery Energy Storage System (BESS) Utilizing a Two-Level Converter

Dubin, Artjom:

Entwurf und Implementierung einer Regelung für einen hybriden Active-Neutral-Point-Clamped-Umrichter

Development and Implementation of a Control System for a Hybrid Active-Neutral-Point-Clamped Inverter

Eck, Darius:

Analytische Bestimmung des Luftspaltfelds von permanentmagneterregten Synchronmaschinen für verschiedene Rotorgeometrien

Analytical Determination of the Air Gap Field of Permanent Magnet Excited Synchronous Machines for Different Rotor Geometries

Eidenschink, Jan Marc:

Überwachung der Netzimpedanz durch Leistungsvariationen von Umrichtern in veränderlichen Netzen

Monitoring of the Grid Impedance Using Power Variations of Converters in Fluctuating Grids

Endrullat, Paul:

Aufbau eines Verfahrens zur Berechnung und Erstellung normkonformer Maschinendatenblätter für permanentmagneterregte Synchronmaschinen

Development of a Method for the Calculation and Generation of Standard-Compliant Machine Data Sheets for Permanent Magnet Synchronous Machines

Eyyuboglu, Emil Ozan:

Aufbau eines Tools für die Grobdimensionierung von permanentmagneterregten Synchronmaschinen als Traktionsantrieb

Development of a Tool for the Rough Design of Permanent Magnet Excited Synchronous Machines as Traction Drives

Graue, Janosch:

Aufbau und Inbetriebnahme einer leistungselektronischen Schaltung zur photovoltaischen Energieversorgung von Nanosatelliten

Design and Set-Up of a Power-Electronic Circuit for Photovoltaic Power Supply of Nanosatellites

Has, Razvan-Christian:

Entwurf einer Steuerung und Regelung des Allradantriebs eines PHEV mit elektrischer Hinterachse

Design of an All-Wheel Drive Control of a PHEV with Electric Rear Axle

Hecht, Simon:

Entwicklung eines analytischen Modells für ein elektrifiziertes Mantelstrom- und Propellertriebwerk

Development on an Analytical Model of an Electrified Turbofan Engine and Propeller Engine

Herrmann, Tobias:

Erweiterung eines magnetischen Ersatznetzwerks für aktiv gedämpfte Frässpindeln

Extension of a Magnetic Equivalent Circuit for Actively Damped Milling Spindles

Hoffmann, Lennart:

Aufbau und Inbetriebnahme eines DC/AC-Wandlers zum Einsatz in einem einphasigen PV-Modulwechselrichter

Design and Set-Up of a DC/AC Converter for a Single-Phase PV Module Inverter

Jünemann, Philipp:

Bestimmung des Systemverhaltens von geregelten elektrischen Antriebssystemen für die Auswahl und Parametrisierung des numerischen Solvers für Zeitbereichssimulationen

Determination of the System Behaviour of Controlled Electrical Drive Systems for the Selection and Parameterisation of the Numerical Solver for Time Domain Simulations

Karouia, Ghassen:

Erarbeitung eines parametrischen thermischen Modells für den rotierenden Teil eines berührungslosen Übertragers

Development of a Parametric Thermal Model for the Rotating Part of a Wireless Energy Supply for Synchronous Machines

Kolmsee, Christian:

Bewertung der Nachhaltigkeit von besonders hoch ausgenutzten Antrieben für Flugzeuge hinsichtlich des Einsatzes von Seltenen-Erden-Materialien

Evaluation of the Sustainability of High Power Density Motors for Electric Aircrafts regarding the Use of Rare Earth Materials

Ksouri, Malek:

Berechnung der Feldverteilung und der Ummagnetisierungsverluste im Kurzschluss von Schenkelpolsynchronmaschinen

Calculation of the Field Distribution and of the Iron Losses During Short Circuit Operation of Salient Pole Synchronous Machines

Kusuma, Gary:

Entwurf einer Apparatur zur Messung dielektrischer Eigenschaften

Design of an Apparatus for Measuring Dielectric Properties

Mand, Philipp:

Planung einer Versuchsanordnung für Langzeitmessungen zur Untersuchung der Auswirkungen von kosmischer Höhenstrahlung auf Gallium-Nitrid Leistungshalbleiter

Design of an Experimental Setup for Long-Term Measurements to Study the Effects of Cosmic Radiation on Gallium-Nitride Power Semiconductors

Maxhelaku, Ray:

3D-Flussführung im axialen Endbereich permanentmagneterregter Synchronmaschinen mithilfe additiver Fertigung

3D Magnetic Flux Guidance in Axial End Regions of Permanent Magnet Synchronous Machines using Additive Manufacturing

Minnermann, Jonas:

Messtechnische Ermittlung der Ersatzschaltbildelemente von PMSM

Metrological Determination of the Equivalent Circuit Elements of PMSM

Mohamed, Malek:

Berechnung der Potentialverteilung im Wicklungskopf von elektrischen Maschinen

Calculation of the Potential Distribution in the Winding Overhang of Electrical Machines

Müller, Patrick Noah:

Modulation der Streuschlitzposition von permanentmagneterregten Synchronmaschinen zur Reduktion der Drehmomentwelligkeit

Modulation of Slot-Opening Position of Permanent Magnet Synchronous Machines to Reduce Torque Ripple

Nguyen, Ngoc Mai:

Implementierung einer seriellen Kommunikationsschnittstelle zwischen einer Steuerungsplattform und einem Leistungsmessgerät zur automatisierten Messwerterfassung

Implementing of a Serial Communication Interface between a Prototyping Unit and a Power Meter for an Automated Acquisition

Schröder, Waldemar:

Umsetzung von Berechnungsfunktionen für elektrische Antriebssysteme

Implementation of Calculation Methods for Electrical Drive Systems

Zyka, Keidi:

Dimensionierung eines Servolenksystems für autonom fahrende Rennfahrzeuge

Design of a Power Steering System for Autonomous Racing Vehicles

Masterarbeiten 2019 | Master Theses 2019**Barlage, Lukas:**

Optimierung der thermischen Ausnutzung von elektrisch erregten Synchronmaschinen

Improving the Thermals Utilisation of Electrically Excited Synchronous Machines

Bieber, Maximilian:

Homogenisierungsmethoden zur Bestimmung plausibler Materialparameter für die akustische Simulation elektrischer Maschinen

Homogenization Techniques to Estimate Reliable Material Properties for the Acoustic Simulation of Electrical Machines

Brockhage, Torben:

Untersuchung und Realisierung einer Messschaltung zur kombinierten Erfassung und Auswertung mehrerer thermosensitiver Parameter an einer IGBT-Halbbrücke

Investigation and Implementation of a Circuit to Measure and Analyse Thermo-Sensitive Electrical Parameters of an IGBT-Module

Cheng, Hui:

Simulation and Modeling of 3D EMI Filter for EMI Prediction with ANSYS Q3D

Cholewa, Sven:

Modellerstellung eines doppelseitig gekühlten SiC-Moduls zur Nachbildung der parasitären Induktivitäten und Kapazitäten

Modeling of a Double Sided Cooling SiC Power Module to Extract the Parasitic Inductances and Capacitances

Xu, Deyong:

Optimierung von Maschinenmodellen auf höchste Drehmomentdichten

Optimization of Machine Models for Highest Torque Density

Ding, Junyu:

Berechnung von Luftspaltleitwerten für ein magnetisches Ersatznetzwerk von Schenkelpolsynchronmaschinen

Calculation of the Magnetic Permeance in the Air Gap for a Magnetic Equivalent Circuit of Salient Pole Synchronous Machines

Dittmann, Jochen:

Entwurf und Untersuchung von elektrisch erregten Synchronmaschinen in Dreieckschaltung für den Einsatz in Elektrofahrzeugen

Design and Analysis of Electrically Excited Synchronous Machines in Delta Connection for Use in Electric Vehicles

Ebersberger, Janine:

Charakterisierung einer SiC-Halbbrücke zur chipflächenskalierten Dimensionierung eines Wechselrichters

Characterization of a SiC Halfbridge for Inverter Design with Scaled Chip Areas

Esfahanian, Farzaneh:

Parametrische Modellierung und Dimensionierung von Ausgangsfiltern im Traktionsantrieb mit SiC-Wechselrichter

Parametric Modeling and Dimensioning of Output Filters in Traction Drive with SiC Inverter

Feng, Aige:

Entwicklung einer Simulationsplattform für die elektromagnetische Simulation eines Hydrogenerators

Developing a Simulation Platform for the Electromagnetic Simulation of a Hydrogenerator

Hölscher, Leon:

Entwicklung einer Regelung zur Winkelsynchronisation von Klauenkupplungen für einen elektrifizierten Fahrzeugantriebsstrang

Development of a Control System for the Angular Synchronization of Claw Couplings for an Electric Vehicle Drive Train

Joulian, Marc Alban:

Aufbauen einer Prozesskette zur Untersuchung der Strömung im Luftspalt elektrisch erregter Synchronmaschinen

Development of a Process Chain to Investigate Fluid Dynamics in the Air Gap of Electrically Excited Synchronous Machines

Jusko, Steffen:

Design, Aufbau und Inbetriebnahme eines Galliumnitrid-Wechselrichters zur Ansteuerung von Ultraschallwandlern

Design and Test of a Gallium Nitride Inverter to Drive Ultrasonic Transducers

Klatt, Jean-Pierre:

Kompakte Zwischenkreise für SiC-Antriebsumrichter zukünftiger Elektrofahrzeuge

Compact DC-Links for SiC Automotive Inverters for Future Electric Vehicles

Kostka, Benedikt:

Auslegung und Validierung eines aktiven Filters für den Einsatz in einem SiC-Antriebsumrichter für Elektrofahrzeuge

Design and Validation of an Active Filter for Use in a SiC Drive Inverter for Electric Vehicles

Krzikalla, Stefan:

Entwicklung und Erprobung eines Verfahrens zur Bestimmung der Rotortemperatur von elektrisch erregten Synchronmaschinen

Development and Testing of a Method for Determining the Temperature of Field Winding for Electrically Excited Synchronous Machines

Kyryliuk, Volodymyr:

Untersuchung von Zahnspulenwicklungen für Induktionsmaschinen kleiner Leistung

Study on Fractional-Slot Concentrated-Windings for Small Power Induction Machines

Li, Bai:

Investigation of Different Distribution Functions for Preisach Hysteresis Modeling

Lorenz, Malte:

Erweiterung des "Quasi-Two-Level PWM Operation" Modes für weitere modulare Multilevel-Umrichter Topologien

Extension of "Quasi-Two-Level PWM Operation" to Other Modular Multilevel Converter Topologies

Melloh, Tobias:

Control and Dynamic Analysis of Marine Hybrid Electrical Power Systems

Mujanovic, Anel:

Entwicklung einer feldorientierten Regelung für den Feldschwächbereich und Inbetriebnahme eines Prüfstands für ein mehrphasiges Antriebssystem mit PMSM

Development of a Field-Oriented Control for the Field Weakening Area and Start Up of a Test Bench

Nörenberg, Christian:

Zusätzliche Verluste und parasitäre Effekte in permanentmagneterregten Synchronmaschinen in Dreieckschaltung für den Einsatz in Elektrofahrzeugen

Additional Losses and Parasitic Effects in Permanent Magnet Synchronous Machines with Delta-Connected Windings for Use in Electric Vehicles

Pang, Ze:

Analytische Berechnung der Wicklung-Stator- und Wicklung-Rotor-Kapazität von elektrischen Maschinen mittels Spiegelungsmethode

Analytical Calculation of the Winding-Stator and Winding-Rotor-Capacity of Electrical Machines using the Method of Image Charges

Riesner, Jan:

Kopplung von numerischen und analytischen Berechnungsverfahren zur Charakterisierung von permanenterregten Synchronmaschinen

Coupling of Numeric and Analytical Calculation Methods for a Characterisation of Permanent Magnet Synchronous Machines

Schepe, Constantin:

Untersuchung des Einflusses von Ungleichförmigkeiten im Luftspalt auf das Betriebsverhalten von Schenkelpol-synchronmaschinen

Investigation of the Impact of Irregularities in the Air Gap on the Motor Performance of Salient-Pole Synchronous Machines

Suchan, Anton:

Synchronmaschinen in Dreieckschaltung als Traktionsantriebe in Elektrofahrzeugen

Synchronous Machines in Delta Connection as Traction Drives in Electric Vehicles

Ullrich, Thomas:

Finite Elemente Untersuchung des Einflusses von Sättigung des Stator- und Rotorblechpakets auf das ausquellende Luftspaltfeld in Hydrogeneratoren

Finite Element Investigation of Stator and Rotor Core Saturation on the Fringing Air-Gap Flux Density in Hydro Generators

Wenzel, Johannes:

Feuchtigkeit als Ausfallursache von Leistungsmodulen in Umrichtern

Humidity as Failure Mechanism of Power Modules in Inverters

Xu, Linqiang:

Auslegung der Spannungsversorgung für den Antrieb eines Elektrofahrrads

Design of the Power Supply for a Drive System of an Electric Bicycle

Yang, Xinhui:

Untersuchung eines geberlosen Verfahrens zur Drehzahl-schätzung für Induktionsmaschinen

Analysis of a Transducerless Method for Speed Estimation of Induction Machines

Zhai, Tingxuan:

Modeling and Simulation of Power Cables for Electric Motor Drive Systems

Zhang, Dapu:

Entwicklung eines Verfahrens zur Bestimmung der Wirbelstromverluste in Permanentmagneten durch Oberfelder

Development of a Method for Calculation of Eddy Currents in Permanent Magnets through Harmonic Field Components

Masterarbeiten 2020 | Master Theses 2020

Blanken, Norman:

Machbarkeitsstudie: 3D-Druck von Rotoren großer Synchronmaschinen

Feasibility Study: 3D Printing of Large Synchronous Machine Rotors

Bouzouita, Mohamed:

Schaltbare Kupplung zwischen Generator und Turbine für die Bereitstellung von Systemdienstleistungen

Switchable Coupling between Generator and Turbine for Ancillary Services Supply

Chaara, Chaker:

Entwicklung und Aufbau von modular verschaltbaren Vollbrücken auf Basis von Wide-Bandgap-Leistungshalbleitern

Development and Construction of Modular Interconnectable Full-Bridges Based on Wide-Gap Semiconductors

Chen, Mingqi:

Berechnung der elektrischen Potentialverteilung in elektrischen Maschinen

Calculation of the Electrical Potential Distribution in Electrical Machines

Cheng, Jingwei:

Integration eines aktiven du/dt-Filters in eine taktende leistungselektronische Schaltung zur Charakterisierung der Filterwirkung und Effizienz

Integration of an Active du/dt Filter in a Switching Power Electronic Circuit to Characterize the Filter Efficiency and Performance

Dürr, Patrick:

Untersuchung des Generator-Umrichter-Systems einer Multi-MW Windenergieanlage mit DC-Kaskade zur Erhöhung der Zwischenkreisspannung

Investigation of a Generator-Converter-System of a Multi-MW Wind Turbine with DC Cascade for Increasing the DC Link Voltage

Eisold, Mirko:

Kopplung von numerischen und analytischen Verfahren zur Berechnung von permanentmagneterregten Synchronmaschinen

Combination of Numerical and Analytical Methods for Calculating Permanent Magnet Synchronous Machines

Ferchichi, Mohamed Jamel:

Entwicklung, Aufbau und Programmierung eines Controllerboards zur Regelung eines DAB-Wandlers in ISOP-Verschaltung

Development, Construction and Programming of a Controller Board to Control a DAB Converter in ISOP Interconnection

Frey, Pauline:

Untersuchung der Verluste im Wechselrichter und der elektrischen Maschine bei der Verwendung von SiC-Halbleitern mit variabler Schaltfrequenz

Investigation of SiC-Inverters with Regard to Losses in Electrical Machines and Power Electronics at Variable Switching Frequency

Fröhling, Sören:

Messkonzepte eines kontaktintegrierten Temperatursensors in Leistungsmodulen

Measurement Concepts of a Contact-Integrated Temperature Sensor in Power Modules

Ghavami Moghaddam, Amirhossein:

Evaluation and Implementation of a Hybrid Three-Level Inverter

Henkenjohann, Jonas:

Analyse einer elektrisch erregten Synchronmaschine hinsichtlich einer Beeinflussung der Akustik

Analysis of an Electrically Excited Synchronous Machine with Regard to Influences on Acoustic Noise

Jia, Zijian:

Modellierung der parasitären Kapazitäten von Mittelfrequenz-Leistungstransformatoren mit Folienwicklungen

Modeling the Parasitic Capacitances of Medium Frequency Power Transformers with Foil Windings

Kifel, Dennis:

Nutzung der Additiven Fertigung in permanentmagneterregten Synchronmaschinen für Elektroflugzeuge

Use of Additive Manufacturing Technologies in Permanent Magnet Synchronous Machines in Electric Aircrafts

Kreggenwinkel, Markus:

Untersuchung von Schenkelpolrotoren mit steckbaren Polen

Investigation of Salient Pole Rotors with Pluggable Poles

Krems, Lucas:

Einfluss der maximalen Drehzahl auf die Masse und das Volumen einer elektrischen Traktionsmaschine für Automobilanwendungen

Influence of the Maximum Speed on the Mass and the Volume of an Electric Machine for Automotive Applications

Langfermann, Markus:

Analytische Berechnung der Modalmatrix unter Verwendung eines Mehrmassenschwingers für die Vorausberechnung der Eigenfrequenzen elektrischer Maschinen

Determination of the Eigenfrequencies and the Modal Matrix of Electrical Machines Using a Multi-Mass Oscillator

Li, Lu:

Untersuchung von synchronen Reluktanzmaschinen mit Außenrotor

Examination of Synchronous Reluctance Machines with External Rotor

Lu, Shuaichao:

Auslegungsmethodik zur Dimensionierung von mehrstufigen DC EMV Filtern für Traktionsantriebe mit SiC-Wechselrichter

Design Methodology for Dimensioning Multistage DC EMV Filters for Traction Drives with SiC Inverters

Nguekou Mbouzeck, Raoul Gabin:

Implementierung einer Ansteuerung für einen PFC-Gleichrichter und Inbetriebnahme des Umrichtersystems

Implementation of a Control for a PFC Rectifier and Commissioning of the Converter System

Niu, Jinlu:

Dämpfung von Getriebebeschwingungen im Antriebsstrang von Elektrofahrzeugen

Damping of Gear Oscillations in the Drive Train of Electric Vehicles

Ren, Jiayue:

Einfluss der Pulsdauer-Modulation auf die Geräuschemission elektrischer Traktionsantriebe

Influence of the Pulse Width Modulation regarding the Acoustic Noise Emission of Electrical Traction Drives

Schubert, Marius:

Charakterisierung des Maschinenverhaltens von permanentmagneteregt Synchronmaschinen mit magnetischen Ersatznetzwerken

Characterization of Operational Behaviour of Permanent Magnet Synchronous Machines by Means of Magnetic Equivalent Circuits

Schulz, Ilka:

Modellierung der orthogonalen Magnetisierung auf Basis empirischer Materialuntersuchungen

Modeling Orthogonal Magnetization Based on Empirical Material Investigations

Shu, Youjian:

Berechnung der Lagerspannung im Antriebsstrang eines Elektrofahrzeugs

Calculation of the Bearing Voltage in the Drive Train of an Electric Vehicle

Suresh, Anand:

Application of Active Thermal Control Methods for Improving the Thermal Cycling Performance and Service Lifetime of the Machine-Side Converter of an Airborne Wind Energy Generator

Vorhoff, Thorben:

Untersuchung der Modellierung von komplexen Feldverläufen in elektrischen Maschinen für ein magnetisches Ersatznetzwerk

Modelling of Complex Field Patterns in Electrical Machines for the Creation of a Magnetic Equivalent Circuit

Wang, Lipan:

Untersuchung des Einflusses der Wicklungslage in der Nut auf die Spannungsverteilung bei schnellschaltenden Wide-Bandgap-Halbleitern

Investigation of the Influences of the Winding Positions in the Slot on the Voltage Distribution with Fast-Switching Wide-Band-Gap Power Electronics

Wolff, Julia Sabrina:

Konzipierung, Aufbau und Inbetriebnahme eines aktiven Gatetreibers für SiC-MOSFETs

Design, Implementation and Testing of an Active Gate Driver for SiC-MOSFETs

Zhang, Haifei:

Auslegung und Aufbau von Leistungstransformatoren für 3,7kW/7,4kW/10kW DCDC-Konverter mit hoher Leistungsdichte und geringen Verlusten

Design and Construction of Power Transformers for 3,7kW/7,4kW/10kW DCDC Converters with High Power Density and Low Losses

Zhang, Weinan:

Design and Optimization of Input and Output EMI Filter

Zhu, Xi:

Erweiterung eines Verfahrens zur analytischen Grobdimensionierung von permanenterregten Synchronmaschinen

Extension of an Analytical Method for First Estimations of Dimensions of Permanent Magnet Synchronous Machines

Dissertationen 2019/20 | Dissertations 2019/20

Verbesserte Berechnung von Magnetfeldern und Ummagnetisierungsverlusten in elektrischen Maschinen

von Dr.-Ing. Alexander Rehfeldt

Eine exakte Vorausberechnung der Ummagnetisierungsverluste im Ständerblechpaket von Drehfeldmaschinen stützt sich neben einem Ummagnetisierungsverlustmodell auf die als Eingangsgröße benötigte Verteilung der Flussdichte nach Orientierung und Zeitverlauf. Da aktuelle Ummagnetisierungsverlustmodelle eine Vielzahl von Effekten abbilden, bieten analytisch basierte Feldberechnungsverfahren häufig eine unzureichende Detailtiefe. Die Verlustmodelle können ihr volles Potential nur im Zusammenwirken mit numerischen Feldberechnungsmethoden entfalten, die jedoch einen hohen Berechnungsaufwand mit sich bringen können. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit neben einem Ummagnetisierungsverlustmodell eine Methode zur zeiteffizienten Feldberechnung im Ständer vorgestellt mit dem Fokus auf einer Anwendung für elektrisch erregte Synchronmaschinen. Dabei wird hauptsächlich auf analytische Verfahren zurückgegriffen, die mit konformen Abbildungen geringe Rechenzeiten ermöglichen. Die Feldberechnung baut dabei auf einem vorgegebenen Luftspaltfeldspektrum im Leerlauf auf. Die analytische Feldberechnung wird mit Finite-Elemente-Methoden verglichen und validiert. Im Verlustmodell wird besonders auf den Einfluss von elliptischer Magnetisierung, anisotropen Materialeigenschaften und mechanischen Spannungen im Material auf die Verluste eingegangen. Zur vollständigen Betrachtung der Ummagnetisierungsverluste im homogenen Bereich des Ständers, also ohne den Endbereich zu berücksichtigen, werden axiale Feldanteile betrachtet, die konstruktionsbedingt durch radiale Kühlkanäle entstehen und zu zusätzlichen Wirbelstromverlusten führen. Dazu wird auf Basis von Finite-Elemente-Methoden eine Verlustformel parametrisiert. Die Ergebnisse werden mit Messungen an einer Versuchsmaschine verglichen.

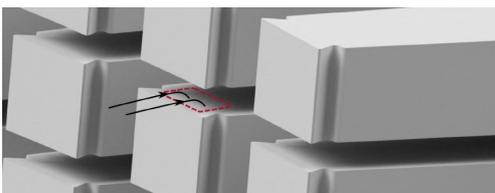


Abb. 50: Wirbelstrom durch axiale Feldkomponenten
Fig. 50: Eddy currents due to axial field components

Improved Calculation of Magnetic Fields and Iron Losses in Electrical Machines

by Dr.-Ing. Alexander Rehfeldt

A precise calculation of iron losses in the stator of A.C. machines depends on the chosen iron loss model as well as on knowing the flux density distribution including its orientation and time dependency. Because state of the art iron loss models represent a multitude of effects, analytic field calculation approaches often provide an insufficient level of detail. Current loss models develop their full potential only in combination with numerical field calculation methods, which come along with high computational cost. For this reason, a novel time-efficient field calculation method for the stator, which focuses on electrically excited synchronous machines, is introduced in this dissertation in addition to an iron loss model. Combining analytic field calculation methods and conformal mapping allows for a low calculating time without sacrificing accuracy. The field calculation is based on a given air-gap field distribution at no-load operation. The analytic field calculation is compared to and validated against finite element methods. The loss model accounts for the influence of elliptical magnetization, anisotropic material properties, and mechanical stress. All methods mentioned so far consider the iron losses in the homogenous part of the stator. Axial field components, which are caused by radial cooling ducts and lead to additional eddy-current losses, are not considered yet.

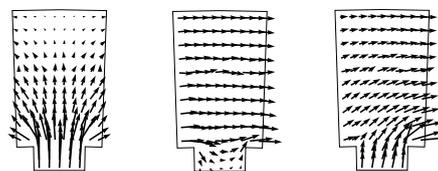


Abb. 51: Berechnete Flussdichteverteilungen im Joch und Joch-Zahn-Übergang für versch. Rotorpos. im Leerlauf
Fig. 51: Calculated flux density distribution in the yoke and the yoke-tooth transition for different rotor pos. at no load

For this reason, based on 3D finite element methods, an empirical loss equation is parameterized additionally using 3D finite element methods. Results are compared to measurements carried out on a downscaled test hydro generator.

Modellierung und Regelung von fünfphasigen Synchronmaschinen unter Berücksichtigung von Sättigungseffekten und Mehrfachanisotropien

von Dr.-Ing. Torben Jonsky

Die Verwendung von elektrischen Maschinen mit einer Phasenzahl größer als drei bringt zahlreiche Vorteile mit sich, wie beispielsweise die Erhöhung der Systemleistungsdichte durch Nutzung der dritten Harmonischen und Redundanz im Falle eines Phasenausfalls. Sowohl im theoretischen als auch im experimentellen Bereich gibt es aufgrund der geringen Verbreitung von fünfphasigen Maschinen eine wissenschaftliche Lücke im Vergleich zu dreiphasigen Systemen, was die Bewertung des Nutzens der Fünfphasigkeit erschwert. Die vorliegende Arbeit schließt diese Lücke, indem die Modellierung von fünfphasigen Synchronmaschinen um Nichtlinearitäten wie Sättigungseffekte und Mehrfachanisotropien erweitert wird. Das entwickelte Modell wird anhand von FEM-Simulationen validiert und die Tauglichkeit wird festgestellt. Als Versuchsmodell für Simulation und experimentelle Validierung wird eine fünfphasige Maschine mit zehn Einzelspulen untersucht. Hierbei kann jede Spule einzeln ohne einen gemeinsamen Sternpunkt mit Hilfe einer Vollbrücke angesteuert werden. Abb. 52 zeigt auf der linken Seite die Rotorgeometrie der entwickelten Maschine und auf der rechten Seite eins der zehn verwendeten „intelligenten Einzelmodule“ mit Wicklung, Leistungs- und Ansteuerelektronik sowie einen FPGA. In der Modellbildung wird die Park-Transformation auf fünfphasige Maschinen erweitert, so dass eine Abbildung der dritten Harmonischen in den Maschinengrößen auf ein lineares System möglich ist, was mit der klassischen dreiphasigen Park-Transformation nur für die Grundschwingung gilt. Des Weiteren werden Sättigungseffekte anhand von FEM-Daten und in MATLAB-Simulink simuliert, die die Abhängigkeit der Induktivitäten und Flussverkettungen von den Strömen im Arbeitspunkt darstellen. Hierbei wird ein analytisches Modell für das elektrische und mechanische Teilsystem entwickelt, das die FEM-Simulation in sehr gute Übereinstimmung mit der Zeitsimulation in MATLAB Simulink bringt. Mittels einer HF-Injektion werden die Induktivitäten in den relevanten Arbeitspunkten in Abhängigkeit der Bestromung der Maschine experimentell ausgemessen und für jedes Soll-Moment wird eine wirkungsgradoptimale Kombination der Phasenströme ermittelt, um eine Wirkungsgradsteigerung zu erreichen. Als zweiter zen-

Modelling and Control of Five-phase Synchronous Motors under Consideration of Saturation Effects and Anisotropies

by Dr.-Ing. Torben Jonsky

Electrical machines with a phase number higher than three have several advantages over conventional three-phase machines such as an increased power density and redundancy in case of a phase failure. The benefit of a five-phase machine is difficult to evaluate, because these types of machines are seldom used and there is a large gap of theoretical and experimental knowledge about three-phase machines. This work closes this gap between five-phase and three-phase machines by extending the modelling of five-phase machines to saturation effects and multiple anisotropies. The presented modelling is verified using FEM simulation with good results. The model for simulation and experimental validation is a five-phase permanent magnet synchronous motor with ten independent stator tooth coils. Each tooth coil can be used independently without a common star point. Therefore, the stator voltages and currents in each stator tooth are completely independent from each other. Fig. 52 on the left-hand side shows the geometry of the five-phase machine. On the right-hand side is a picture of one of the ten “smart stator tooth” that include the winding and power electronics and an FPGA to drive the IGBTs. In the modelling chapter, the Park transformation is extended for the use in five-phase machines, so the third harmonic is transformed into a linear system which is not possible using the standard three-phase Park transformation. Furthermore, saturation effects are simulated in FEM and in MATLAB-Simulink to show the dependence of the inductances and flux linkages from the currents in the current operating point. An analytical model for the electrical and mechanical subsystem is developed, which brings the FEM simulation in good concordance with the time-based simulation in MATLAB Simulink. With a high-frequency injection, the differential inductances in every operation point are determined and for every torque setpoint the most efficient combination of stator currents are derived to achieve an optimal efficiency. The second main experimental chapter is about switching five of the ten stator coils to minimize the losses in the power electronics. This is especially useful in an operating point with low currents. Fig. 53 shows the efficiency improvement in several working points between the usage of ten stator coils compared to the

traler Punkt wird die Möglichkeit einer Abschaltung von jeweils fünf der zehn Spulen im niedrigen Lastbereich untersucht, um die Verluste im Leistungshalbleiter zu minimieren. Hierbei zeigt sich, dass es im niedrigen Lastbereich bei einer Einzelspulenbestromung sinnvoll ist, dieses Verfahren anzuwenden. Abb. 53 zeigt die Wirkungsgradverbesserung im Vergleich zwischen einer Bestromung mit fünf und mit zehn Spulen. Der Wirkungsgrad lässt sich bei niedriger Last um bis zu fünf Prozentpunkte steigern.

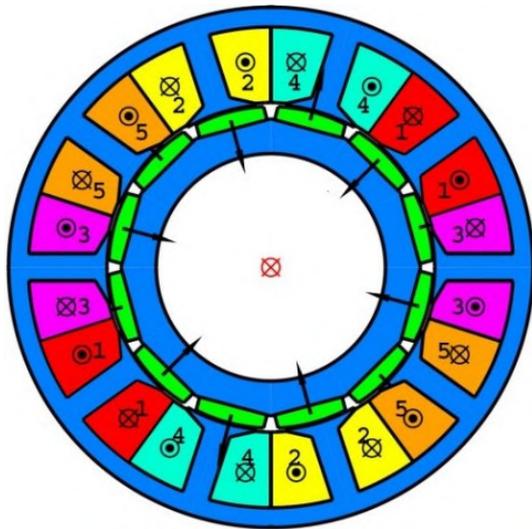


Abb. 52: Rotorgeometrie der fünfphasigen Maschine
 Fig. 52: Geometry of the five-phase machine

usage of only five stator coils. In areas with a small torque demand, the efficiency can be improved by up to five percentage points.

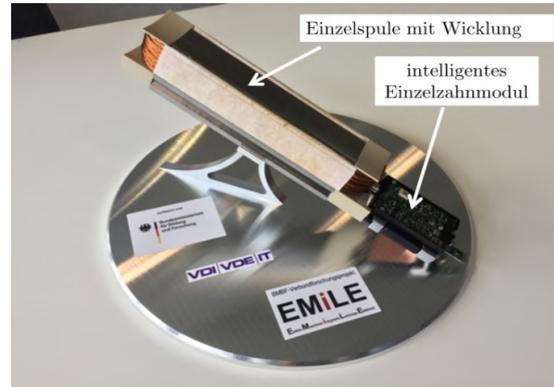


Abb. 53: Foto des intelligenten Einzelzahnmoduls
 Fig. 53: Picture of "smart stator tooth"

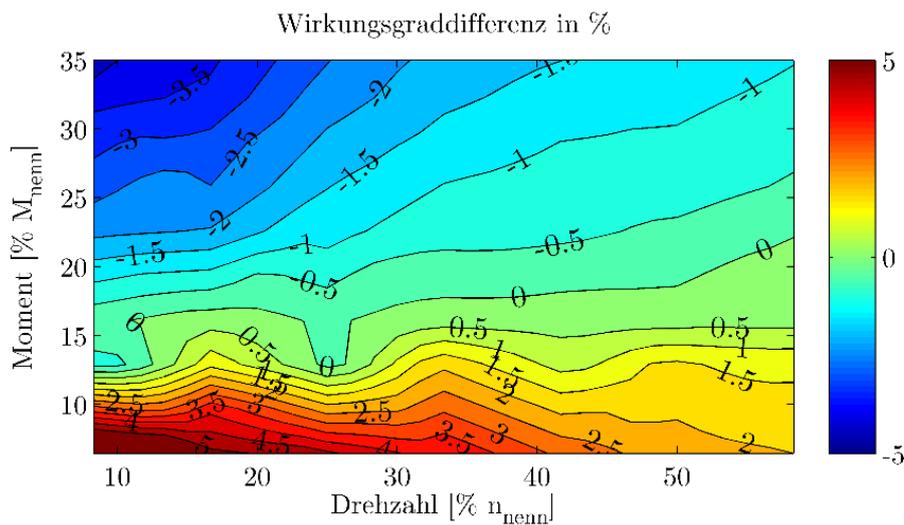


Abb. 54: Wirkungsgraddifferenz zwischen der Verwendung einer zehnpuligen und fünfspuligen Ansteuerung
 Fig. 54: Efficiency improvement between the usage of ten and five stator teeth

Berechnung des Einflusses von Dämpferwicklung und massivem Läuferballen auf den Stoßkurzschluss von Turbogeneratoren

von Dr.-Ing. Michael Hackbart

Die Auswertung der Stoßkurzschlussvorgänge von Turbogeneratoren wird zur Ermittlung der Maschinencharakteristiken verwendet. Im Prüffeld wird der Stoßkurzschlussvorgang aus dem Leerlaufbetrieb der Maschine initiiert. Dabei werden alle drei Ständerstränge miteinander kurzgeschlossen und der Ständerstromverlauf aufgenommen. Der Verlauf des Ständerstroms wird bei den klassischen Formulierungen in drei Abschnitte unterteilt, den subtransienten, den transienten und den stationären Zeitabschnitt. Durch Auswertung des Verlaufs können nun Reaktanzen und Zeitkonstanten für jeden Abschnitt ermittelt werden. Diese Parameter reichen aus, um das dynamische Verhalten an den Ständerklemmen des Generators hinreichend genau zu beschreiben. Die ermittelten Parameter eignen sich nicht zur Beschreibung des Erregerstromverlaufs. Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, den Erregerstromverlauf genauso gut wie den Ständerstromverlauf berechnen zu können. Die vorliegende Arbeit befasst sich nun mit den dreipoligen Stoßkurzschlussvorgängen von zwei- und vierpoligen Turbogeneratoren, die mit einem massiven Läuferkörper, einer Gleichstromerregung und einer getrennten Ständerwicklung versehen sind. Die Arbeit führt den Leser an die physikalischen Prozesse heran, welche im Stoßkurzschluss wirken. Zur Verdeutlichung der Effekte wird ein Dämpferkreismodell entwickelt, das das Erreger- und das Ständerstromverhalten im Stoßkurzschluss quantitativ beschreiben kann und den Einfluss der Dämpfung durch den massiven Läuferballen und die Dämpferstäbe erläutert. Moderne Ansätze zur Berechnung von Feldproblemen basieren meist auf der Verwendung numerischer Feldberechnungen mit der Finite-Elemente-Methode. Die in dieser Arbeit verwendeten Finite-Elemente-Modelle berücksichtigen die Nichtlinearität des Eisens sowie induzierte Ströme auf der Läuferoberfläche und im Rotordämpferkreis. Um die Modelle zu validieren, werden diese mit Prüffeldmessungen verglichen. Die Abweichung zwischen Messung und Rechnung beträgt nur wenige Prozent. Da die nichtlineare transiente Finite-Elemente-Methode ein sehr zeitaufwändiges Verfahren ist, wird ein analytischer Ansatz vorgestellt, der die Erregerströme beschreibt. Die Neuerung besteht darin, dass die Gleichung aufgrund des hohen Detaillierungsgrads sogar Kontaktwiderstände

Stator, Field and Damper Windings of Large Synchronous Generators in the Event of a Sudden Short Circuit

by Dr.-Ing. Michael Hackbart

Analyzing the sudden short-circuit events in turbine generators is essential to determine the machine characteristics. For test purposes, a three-phase sudden short-circuit is initiated at no load. The three stator terminals of the machine are shorted and the stator currents are observed versus time. In the classical machine theory, the dynamic stator current behaviour is classified into three intervals. These intervals are the sub-transient, the transient and the steady state. For each interval, time constants and reactances are evaluated and used to describe the dynamic machine behaviour. The derived parameters are helpful to represent the stator currents. In the past years, it has been consistently shown that these are not useful to predict the inductively coupled rotor currents. The presented work analyzes the three-phase sudden short-circuit event of two-pole and four-pole generators. The generators have a dc excitation and a pitched stator winding. The work derives an analytical model that includes the effect of damping caused by the rotor damper system. This model is helpful to understand the effects of damping and to evaluate the relevant physical processes that are involved. The analytical methods, including equivalent circuit models, are state of the art for fast computational machine parameter descriptions. Modern and complex procedures to describe electromagnetic field problems are based on the finite element method. In this work, the newly derived finite element models consider the iron's non-linearity and the currents induced on the rotor surface and in the damper circuit. They are very detailed and can also show impacts of contact resistances in damper windings. The models are compared to the test field results. Since the deviation between model and measurement is less than 5 percent. Since the non-linear transient field calculation is very time-consuming, the stator currents are accurately described analytically. The existing formulas for rotor currents are insufficient, and therefore, a new analytical approach is derived to calculate the rotor currents in case of a sudden short circuit. This approach is a promising new methodology that allows accurate field current description with respect to rotor surface damping, damper winding and contact resistances. The new method allows calculating rotors with and without damper winding and with and without rotor surface currents. The results of

des Dämpfersystems abbilden und Rotoren mit und ohne Dämpferwicklung sowie mit massiven und geblechten Läufern beschreiben kann. Die Vorhersagegenauigkeit des Verfahrens wird mit Modellen der Finite-Elemente-Methode an unterschiedlichen Generatoren nachgewiesen.

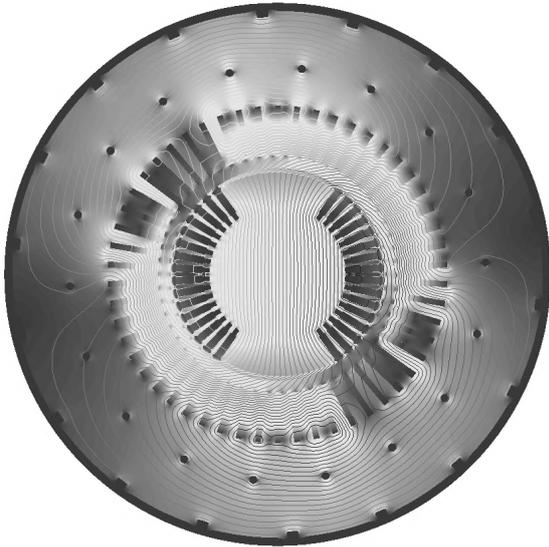


Abb. 55: Finite-Elemente-Modell zur Berechnung der Ströme auf der Rotoroberfläche, im Dämpferkreis und in der Ständer- und Erregerwicklung

Fig. 55: Finite element model to calculate currents on rotor surface, damper, stator and rotor winding

this methodology are compared to measurements on different generators.

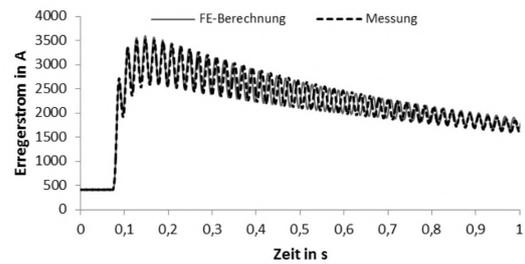


Abb. 56: Vergleich zwischen dem gemessenen und dem berechneten Erregerstromverlauf

Fig. 56: Comparison of measured and calculated rotor currents

Parametrisierung von thermischen Modellen für permanentmagneterregte Synchronmaschinen mittels experimenteller Identifikationsmethoden

von Dr.-Ing. Florian Boseniuk

Zur Vorausberechnung des thermischen Verhaltens von wechselrichter gespeisten permanentmagneterregten Synchronmaschinen (PMSM) werden häufig Wärmequellennetzwerke (WQN) verwendet. Trotz detaillierter Kenntnis über die Maschinengeometrie und deren Materialeigenschaften führt eine rein rechnerische Parametrierungsmethodik für ein WQN aufgrund von Fertigungseinflüssen häufig zu Abweichungen zwischen Berechnung und Messung, die den Genauigkeitsansprüchen an thermische Modelle für Systemsimulationen mechatronischer Produkte zur Beurteilung der Lebensdauer und als Basis für Optimierungen nicht mehr genügen. Um diesen Genauigkeitsanforderungen gerecht zu werden, sind über eine rein analytische Vorausberechnung der WQN-Parameter hinaus zusätzlich experimentelle Identifikationsmethoden notwendig. Außerdem führen die durch den Wechselrichter (WR) hervorgerufenen Oberschwingungsspannungen zu Oberschwingungsverlusten in der PMSM, die das thermische Verhalten insbesondere der Permanentmagnete maßgebend beeinflussen. Vor diesem Hintergrund ist es das Hauptziel der Dissertation, für wechselrichter gespeiste PMSM geeignete Modellstrukturen zur Berechnung der Wicklungs- und der Permanentmagnettemperatur zu erarbeiten, sodass Optimierungsmaßnahmen für das elektrische Antriebssystem unter Einbeziehung der Wirkungen von Oberschwingungsspannungen möglich sind. Ein Bestandteil dieser Arbeit sind Untersuchungen, inwieweit die thermischen Simulationen mittels eines WQNs mit 10 Temperaturknoten auf Basis von Geometrie- und Materialdaten sowie FE-Analysen unter dem Einfluss einer Wechselrichterspeisung mit Messungen übereinstimmen und welche Maßnahmen zur Verbesserung der Modellgenauigkeit getroffen werden müssen. Darauf aufbauend werden zwei weitere Modelle mit einem 2- und einem 5-Knoten-Ansatz erarbeitet. Hierfür erfolgt die Bestimmung der Modellparameter mithilfe einer seriellen Strategie zum Teil analytisch und zum Teil experimentell. Mit den aus Einzelversuchen identifizierten Parametersätzen kann anschließend ein Gesamtmodell vollständig parametrisiert werden. Die Idee der seriellen Prüfstrategie liegt demnach nicht darin, die WQN-Parameter des Erwärmungsdifferentialgleichungssystems aus

Parameterization of Transient Thermal Models for Permanent Magnet Synchronous Machines Using Experimental Identification Methods

by Dr.-Ing. Florian Boseniuk

Lumped parameter thermal networks (LPTN) are often used to predict the thermal behaviour of inverter-fed permanent magnet synchronous machines (PMSM). Despite detailed knowledge of the machine geometry and its material properties, the purely mathematical parameterization methodology of an LPTN often leads to deviations between calculation and simulation due to manufacturing influences, which no longer meet the accuracy requirements of thermal models for system simulations of mechatronic products for assessing service life and for optimizations. In order to achieve these accuracy requirements, additional experimental identification methods are necessary in addition to a purely analytical prediction of the LPTN parameters. Furthermore, the harmonic voltages produced by the inverter lead to harmonic losses in the PMSM, which influence the thermal behaviour of the permanent magnets in particular. Against this background, the main objective of this work is to develop suitable model structures for inverter-fed PMSM for the calculation of the winding and the permanent magnet temperature so that optimization measures of the electric drive system taking into account the effects of harmonic voltages are possible. Part of this thesis are investigations to what extent the thermal simulations by means of an LPTN with 10 temperature nodes on the basis of geometry and material data as well as FEM calculations agree with measurements under the influence of an inverter supply and which improvements can be made in order to increase the model accuracy. On this basis, two further models with a 2-node and a 5-node approach are developed. For this purpose, the determination of the model parameters by means of a serial strategy is carried out partly analytically and partly experimentally. Due to the balanced and stepwise serial testing strategy, it is possible to determine a certain parameter set for the thermal equivalent model one after another. Based on the sets of parameters identified in the single tests, a final overall model can then be parameterized. To test the selected methods, a comparison is made between measurement and simulation on a test bench. Finally, a comparison and an evaluation of the methodologies and models is presented.

einer einzigen Trainingsmessung durch ein nicht-lineares Optimierungsverfahren zu ermitteln, sondern sie schrittweise aus den speziellen Versuchsbedingungen zu identifizieren. Dies hat den Vorteil, dass die einzelnen technischen Effekte getrennt voneinander beurteilt werden können. Zur Erprobung der ausgewählten Verfahren erfolgt ein Vergleich zwischen Messung und Simulation an einem Prüfstand. Abschließend werden ein Vergleich sowie eine Bewertung der Methodiken und Modelle vorgenommen.

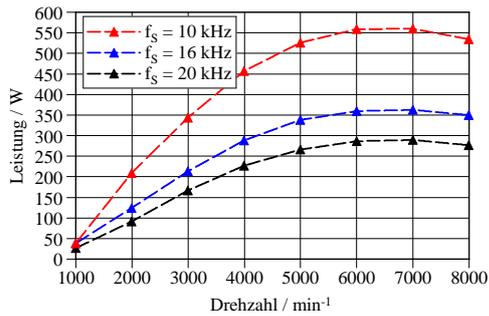


Abb. 57: Einfluss der Schaltfrequenz auf die Oberschwingungsverluste bei Bemessungsmoment $M_N = 72.8 \text{ Nm}$ von Maschine C
Fig. 57: Influence of the switching frequency on the harmonic losses at rated torque $M_N = 72.8 \text{ Nm}$ of machine C

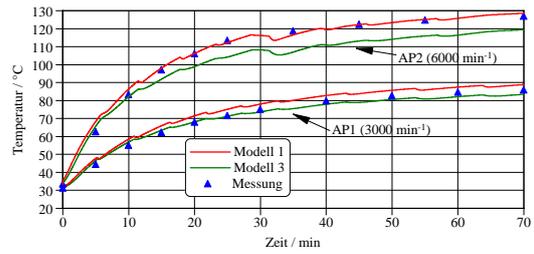


Abb. 58: Messung und Berechnung der Permanentmagnettemperatur in den untersuchten Arbeitspunkten von Maschine C
Fig. 58: Measurement and calculation of the permanent magnet temperature in the studied working points of machine C

Frequency-Domain Modeling of Harmonic Interactions in Pulse-Width Modulated Voltage-Source Inverter Drives

von Dr.-Ing. Malte John

Die in dieser Arbeit vorgestellte Methodik ermöglicht die Berechnung der Strom- und Spannungsspektren eines Antriebssystems für den eingeschwungenen Zustand unter Berücksichtigung von Wechselwirkungen der Systemkomponenten. Die Darstellung der Signale mittels ihrer Fourier-Koeffizienten bildet dabei die mathematische Grundlage. Die Beschreibung ihrer Systemverknüpfung erfolgt als algebraische Gleichungen, welche im Allgemeinen nichtlinear sind und die Verkopplung der spektralen Komponenten berücksichtigen. Dies ermöglicht die Beachtung der Interaktionen zwischen dem Wechselrichter, seiner Speisung und Last sowie seiner Regelung und Pulsdauermodulation. Dabei wird die Zeitkontinuität der physikalischen Größen, die Zeitdiskretisierung der Regelungssignale sowie der entsprechende Umwandlungsprozess einbezogen. Damit trägt diese Arbeit zu einem tieferen Verständnis der Wechselwirkungen innerhalb eines Umrichtersystems bei und ermöglicht eine Berechnung der entstehenden Spektren unter Berücksichtigung der Interaktionen, welche in gängigen Frequenzbereichsmodellen vernachlässigt werden.

Als Vereinfachung werden in dieser Arbeit die leistungselektronischen Komponenten als verlustfreie Schalter angenommen, welche diskret einen leitenden und einen sperrenden Zustand annehmen können. Die verwendeten Gleichungen gelten für hart geschaltete Umrichter mit fester Schaltfrequenz. Die Wechselsperrezeit kann für den gesteuerten Betrieb berücksichtigt werden. Diese bleibt allerdings für den geregelten Betrieb vernachlässigt.

Die Interaktion des Umrichtersystems mit einer elektrischen Maschine wird am Beispiel einer permanentmagneterregten Synchronmaschine gezeigt. Andere Maschinentypen werden in dieser Arbeit nicht betrachtet. Die Modellierung erfolgt im rotorfesten Koordinatensystem auf Grundlage der Hauptflussverkettung ohne Sättigung und berücksichtigt den Einfluss von oszillierenden Drehmomenten auf die spektrale Verteilung im gesamten Antriebssystem. Der Wechselrichter wird dabei im gesteuerten Betrieb betrachtet.

Die entwickelten Frequenzbereichsmodelle werden numerisch in Matlab ausgewertet und mit Ergebnissen aus Zeitbereichssimulationen in Simulink verglichen, welche auf den gleichen Annahmen beruhen. Vergleiche zeigen sehr geringe Unterschiede zwischen den Ergebnissen. Eine Validierung der zugrundeliegenden Annahmen erfolgt über den Ver-

Frequency-Domain Modeling of Harmonic Interactions in Pulse-Width Modulated Voltage-Source Inverter Drives

by Dr.-Ing. Malte John

The method presented in this thesis allows for the calculation of the current and voltage spectra of a drive system for the steady state, while considering the influence of interactions between the system components. The signals are represented by their Fourier coefficients. Their relationships within the system are described by algebraic equations, which are generally non-linear and incorporate the coupling of the harmonic components. This ensures the consideration of interactions between the inverter, its feeding source and load as well as its closed-loop control and pulse-width modulation. The models include continuous-time physical quantities, discrete-time control signals, and their respective conversion processes. As a result, this thesis provides a deeper understanding of the dependencies within a converter system and enables a calculation of the resulting spectra, taking into account the aforementioned interactions, which are neglected in established frequency-domain models.

As a simplification, in this work the power electronic components are assumed to be lossless switches, which can conduct and block as discrete states. The equations presented apply to hard-switched converters with fixed switching frequencies. The effect of interlock times is considered in the models for open-loop control. However, it is neglected in the models for closed-loop control.

The interaction of the converter system with an electrical machine is presented for the example of a permanent-magnet synchronous machine. Other machine types are not analyzed in this work. The model is formulated in the rotor-fixed reference frame in accordance with the main spatial harmonic of the field components and considers the influence of oscillatory load torque on the spectra of the overall drive system. The inverter is assumed to be in open-loop control in this case.

The frequency-domain models developed in this work are numerically evaluated in Matlab and compared with results from time-domain simulations in Simulink, which are based on the same assumptions. Comparisons reveal very small differences between the results. A validation of the underlying assumptions is performed by comparison with measurement results. Due to constraints in computational power, especially in cases of unfavourable ratios of fundamental frequency and switching frequency, the presented method is limited in its numerical evaluation regarding the number of harmon-

gleich mit Messergebnissen. Durch die Rechenleistung sind dem vorgestellten Verfahren, insbesondere bei der Wahl ungünstiger Verhältnisse von Grundfrequenz und Schaltfrequenz, in der numerischen Auswertung bei der Anzahl zu berücksichtigender Harmonische der Systemgröße Grenzen gesetzt.

ics to be considered and the size of the system.

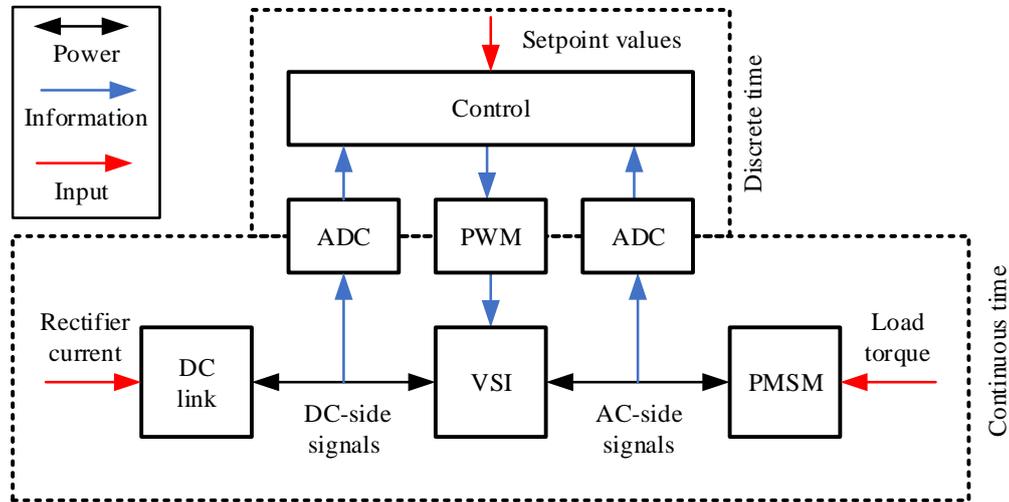


Abb. 59: Wechselwirkungen der Signale im Antriebssystem
Fig. 59: Interactions of the signals in the drive system

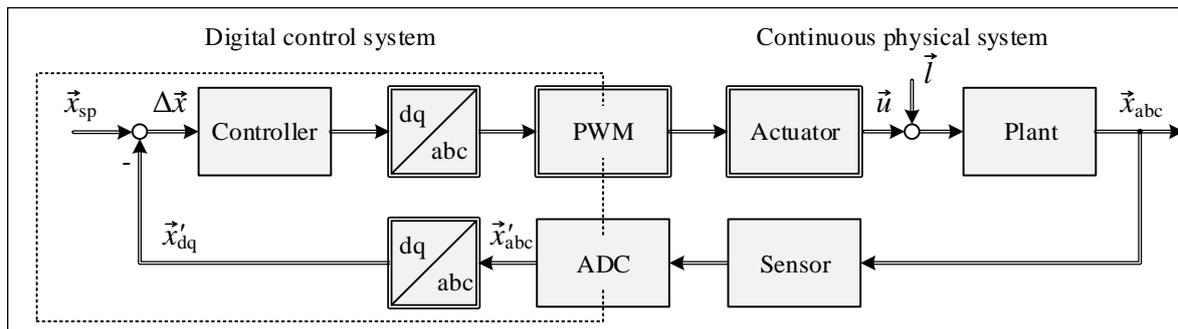


Abb. 60: Blockschaltbild des geschlossenen Regelkreises. Die nichtlinearen bzw. zeitvarianten Effekte der Pulsdauernmodulation (PWM), der Park-Transformation und des leistungselektronischen Stellgliedes werden in dieser Arbeit im Frequenzbereich behandelt.
Fig. 60: Block diagram of the closed control loop. The non-linear and time-variant effects of the pulse-width modulation (PWM), the Park transformation and the power electronic actuator are examined in this work in the frequency domain.

Baukastensysteme für den Antriebsstrang von Elektrofahrzeugen

von Dr.-Ing. Johannes Heseding

Die Herstellungs- und damit Anschaffungskosten batterieelektrisch betriebener Fahrzeuge sind nach heutigem Stand deutlich gegenüber denen konventionell verbrennungsmotorisch betriebener Fahrzeuge erhöht. Gleichzeitig ist die Variantenvielfalt der erhältlichen batterieelektrischen Fahrzeuge eingeschränkt. Für konventionelle Fahrzeuge bieten die Hersteller auf Basis von Baukastensystemen eine Vielzahl von Varianten an, die sich, neben anderen Merkmalen wie der Fahrzeugausstattung, vor allem in der Antriebsleistung unterscheiden. In dieser Arbeit wird ein Konzept für modular in ihrer Leistung skalierbare Antriebsstrangkomponenten erarbeitet, das einen Teil eines solchen Baukastensystems darstellen kann. Ziel ist es, dabei eine feinteilige Leistungsskalierung mit hohen Stückzahlen der Einzelkomponenten zu verbinden, um somit hohe Variantenvielfalt zu ermöglichen und gleichzeitig Kostenreduzierungen aufgrund von Skaleneffekten zu realisieren. Innerhalb des erarbeiteten Konzepts ist es das Ziel, bei einer Leistungsskalierung durch modulare Längenskalierung der elektrischen Maschine, den Strangstrom dieser annähernd konstant zu halten. Mit dieser Maßnahme wird der Einsatz, in ihrer Strangzahl skaliertes, identischer Halbleitermodule für alle innerhalb des Baukastensystems vorgesehenen Varianten ermöglicht. Es werden drei- und sechssträngige permanentmagneterregte Synchronmaschinen (PSM) und Induktionsmaschinen (IM) herangezogen, die einen für beide Maschinentypen identischen Stator aufweisen. Die Verwendung dieser beiden Maschinentypen liefert einen weiteren Beitrag zur feinteiligen Leistungsskalierung. Es wird darüber hinaus untersucht, ob eine moderate Erhöhung der Zwischenkreisspannung durch einen optionalen, ebenfalls in der Phasenzahl modular skalierbaren, Gleichspannungswandler zur Leistungsskalierung innerhalb einer Baureihe eingesetzt werden kann. Durch die Nutzung von PWM-Interleaving kann in sechssträngigen Antriebssystemen die Belastung des Zwischenkreiskondensators deutlich reduziert werden. Damit ist, trotz der mit der Strangzahlskalierung verbundenen Leistungserhöhung, ein identisches Bauteil innerhalb des Baukastens verwendbar. Dies ermöglicht eine weitere Stückzahlerhöhung dieser Komponente innerhalb des Baukastens.

Es werden die Vor- und Nachteile drei- und sechssträngiger Antriebssysteme untersucht. Dabei liegt der Fokus auf der Erarbeitung von durch Messungen validierten skalierbaren Modellen, insbesonde-

Modular Systems for the Drive Train of Electric Vehicles

by Dr.-Ing. Johannes Heseding

The manufacturing and therefore purchasing costs of battery-electric vehicles are significantly increased compared to conventionally powered vehicles with combustion engines. In addition, the variety of available battery-electric vehicles is limited. For conventional vehicles, manufacturers offer a large number of variants. These variants are carried out from modular platform systems which, in addition to other features such as vehicle equipment, differ mainly in vehicle performance. In this thesis, a concept for modularly scalable powertrain components is developed that can be part of a modular platform system. The main target is to combine a finely graduated power scaling, resulting in high volumes of the individual components, in order to enable a high number of variants and at the same time to realize cost savings due to economics of scale. Within the elaborated concept, the goal is to keep the phase current of a modular length scaled electric machine at an almost constant level. To do so, scaling of the motorphase count is considered. This enables the use of identical semiconductor modules scaled in terms of their number of phases for all variants provided within the modular platform system. For this purpose, three- and six-phase permanent magnet synchronous machines (PSM) and induction machines (IM) are used, which use an identical stator for both machine types. The use of these two machine types provides a further contribution to the finely graduated power scaling. In addition, it is being investigated whether a moderate increase in the DC link voltage can be used by an optional, also in its phase number modularly scalable, DC-DC converter for power scaling within a series. By using PWM interleaving in six-phase drive systems, the stress of the DC link capacitor can be significantly reduced, and therefore an identical component can be used within the modular platform system. This results in a further increased number of identical components used.

The advantages and disadvantages of three- and six-phase drive systems are investigated. The main focus lies on the development of scalable models validated by measurements, in particular for the components that are related to the field of power electronics, as well as the analysis of the interaction between the inverter and the electrical machine. This includes in particular the identification of factors that cause high fifth- and seventh-order fundamental frequency in the investigated six-phase machines and a method for compensating these un-

re von der dem Gebiet der Leistungselektronik zu-rechenbaren Komponenten, sowie der Analyse der Wechselwirkung zwischen Wechselrichter und elektrischer Maschine. Zu diesen zählen insbesondere die Herausarbeitung von Faktoren zur Ursache der bei den untersuchten sechssträngigen Maschinen hohen Stromüberschwingungen fünf- und siebenfacher Grundfrequenz, sowie ein Verfahren zur Kompensation dieser unerwünschten Ströme. Darüber hinaus wird eine Analyse der durch die nicht sinusförmige Wechselrichterspeisung hervorgerufenen Oberschwingungsverluste in drei- und sechssträngigen Maschinen durchgeführt. Diese Verluste sind bei sechssträngigen Maschinen, insbesondere bei Einsatz von PWM-Interleaving, gegenüber dreisträngigen Maschinen erhöht.

Mit den erarbeiteten Modellen des Antriebsstrangs wird eine vergleichende Bewertung des modularen Skalierungskonzepts (in zwei Ausprägungen) gegenüber einem konventionellen Skalierungsansatz ohne Strangzahlvariation vorgenommen. Dabei wird sowohl der benötigte Bauraum der Antriebsstrangvarianten, deren Effizienz im fahrzeugübergreifenden Einsatz in drei Fahrzyklen, sowie die anhand von erarbeiteten Kostenmodellen berechneten Gesamtkosten in die abschließende Bewertung einbezogen. Es ergeben sich Kostenvorteile bei leicht erhöhtem Bauraumbedarf bei äquivalenter Effizienz für das modulare Skalierungskonzept.

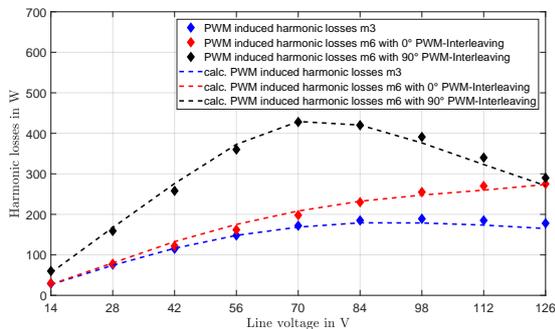


Abb. 61: Berechnete und gemessene PWM-induzierte Oberwellenverluste in Drei- und Sechs-Phasen-Konfiguration und Verzahnung

Fig. 61: Calculated and measured pwm-induced harmonic losses in three- and six-phase configuration and interleaving

wanted currents. In addition, an analysis of the harmonic losses caused by the non-sinusoidal inverter output voltage is carried out for three- and six-phase machines. These losses are increased in six-phase machines, especially when using PWM interleaving, compared to conventional three-phase machines. With the models developed, a comparative assessment of the modular scaling concept compared to a conventional scaling approach without phase number variation is done. The required installation space of the powertrain variants, their efficiency in cross-vehicle use in three driving cycles as well as the calculated total costs based on developed costs models is included in the final assessment. It is figured out that there are cost advantages with the drawback of slightly increased space requirements at equivalent efficiency for the modular scaling concept.

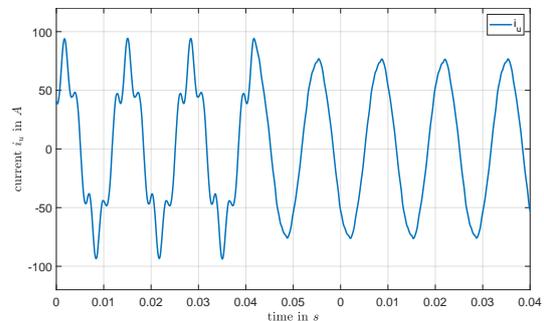


Abb. 62: Aktive Stromregelung der 5. und 7. Harmonischen für eine sechsphasige Induktionsmaschine

Fig. 62: Active 5th and 7th harmonic current control for six-phase induction machine

Beiträge zu fehlertoleranten Fahrzeugantrieben mit Radnabenmotoren ohne Reibungsbremse

von Dr.-Ing. Tobias Krone

Diese Dissertation beschäftigt sich mit fehlertoleranten Radnabenantrieben mit integrierter Leistungselektronik für Elektrofahrzeuge (Abb. 63). Die Besonderheit des betrachteten Fahrzeugtyps ist, dass die Bremsfunktion an den angetriebenen Rädern vollständig von den Radnabenantrieben übernommen wird, sodass an diesen Rädern keine zusätzlichen Reibungsbremsen notwendig sind (Abb. 64).

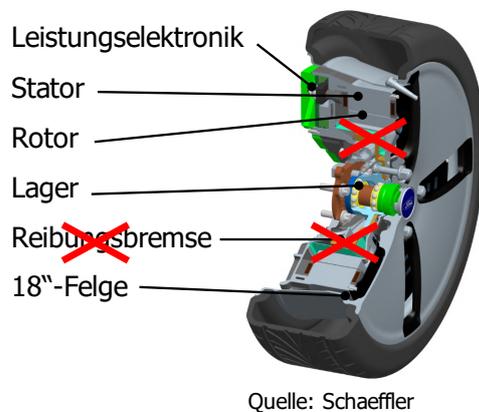


Abb. 63: Radnabenantrieb
Fig. 63: Wheel hub drive

Im Rahmen der Arbeit wird für diese Anwendung zunächst eine optimale Topologie für den elektrischen Antriebsstrang ermittelt. Der Fokus liegt bei dieser Betrachtung auf dem Bauteilbedarf der leistungselektronischen Komponenten und ihrer Energieeffizienz im Zyklusbetrieb. Dafür werden verschiedene Topologien, z. B. mit oder ohne einen Hochsetzsteller zwischen der Traktionsbatterie und den elektrischen Antrieben, verglichen und die optimale Spannung der Traktionsbatterie für die jeweilige Topologie ermittelt. Für diesen Vergleich werden die benötigten Komponentenmodelle der Batterie, der Leistungselektronik und des elektrischen Motors entwickelt. Diese ermöglichen eine detaillierte Auslegung und Analyse der verschiedenen Topologien, sodass als Ergebnis eine anwendungsoptimierte Topologie vorliegt.

Auf dieser Topologie aufbauend wird im nächsten Schritt ein Sicherheitskonzept für den Leistungsteil des elektrischen Antriebsstrangs entwickelt. Dafür werden die sicherheitskritischsten Fehlfunktionen, die von Fehlern im Antriebsstrang ausgehen können, beschrieben und entsprechende Abhilfen aufgezeigt.

Contributions to Fault-tolerant Vehicle Drives with Wheel Hub Motors without Friction Brake

by Dr.-Ing. Tobias Krone

This thesis deals with fault-tolerant wheel hub drives (WHD) with integrated power electronics for electric vehicles (Fig. 63). The special feature of the vehicle type under consideration is that the braking function is completely implemented into the wheel hub drives of the driven wheels, so that no additional friction brakes are necessary on these wheels (Fig. 64).

Within the scope of the work, an optimal topology for the electric power train is determined for this application. The focus of this analysis is on the component requirements of the power electronic components and their energy efficiency in different driving cycles. Various topologies, e.g. with or without a boost converter between the traction battery and the electric drives, are compared and the optimum voltage of the traction battery is determined for the respective topology. This comparison requires the development of component models of the battery, the power electronics, and the electric motor. The models enable a detailed design and analysis of the various layouts, resulting in an application-optimized topology.

In the next step, a safety concept for the electric power train is developed based on this topology. For this purpose, the most safety-critical malfunctions that can be caused by faults in the power train are described and appropriate remedies are shown.

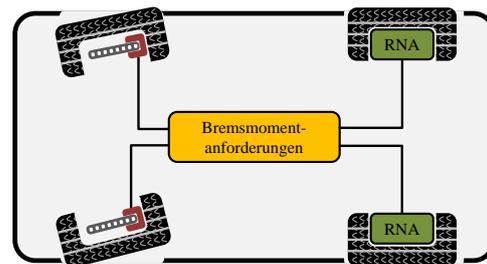


Abb. 64: Bremssystem des Fahrzeugs
Fig. 64: Vehicle braking system

In order to implement this safety concept, two newly developed methods for the detection of half-bridge short circuits are presented and investigated. Compared to the known methods, these offer advantages in terms of fault detection time and circuit complexity. In addition, a methodology for calculating the current stress in the DC link is developed. This enables a simplified calculation of the current stress occurring during operation, taking into account the interactions between the distributed power electronic

Zur Umsetzung dieses Sicherheitskonzepts werden anschließend zwei neu entwickelte Verfahren zur halbleiternahen Erkennung von Halbbrückenkurzschlüssen vorgestellt und untersucht. Diese bieten gegenüber den bekannten Verfahren Vorteile hinsichtlich der Fehlererkennungszeit und des Schaltungsaufwands.

Darüber hinaus wird eine Methodik zur Berechnung der Zwischenkreisbelastung entwickelt. Diese ermöglicht eine vereinfachte Berechnung der im Betrieb auftretenden Belastungen unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen den verteilten leistungselektronischen Komponenten, die über das Hochvolt-Gleichspannungsnetz im Fahrzeug miteinander verbunden sind und einen verteilten Zwischenkreis darstellen. Mit Hilfe dieser Methodik erfolgt im Anschluss eine Optimierung der Zwischenkreisauslegung in den Antrieben und im Hochvolt-Gleichspannungsnetz.

Die Ergebnisse dieser Arbeit liefern signifikante Beiträge für die Entwicklung anwendungsoptimierter Radnabenantriebe und den Aufbau eines elektrischen Antriebsstrangs, der geeignet ist, die Bremsfunktion an der Hinterachse komplett über die elektrischen Antriebe zu realisieren.

components, which are connected to each other via the high-voltage DC system in the vehicle and represent a distributed DC link. This methodology is then used to optimize the design of the DC links in the drives and in the high-voltage DC system.

The results of this work make significant contributions as to the development of application-optimized wheel hub drives and the construction of an electric power train that is suitable for implementing the braking function on the rear axle completely with the help of electric drives.

Quasi-Two-Level PWM Operation for Modular Multilevel Converters: Implementation, Analysis, and Application to Medium-Voltage Motor Drives

von Dr.-Ing. Jakub Kucka

Der Betrieb von modularen Multilevel-Umrichtern bei niedrigen Betriebsfrequenzen, notwendig für Anwendungen als Mittelspannungsantrieb, ist generell mit den bekannten Betriebsmodi herausfordernd. Besonders wenn das Bemessungsmoment während des Stillstands erforderlich und die Bemessungsfrequenz der Maschine niedrig sind, muss die installierte Modulkapazität sehr hoch sein. Eine mögliche Lösung für dieses Problem stellt der Quasi-Zwei-Level-PWM-Modus dar, welcher die Kapazität um mehr als eine Größenordnung reduziert. Obwohl er auf die Multilevel-Kurvenform verzichtet, bleiben alle anderen Vorteile eines konventionell betriebenen modularen Multilevel-Umrichters erhalten. Diese Vorteile beinhalten kleine Spannungsstufen (limitierend für die Probleme mit langen Maschinenkabeln und für Lagerströme), Modularität, Skalierbarkeit auf höhere Spannungen und eine unkomplizierte Möglichkeit Redundanz aufzubauen.

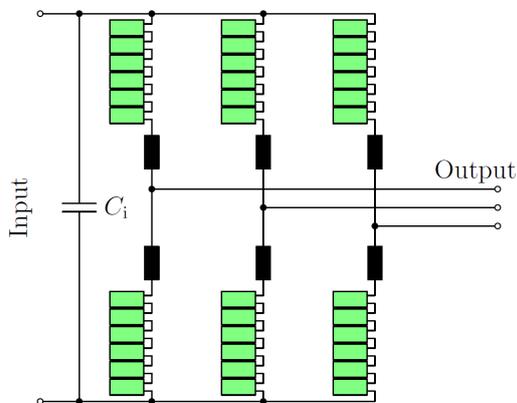


Abb. 65: Modularer Multilevel-Umrichter
Fig. 65: Modular multilevel converter

Diese Dissertation zeigt die Herleitung des Quasi-Zwei-Level-PWM-Modus und schlägt zwei geeignete Regelungsmethoden vor. Diese sind mittels eines skalierten Prototyps des modularen Multilevel-Umrichters validiert. Simulationen werden eingesetzt, um die Sensitivität der vorgeschlagenen Regelungen auf die Unsicherheiten der bekannten Umrichterparameter zu evaluieren. Zusätzlich werden besondere Effekte und Eigenschaften des Betriebsmodus untersucht. Diese sind z.B. Spannungsfehler, Reduzierung der Überspannungen bei langen Maschinenkabeln und eine Anwendung mit Flat-

Quasi-Two-Level PWM Operation for Modular Multilevel Converters: Implementation, Analysis, and Application to Medium-Voltage Motor Drives

by Dr.-Ing. Jakub Kucka

The low-frequency operation of modular multilevel converters, required by variable-speed drives, is generally challenging within the established operation modes. Especially when rated torque beginning from zero speed is required and the rated machine speed is low, the installed module capacitance has to be very high. A possible solution to this problem is quasi-two-level PWM operation, which reduces the capacitance by more than one order of magnitude. Although the multilevel property of the modular multilevel converter has to be sacrificed, all other advantages, i.e. small voltage steps limiting the problems with long machine cables and bearing currents, modularity, scalability to higher voltage levels, and a straightforward option to add redundancy, are retained from conventionally operated modular multilevel converters.

This thesis presents a derivation of the quasi-two-level PWM operation mode and proposes two suitable control methods. These methods are validated using a downscaled prototype of a modular multilevel converter. Simulations are conducted to evaluate the sensitivity of the proposed control to uncertainties in the knowledge of the converter parameters. Furthermore, the specific effects and properties of the operation mode, such as output voltage errors, reduced overvoltages with long machine cables, and the operation with flat-top modulation, are analyzed.

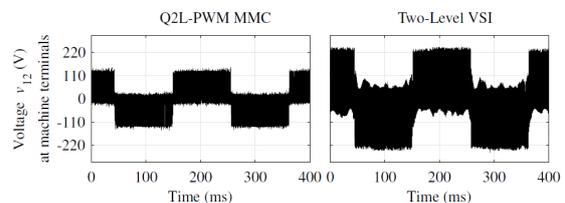


Abb. 66: Anders als die Zwei-Level-Spannungsverläufe von konventionellen Zwei-Level-Umrichtern vermindern die Quasi-Zwei-Level-Spannungsverläufe die Reflexionseffekte langer Maschinenkabel (experimentelle Verläufe)

Fig. 66: Unlike the two-level voltage waveforms of conventional two-level inverters, the quasi-two-level voltage waveforms diminish the reflection effects of long machine cables (experimental waveforms)

In addition to the presented control methods, the design process is studied. First, the specific design trade-offs between the converter parameters are

Top-Modulation.

Neben den vorgestellten Regelungsmethoden wurde auch die Dimensionierung untersucht. Erst wurden die für den Betriebsmodus spezifischen Trade-offs der Umrichterparameter identifiziert. Die Evaluierung dieser Trade-offs hat gezeigt, dass der Quasi-Zwei-Level-PWM-Modus sich besonders gut für modulare Multilevel-Umrichter mit einer höheren Anzahl von Modulen pro Zweig eignet. Im nächsten Schritt wurden quasi-zwei-level-PWM-betriebene modulare Multilevel-Umrichter für mehrere Fälle von niederfrequenten Mittelspannungsantrieben dimensioniert. Für die Dimensionierung wurden das validierte Simulationsmodell und die in der Arbeit hergeleiteten analytischen Gleichungen angewendet. Zudem wurde das Modell zusätzlich genutzt, um eine dynamische Beschleunigung der Maschine zu simulieren. Die Simulationen bestätigen die Plausibilität der durchgeführten Dimensionierungen.

Die resultierenden Design-Indikatoren werden für die einzelnen Dimensionierungsfälle mit den Indikatoren des konventionell betriebenen modularen Multilevel-Umrichters, mit denen des Zweipunkt-Wechselrichters mit einer Serienschaltung von IGBTs und mit denen des modularen Multilevel-Matrix-Umrichters verglichen. Diese wurden für die gleichen Fälle dimensioniert. Der Vergleich mit dem konventionellen Betriebsmodus des modularen Multilevel-Umrichters und mit dem modularen Multilevel-Matrix-Umrichter zeigt Dimensionierungsvorteile des Quasi-Zwei-Level-PWM-Modus. Wie erwartet, wird die Verzerrung des Ausgangsstroms mit dem Quasi-Zwei-Level-PWM-Modus deutlich erhöht. Es ist jedoch zu erwarten, dass diese Verzerrung für die Anwendung in Mittelspannungsantrieben akzeptabel ist und kein zusätzlicher Filteraufwand betrieben werden muss. Zusammenfassend stellen quasi-zwei-level-PWM-betriebene modulare Multilevel-Umrichter eine vielversprechende Alternative für Anwendungen in niederfrequenten Mittelspannungsantrieben dar.

doi: <https://doi.org/10.15488/4827>

identified. The evaluation of trade-offs shows that quasi-two-level PWM operation is especially well-suited for modular multilevel converters with a high number of modules per branch. In the next step, the quasi-two-level PWM-operated modular multilevel converters are designed for several study cases of low-frequency medium-voltage drives. The design process utilizes the validated simulation model and derived analytic equations. Additionally, the validated model is also used to simulate a dynamic machine acceleration to confirm the plausibility of the designs.

The resulting design indicators of the conducted designs are compared to those of the conventional operation mode of the modular multilevel converter, to the two-level voltage-source inverter based on series-connected IGBTs, and to the modular multilevel matrix converter, which were designed for the same study cases. The comparison to standard operation modes of the modular multilevel converter and to the modular multilevel matrix converter shows design advantages for the quasi-two-level PWM operation of modular multilevel converters. As expected, the output current distortion is significantly increased with the quasi-two-level PWM operation. Nevertheless, the current distortion is likely to be acceptable for medium-voltage drives without additional filter requirements. In conclusion, quasi-two-level PWM-operated modular multilevel converters are a favorable alternative for applications in low-speed medium-voltage drives.

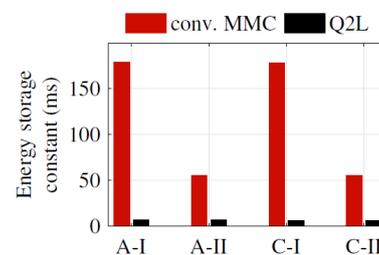


Abb. 67: Im Vergleich zum konventionell betriebenen MMC ist mit dem Quasi-Zwei-Level-betriebenen MMC die Speicherkonstante, welche die eingebaute Kapazität darstellt, um mehr als eine Größenordnung niedriger als in sämtlichen untersuchten Fällen

Fig. 67: Comparing the quasi-two-level PWM-operated MMC (Q2L) to the conventionally operated MMC (conv. MMC), the energy storage constant, that represents the installed module capacitance, is lower by more than one order of magnitude in all studied cases

Fehlererkennung in Antriebssystemen mit permanentmagneterregten Synchronmaschinen

von Dr.-Ing. Fabian Oelkers

Die Elektromobilität bietet eine Reihe neuer Möglichkeiten für verschiedene Antriebskonfigurationen in Fahrzeugen. Insbesondere Radnabenantriebe zeigen sich hinsichtlich Fahrdynamik und Bauraumausnutzung als vorteilhaft gegenüber konventionellen Elektrofahrzeugen mit Zentralantrieb. Die Substitution der mechanischen Bremse auf der Hinterachse ist in dieser Entwicklung ein weiterer Schritt, der sich zu durchdenken lohnt, da Kosten, Verschleiß und wiederum Bauraum eingespart werden können. Erhöhte Ansprüche an die Systemverfügbarkeit im Fehlerfall sowie die Ausschöpfung des maximalen Rekuperationspotentials führen auf mehrsträngige Antriebstopologien, fehlertolerante Umrichter sowie softwarebasierte Methoden zur Fehlererkennung und -behandlung. Letztere sind das Thema der Dissertation.

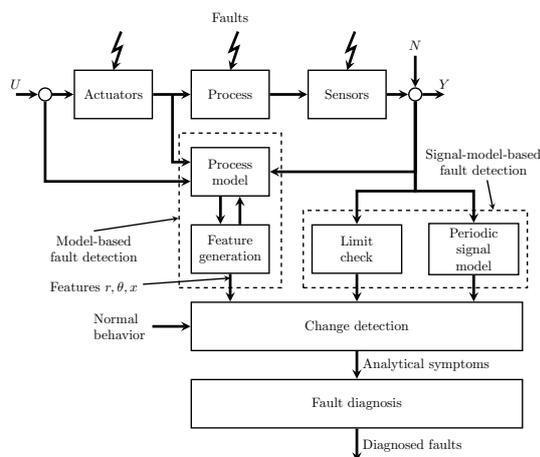


Abb. 68: Allgemeine Darstellung zu Ansätzen der Fehlerdiagnose

Fig. 68: General description of approaches to fault diagnosis

Die Arbeit beginnt mit der Vorstellung fehlertoleranter Antriebstopologien und zeigt als Motivation die Ergebnisse von Fahrzeugtests, bei denen die Auswirkungen verschiedener Fehlerfälle im Antriebssystem auf die Fahrstabilität gezeigt werden (ohne Fahrassistenzsysteme). Demgegenüber werden die Potentiale einer vorhandenen Fehlererkennung und -behandlung gestellt. Um dies zu erreichen, wird im weiteren Verlauf die Modellbildung des elektrischen Antriebssystems, bestehend aus elektrischer Maschine, Leistungs-

Fault Detection in Drive Systems with Permanent Magnet Synchronous Machines

by Dr.-Ing. Fabian Oelkers

Electric mobility offers a number of new possibilities for different drive configurations in vehicles. Wheel hub drives in particular have been proving to be advantageous in terms of driving dynamics and space utilisation compared with conventional electric vehicles with central drive. The substitution of the mechanical brake on the rear axle is a further step in this development that is worth thinking through, as costs, wear and tear and, in turn, installation space can be saved. Increased demands on system availability in the event of a fault and the exhaustion of maximum recuperation potential lead to multi-phase drive topologies, fault-tolerant converters and software-based fault detection and handling methods. The latter are the subject of this dissertation.

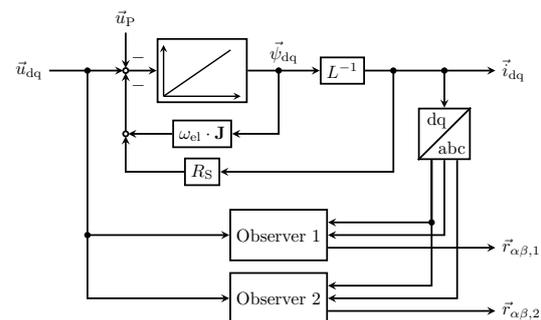


Abb. 69: Mehrfachbeobachterstruktur mit PMSM als zu beobachtende Strecke

Fig. 69: Multi-observer with PMSM as observed structure

The thesis starts with the presentation of fault-tolerant drive topologies. The motivation are results of vehicle tests showing the effects of different failures in the drive system on driving stability (without driving assistance systems). On the other hand, the potentials of existing fault detection and handling systems are identified. This is done by presenting the modelling of the electric drive system consisting of electric machine, power electronics and drive control. Methods for detecting and handling faults in the rotor position sensor as well as in the current and DC link voltage sensors are based on state observers and state estimators and generate a redundancy which is used for fault handling in the respective sensors. In addition, various approaches are developed for the detection of inverter faults and classical methods are compared. Further faults

elektronik und Antriebsregelung gezeigt. Verfahren zur Erkennung und Behandlung von Fehlern in der Rotorlage-, Strom- und Zwischenkreisspannungssensorik basieren auf Zustandsbeobachtern und Zustandsschätzern und erzeugen eine Redundanz, die zur Fehlerbehandlung in der jeweiligen Sensorik genutzt wird. Darüber hinaus werden für die Fehlererkennung von Umrichterfehlern verschiedene Ansätze entwickelt und klassischen Verfahren gegenübergestellt. Treten im System weitere Fehler (z.B. Wicklungsfehler) auf, die durch die genannten Verfahren und Methoden nicht abgedeckt sind, werden diese durch eine übergeordnete Fehlererkennung basierend auf einer Drehmoment-schätzung erkannt. Das System kann schließlich durch Schalten des aktiven Kurzschlusses oder der Pulssperre in einen sicheren Zustand überführt werden.

Die messtechnische Validierung der Verfahren und Methoden erfolgt an einem eigens aufgebauten Prüfstand, der die Anforderungen im Fahrzeug für einen kleineren Leistungsbereich nachbildet.

occurring in the system, which are not covered by the aforementioned methods and procedures (e.g. winding faults), are detected by a higher-level fault detection system based on torque estimation. Finally, the system can be transferred to a safe state by switching the active short circuit or the pulse lock.

The procedures and methods are validated by measurements on a specially constructed test bench, which simulates the requirements in the vehicle for a smaller power range.

Über System- und Regelungsdynamiken von Windenergieanlagen und deren Einfluss auf die Umrichterlebensdauer

von Dr.-Ing. Marcel Morisse

Der Forderung nach besonders zuverlässigen und wartungsarmen Windenergieanlagen steht heutzutage eine nicht vernachlässigbare Anzahl von Ausfällen der Leistungshalbleitermodule bereits in den ersten Betriebsjahren gegenüber.

Diese Arbeit untersucht zu diesem Zweck die Umrichterbelastung durch thermische Wechsellspiele innerhalb der Leistungshalbleiter aufgrund von bei der Umrichterauslegung oft vernachlässigten Systemdynamiken, Wechselwirkungen und Regleranforderungen. Hierfür werden die Unterschiede in der Halbleiterbelastung durch unterschiedlich detaillierte Modellierungstiefen herausgestellt.

Als Basis dieser und weiterer Untersuchungen dienen zwei der häufigsten Anlagentopologien. Zum einen ist dies eine Windenergieanlage mit Vollumrichter und permanentmagneterregter Synchronmaschine und zum anderen eine Teilumrichteranlage mit doppelt gespeister Asynchronmaschine.

Darüber hinaus werden Anforderungen seitens des Netzbetreibers berücksichtigt, wie die dynamische Netzstützung im Fall eines Spannungseinbruchs sowie die Vorgabe eines definierten Leistungsfaktors der Windenergieanlage am Netzanschlusspunkt.

Zusätzlich stehen ausgewählte Regelstrategien im Fokus der Untersuchungen, deren Zweck die Lebensdauererweiterung bestimmter Anlagenkomponenten ist und die in der Folge für eine zusätzliche Be- oder Entlastung der Umrichter verantwortlich sind.

Die Untersuchungen zeigen schließlich, dass starke Vereinfachungen des Anlagenverhaltens für die Umrichterauslegung zulässig sind, da signifikant nur solche Effekte auf die Lebensdauer wirken, die relativ niederfrequente Auswirkungen auf die Arbeitspunkte der Umrichter haben. Dies können zum Beispiel Anforderungen des Netzbetreibers an die Umrichter sein oder auch dynamische Regelanforderungen wie die Einzelblattverstellregelung bei ansonsten häufigem Teillastbetrieb der Rotorblattantriebsumrichter.

Die Untersuchungen innerhalb dieser Arbeit legen den Schluss nahe, dass durch Modellvereinfachungen die thermische Zyklenbeanspruchung leistungselektronischer Komponenten in Windenergieanlagen zum Teil unterschätzt wird. Dies ist nach Ansicht des Autors jedoch nicht allein für die vermehrten Frühausfälle dieser Komponenten verant-

About System and Control Dynamics of Wind Turbines and their Impact on the Converters' Lifetime

by Dr.-Ing. Marcel Morisse

The demand for highly reliable and low-maintenance wind turbines is contrasted by a multitude of failures of the power modules in their early years of operation.

For this reason, the present work investigates the thermal load cycles within the power semiconductors due to system dynamics, interactions, and controller demands which are often neglected in the converter design process. This is done by determining the differences in the semiconductor loads due to different modelling depths.

These models represent two of the most common wind turbine topologies, the permanent magnet synchronous generator with a fully rated converter on the one hand and the doubly fed induction generator with a partially rated converter on the other hand.

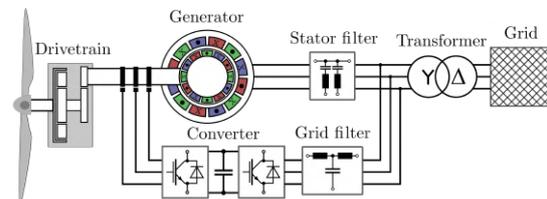


Abb. 71: Topologie einer Windenergieanlage mit doppeltgespeistem Asynchrongenerator und Teilumrichter
Fig. 71: Topology of a wind turbine with a doubly fed induction generator and a partially rated converter

In addition, grid operator requirements like the dynamic grid support in case of a voltage drop as well as the demand of a defined power factor at the grid connection point are considered.

Furthermore, selected control strategies are investigated with the aim to prolong the lifetime of certain turbine components which then leads to a decrease or an increase of the converter load.

The investigations show that great simplifications of the system behaviour are admissible for the converter design process because only those effects with rather low-frequency impact on the converter's operating points have a significant influence on their lifetime. This might be the grid operator demands for the main converter or the dynamic control demands of the individual pitch control at partial load operation for the pitch converter.

The findings in this work lead to the conclusion that strong simplifications of the underlying models can

wortlich.

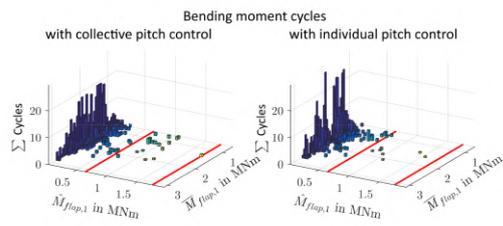


Abb. 70: Vergleich mittels Rainflow-Algorithmus klassifizierter Biegemomentlastzyklen mit und ohne Einzelblattverstellregelung

Fig. 70: Comparison of bending-moment load cycles with and without individual pitch control classified by rainflow algorithm

cause an underestimation of thermal power cyclings of the power electronic components in wind turbines. Nevertheless, according to the author's opinion, early converter failures in wind turbines cannot be explained by these underestimations alone.

Elektrisch erregte Synchronmaschinen für unterschiedliche Antriebskonzepte in Elektrofahrzeugen

von Dr.-Ing. Jonathan Jürgens

Im Unterschied zu Antriebssystemen mit Verbrennungsmotoren sind elektrische Antriebe u. a. deutlich kompakter, was neuartige Baukonzepte ermöglicht. So sind z. B. auch Radnabenantriebe ausführbar, die sich in der Dimensionierung deutlich von den Achsantrieben unterscheiden. Die Wahl des bestmöglichen Antriebssystems für die jeweilige Anwendung bzw. den jeweiligen Baukasten erfordert daher eine Bewertung der unterschiedlichen Antriebstopologien. Dafür ist eine komponentenübergreifende Optimierung des Antriebskonzepts unter Berücksichtigung der dimensionierungsrelevanten Wechselwirkungen notwendig. Die bereits in wissenschaftlichen Veröffentlichungen beschriebene Optimierung der Einzelkomponenten ist hierfür unzureichend.

In der Dissertation wird daher der Ansatz einer ganzheitlichen Antriebssystemdimensionierung beschrieben und untersucht. Am Beispiel der Anforderungen an ein Fahrzeug der oberen Mittelklasse werden drei Antriebskonzepte mit elektrisch erregten Synchronmaschinen (ESM) dimensioniert, von denen zwei Konzepte Achsantriebe mit unterschiedlichen Getriebeübersetzungen sind und ein Konzept vier Radnabenantriebe vorsieht. Diese Antriebstopologien werden hinsichtlich einiger für den Automotive-Bereich relevanter Eigenschaften untersucht, wie beispielsweise den benötigten Bauraum, den Energiebedarf im Fahrzyklus, die maximal erreichbare Kurzzeit- und Dauerleistung sowie das akustische Verhalten. Im Mittelpunkt der Dissertation steht die für die Bewertung erarbeitete Berechnungsmethodik. Sie umfasst neben der zeiteffizienten und präzisen elektromagnetischen Berechnung mittels numerisch und analytisch gekoppelter Berechnungsverfahren auch die thermische Modellierung auf Basis von Wärmequellennetzwerken sowie die Anbindung einer Berechnungsmethodik zur magnetischen Geräuschberechnung.

Die Anwendung dieser Berechnungsmethodik führt zu der Erkenntnis, dass der Achsantrieb mit der geringsten Getriebeübersetzung Vorteile bezüglich der maximal erreichbaren Dauerleistung hat sowie den geringsten Gesamtsystemenergiebedarf im Fahrzyklus aufweist. Das Konzept mit den vier Radnabenantrieben erweist sich insgesamt als unvorteilhaft, da es u. a. den geringsten Systemwirkungsgrad hat und zu den höchsten Schalldruckpegeln führt.

Electrically Excited Synchronous Machines for Different Drivetrain Topologies in Electrical Vehicles

by Dr.-Ing. Jonathan Jürgens

In contrast to conventional drivetrains with internal combustion engines, electrical drives are much more compact and, therefore, enable new drivetrain topologies. For example, it is possible to design wheel hub drives which require a considerably different dimensioning compared to axle drives.

Choosing the most suitable drive system for a particular application or modular system depends upon the assessment of the different drivetrain topologies. Thus, a cross-component optimization of the drive system is essential that takes into account the interdependent interactions relevant for dimensioning. Optimizing the components separately, what has been done in the majority of scientific publications so far, is therefore insufficient.

This dissertation describes and investigates a holistic approach for the dimensioning of electrical drivetrains. Based on the requirements of an upper middle class vehicle, three drive systems with electrically excited synchronous machines (ESM) are designed and examined. Two of them feature axle drives with different gear ratios whereas the third one uses a concept with four wheel hub drives.

These drivetrain topologies are evaluated with respect to automotive-relevant requirements, such as the installation space, the energy demand over a driving cycle, the peak power and the maximum continuous power as well as the acoustic behaviour. The developed methodology needed for this cross-domain evaluation is the centre of this dissertation. Besides the time-efficient and precise electromagnetic calculation by means of a coupled numerical and analytical analysis, it includes the thermal modelling of the electrical machines based on lumped-parameter thermal networks and the incorporation of a methodology for the calculation of magnetic noise.

The application of this methodology for comparing the three drivetrains shows that the axle drive with the lowest gear ratio has benefits with regard to the maximum continuous power and shows the lowest overall energy demand during a driving cycle. On the contrary, the wheel hub drive proves to be disadvantageous due to lowest system efficiency and comparatively highest sound pressure levels.

For the validation of the electromagnetic calculation, measurements are performed on a testbench with an ESM prototype. With an average error of less

Zur Überprüfung des elektromagnetischen Berechnungsverfahrens wird der Prototyp einer ESM messtechnisch validiert. Die Auswertung der Leerlauf- und Lastmessungen zeigt insgesamt eine mit mittleren Abweichungen von weniger als 3% hohe Übereinstimmung mit den Berechnungen und bestätigt den Nutzen der erarbeiteten Methodik.

than 3%, the measurements at no load as well as under load correspond well with the simulations, proving the benefit of the developed methodology.

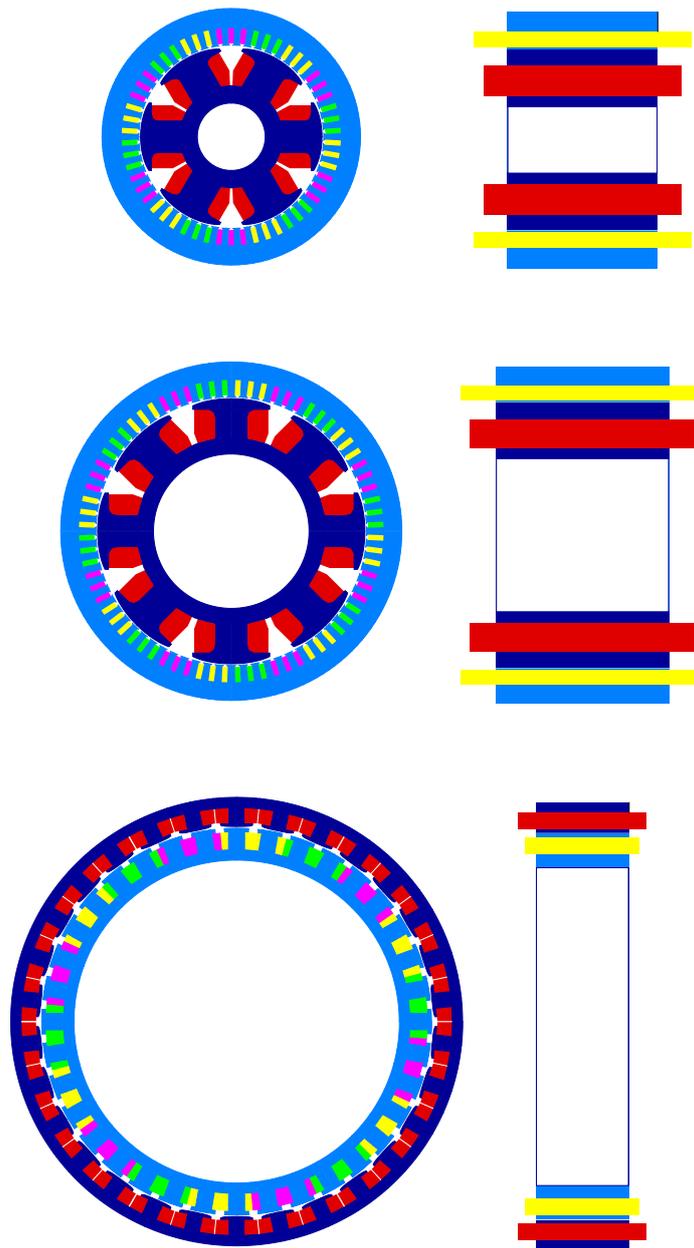


Abb. 72: Übersicht über die drei dimensionierten ESM für unterschiedliche Getriebeübersetzungen
Fig. 72: Overview of the three dimensioned ESM for different gear ratios

Wicklungskopflose Turbogeneratoren mit Mehrphasentransformatoren

von Dr.-Ing. Henrik Schroeder

Das Ziel dieser Arbeit ist die Erforschung eines Konzepts für zweipolige Turbogeneratoren, welches den komplexen Wicklungskopf durch einen Kurzschlussring ersetzt (siehe Abb. 73), um dessen axiale Ausladung und die Komplexität der notwendigen Stützkonstruktion zu reduzieren. Dies setzt allerdings eine deutlich höhere Strangzahl der Ständerwicklung voraus. Zur Verbindung eines wicklungskopfloser Turbogenerators mit dem Energieversorgungsnetz ist deshalb ein Mehrphasentransformator erforderlich, der den konventionellen Maschinentransformator ersetzt.

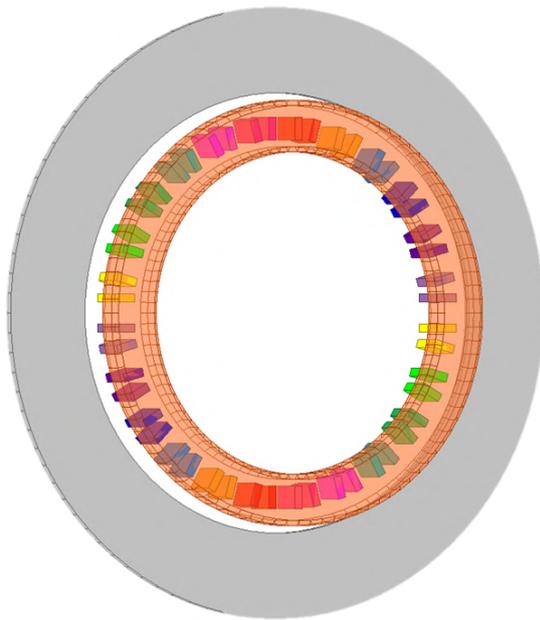


Abb. 73: Kurzschlussring
Fig. 73: Short-circuit ring

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Gestaltung derartiger Turbogeneratoren und dabei insbesondere ihres Kurzschlussrings und der Untersuchung des Betriebsverhaltens eines Gesamtsystems. Dazu wird beispielhaft ein wicklungskopfloser Turbogenerator unter Berücksichtigung der charakteristischen Merkmale des Konzepts dimensioniert und die Gestaltung einer Mehrphasentransformatorwicklung (siehe Abb. 74) erläutert. Für einen Kurzschlussring, der die Leiter der Ständerwicklung auf einer Seite des Beispielgenerators verbindet, werden verschiedene Gestaltungsvarianten erarbeitet und hinsichtlich der Stromwärmeverluste und des thermischen Verhaltens betrachtet.

Für die Untersuchung des elektrischen Betriebsverhaltens des Gesamtsystems werden die Strom- und

Turbogenerator Concept without Winding Overhang Using a Multiphase Transformer

by Dr.-Ing. Henrik Schroeder

In this work, a novel concept for two-pole turbogenerators is investigated, which replaces the complex end winding with a short-circuit ring (see Fig. 73) to reduce the axial length of the winding overhang and the complexity of the necessary support structure. As a consequence, this requires a significantly increased number of phases. Therefore, a multiphase transformer is required to connect the generator with the grid, which replaces the conventional machine transformer.

The focus of this work is on the design of such novel generators and their short-circuit ring in particular and on the investigation of the performance of the overall system. For this purpose, an example generator without winding overhang is dimensioned, taking into account the characteristic features of the concept, and the design of the multiphase transformer winding (see Fig. 74) is explained. For the short-circuit ring, which connects the bars of the stator winding on one side of the machine, various design variants are developed and examined with regard to the current copper losses and the thermal behaviour.

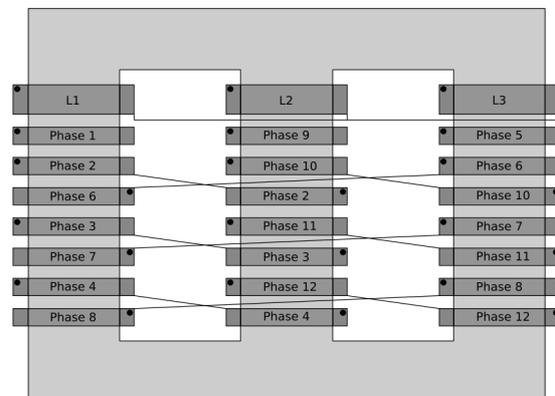


Abb. 74: Mehrphasentransformator
Fig. 74: Multiphase transformer

For the investigation of the electrical operating behaviour, the current- and the voltage-vs-time functions are determined in steady-state operation. Particular attention is paid to the interaction between the multiphase transformer and the generator as well as to the influence of design details of the transformer winding on the system behaviour. This is done by examining and comparing three types of windings with different numbers of turns. With the knowledge of the electrical operating behaviour, the losses of the example generator are determined. Furthermore, a suitability test of a cooling concept is done

die Spannungs-Zeit-Verläufe im stationären Betrieb ermittelt. Dabei wird insbesondere auf die Wechselwirkung des Mehrphasentransformators mit dem wicklungskopflosen Turbogenerator sowie auf den Einfluss der Mehrphasentransformatorwicklung auf das Systemverhalten eingegangen. Dies erfolgt durch die Untersuchung und die Gegenüberstellung von drei Wicklungsvarianten des Mehrphasentransformators mit unterschiedlichen Windungszahlen. Mit der Kenntnis des elektrischen Betriebsverhaltens werden die Verluste des Beispielgenerators ermittelt. Weiterhin erfolgt die Tauglichkeitsüberprüfung eines Kühlkonzepts anhand von Vorausberechnungen des thermischen Verhaltens. Deren Ergebnisse werden genutzt, um Maßnahmen zur Reduzierung der Temperaturen in einzelnen Teilbereichen der Maschine zu erarbeiten.

Aus den Untersuchungen des Betriebsverhaltens des Beispielsystems werden allgemeine Empfehlungen für die Gestaltung wicklungskopfloser Turbogeneratoren und der zugehörigen Mehrphasentransformatoren abgeleitet. Die Arbeit schließt mit Erläuterungen zu den Grenzen des Konzepts sowie zu dessen Skalierbarkeit ab.

based on the prediction of the thermal behaviour. The results are used to develop measures to reduce the temperatures of individual subareas of the machine.

Based on the investigations of the performance of the example system, recommendations for the general design of turbogenerators without end winding and a multiphase transformer are derived. The work concludes by explaining the limits of the concept and its scalability.

Untersuchungen zu Ausgangsfiltern in Siliziumcarbid-Antriebswechselrichtern

von Dr.-Ing. Jan-Kaspar Müller

Die stetig wachsende Verfügbarkeit von neuartigen Leistungshalbleitern aus Materialien mit einem großen Bandabstand ermöglicht den Aufbau von hochintegrierten und gleichzeitig effizienten Leistungselektroniken. Bedingt durch die deutliche Steigerung der Schaltgeschwindigkeit ergibt sich ein höheres Potenzial von leitungsgebundenen Störaussendungen, die mit weiteren Komponenten im Antriebsstrang wechselwirken. Vor diesem Hintergrund resultiert die Fragestellung, inwiefern und mit welchem zusätzlichen Aufwand in Form von Ausgangsfiltern die Vorteile der Halbleitertechnologie nutzbringend in Antriebswechselrichtern eingebracht werden können.

Nachdem die Grundlagen zur elektrischen und thermischen chipflächenskalierten Modellierung von Leistungshalbleitern beschrieben sind, werden die Gleich- und Gegentaktspannungen im Antriebssystem eingeführt. Darauf aufbauend werden die Auswirkungen der kurzen Schaltzeiten und potenziell höheren Schaltfrequenzen beim Einsatz von Siliziumcarbid-MOSFETs analysiert. Im Rahmen der Dimensionierung, des Aufbaus und der Charakterisierung eines du/dt -Filters sowie eines Sinusfilters werden deren Vor- und Nachteile herausgearbeitet. Um das Sinusfilter mit volumenreduzierten Filterinduktivitäten aufbauen zu können, wird eine hohe Schaltfrequenz von 140 kHz gewählt. Schaltversuche an einer Halbbrücke erlauben den Vergleich von Strommessverfahren mit einer niederinduktiven Rogowskispule sowie eines Koaxialshunts und ermöglichen eine Vorhersage der Schaltverlustenergien für die entwickelte Hardware bestehend aus der Kommutierungszelle und der Gate-Treiber. Die Beschreibung des luftgekühlten dreiphasigen Wechselrichterprototyps mit einer Nennleistung von 10 kW beinhaltet CFD-Simulationen zur thermischen Modellbildung. Mittels einer Frequenzbereichsanalyse der Gleichtaktimpedanzen werden die Ersatzschaltbildgrößen zur Beschreibung der leitungsgebundenen elektromagnetischen Störaussendung für das untersuchte elektrische Antriebssystem bestimmt. Die Rückwirkungen der Stromwelligkeit in der Filterinduktivität des Sinusfilters auf die Ein- und Ausschaltverlustenergien in den Halbleitern werden mit den Ausführungen zu weichen Schaltvorgängen herausgearbeitet. Die mögliche hohe Schaltfrequenz bei gleichzeitig steilen Schaltflanken kann in dem Zusammenspiel mit einem Sinus-Ausgangsfilter gewinnbringend in Antriebs-

Investigation on Output Filters in Silicon Carbide Based Motor Drive Inverters

by Dr.-Ing. Jan-Kaspar Müller

The increasing availability of wide bandgap based power semiconductors allows for highly efficient and integrated power electronic designs. Due to the low switching losses, the switching frequency can be extended by orders of magnitude. Nevertheless, the increased switching speed also raises concerns regarding the conducted emissions in a motor drive application and the interaction among the components. Therefore, the question arises how the new semiconductor technologies can be used beneficially in such an application, e.g. by introducing output motor filters.

After giving an overview of the scalable electrical and thermal semiconductor modelling, the common and differential mode voltages in a drive system are introduced. Subsequently, the potential effects of an increased switching speed and frequency on the conducted emission by using SiC-MOSFETs are highlighted. Next, the sizing and characterization of a dv/dt and sine-wave output filter are carried out and the specific properties are compared. To take advantage of the inductor volume reduction effect for the sine-wave filter, a high switching frequency of 140 kHz was selected. Preliminary detailed double pulse tests based on a half bridge configuration with the self-designed commutation cell and gate driver are used to derive the switching loss energies. Furthermore, the setup allows the comparison of different current-sensing techniques with a non-intrusive Rogowski coil as well as a coaxial shunt with a high bandwidth. Hereinafter, the development of the laboratory three-phase inverter prototype with a rated power of 10 kW is described while focussing on the thermal modelling of the air-cooled system based on CFD simulations. A frequency domain analysis of the common mode impedance for each component is used for the prediction of the conducted emissions in the motor drive. As the volume-optimized sine-wave filter inductor exhibits a large current ripple, the retroactive effects on the turn-on and turn-off losses are examined by considering soft-switching effects. Applying a sine-wave output filter to a SiC inverter offers the beneficial possibility of an increased switching frequency and speed also in motor drive applications. This is accomplished through a significant reduction of the conducted emissions and the interactions among the SiC inverter and the load while ensuring a compact filter stage and a high efficiency. Last, the required chip area for both filters is evaluated.

systemen umgesetzt werden. Neben einer durchaus kompakten Filterstufe werden auch bereits die gestiegenen Anforderungen bezüglich der elektromagnetischen Verträglichkeit berücksichtigt und die Wechselwirkungen mit der angeschlossenen Last signifikant reduziert bei gleichzeitig hohen Systemwirkungsgraden. Zuletzt erfolgt die Bestimmung des Chipflächenbedarfs der Leistungshalbleiter für die beiden untersuchten Ausgangsfilter.

Die hohe Genauigkeit der beschriebenen Modelle wird anhand von Messungen der Verlustleistung am aufgebauten Demonstrator bestätigt und demonstriert. Weitere zentrale Beiträge dieser Arbeit dienen der Untersuchung der Genauigkeit von konventionellen Messmethoden zur Beschreibung der Wechselwirkungen von SiC-Halbleitern in Antriebssystemen.



Abb. 75: Luftgekühlter SiC-Wechselrichter mit integriertem du/dt -Ausgangsfilter an der Seite des Kühlkörpers
Fig. 75: SiC inverter design with forced convection and dv/dt filter mounted on the side of the heat sink

By characterizing the laboratory prototype with a power analyzer, the high accuracy of the power loss modelling is evaluated and the functionality is demonstrated. Beyond that, major contributions of this work focus on the limitations of conventional measurement methods to characterize the effects of SiC power transistors in motor drive systems.

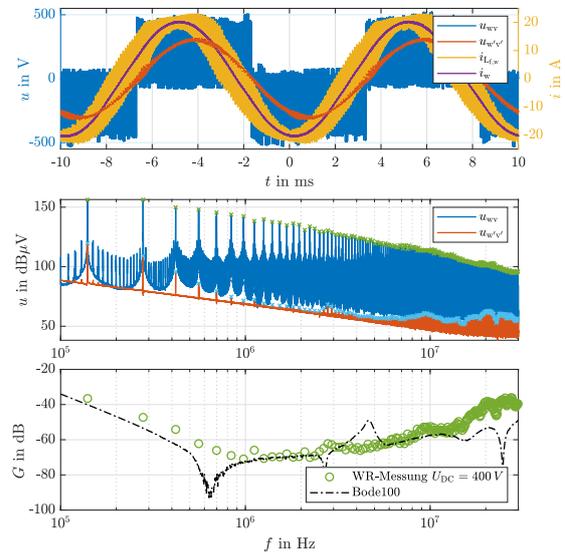


Abb. 76: Gegentakt-Spannungsspektren am Ein- und Ausgang der Sinusfilterstufe
Fig. 76: Differential mode voltage spectra on the sine-wave filter input and output side

Das Institut | The Institute

Mitarbeitende des IAL

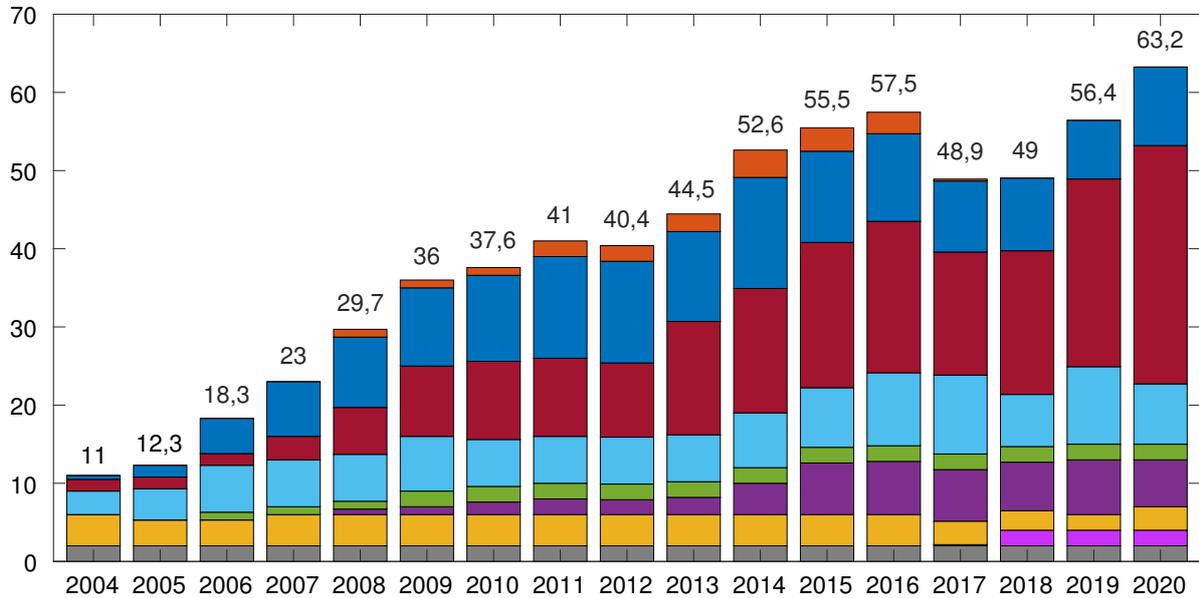
Auf den folgenden Seiten präsentieren sich die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des IAL, die zum Jahreswechsel 2020/2021 zum Team gehörten. Diejenigen, die zu Beginn des Jahres 2019 noch am IAL waren, aber uns bis zum Ende des Jahres 2020 bereits verlassen haben, sind separat aufgeführt. Die Anzahl der wissenschaftlichen Mitarbeiter konnte, vor allem dank erfolgreicher Projekteinwerbungen unserer Juniorprofessoren, gegen über dem zuvor schon hohen Niveau noch etwas erhöht werden, was sich naturgemäß auch bei der Anzahl der Zu- und Abgänge bemerkbar macht. Verlassen haben uns Frau Korolova und Frau Zulk sowie die Herren John, Kučka, Lücke, Müller, Narjes, Raziee, Redlich, Rehfeldt, Sommer, Vip und Wohlers. Dem stehen als Neuzugänge gegenüber Frau Dierks, Ebersberger, Frey und Wankhede und die Herren Apte, de Barros, Cao, Dittmann, Fröhling, Henkenjohann, Himker, Jünemann, Keuter, Kostka, Lorenz, Nörenberg, Schepe, Schubert, Suchan, Strunk, Tatusch, Wenzel, Zhang und Zhu. Unter den Mitarbeiterinnen im Geschäftszimmer und den technischen Mitarbeitern in unserer Werkstatt gab es erfreulicherweise keine Veränderungen, so dass wir weiter auf ein bewährtes und außerordentlich leistungsstarkes Team zählen können. Besondere Erwähnung verdient, dass sich Herr Rudolph mit großem persönlichen Engagement und trotz der coronabedingt schwierigen Randbedingungen zum Industriemeister weiterqualifiziert und die Meisterprüfung im Oktober 2020 erfolgreich absolviert hat – wir gratulieren! Da unserer Administrator Herr Lippert schon seit drei Jahren parallel zu seiner Tätigkeit am IAL ein Studium zum Berufsschullehrer absolviert und uns im Jahr 2021 verlassen wird, haben wir mit Herrn Lomis einen Nachfolger für diese zentrale Position gewinnen können und bereits im Dezember 2020 eingestellt, um eine gute Einarbeitung und eine reibungsarme Überleitung der Aufgaben sicherzustellen. Mit Herrn Dr. Dotz konnten wir zum Sommersemester einen neuen Lehrbeauftragten gewinnen, der eine englischsprachige Spezialvorlesung zu elektrischen Maschinen für unsere englischsprachigen Masterstudiengänge beisteuert. Eine weitere Änderung steht im Jahr 2020 an, da Herr Dr. Möller auf eigenen Wunsch im Sommersemester 2020 letztmalig seine beliebte Vorlesung zu elektrischen Bahnen und Fahrzeugantrieben gehalten hat. Wir freuen uns, mit Herrn Dr. Germishuizen aus dem Nürnberger Maschinen- und Apparatewerk der Siemens AG eine kompetente Persönlichkeit gefunden zu haben, die den diese Vorlesung ab dem Sommersemester 2021 weiterführen wird. An dieser Stelle

IAL Staff

The following pages present the IAL staff members who were part of the team at the turn of the year 2020/2021. Those who were still with the IAL at the beginning of 2019 but already left us by the end of 2020 are listed separately. The number of scientific staff could be still increased compared to the existing high level, mainly thanks to successful project acquisitions by our junior professors, which is reflected by the number of new researchers and those leaving the institute. Mrs Korolova and Mrs Zulk as well as Mr John, Mr Kučka, Mr Lücke, Mr Müller, Mr Narjes, Mr Raziee, Mr Redlich, Mr Rehfeldt, Mr Sommer, Mr Vip and Mr Wohlers left the team. New team members are Mrs Dierks, Ebersberger, Frey and Wankhede and Mr Apte, de Barros, Cao, Dittmann, Fröhling, Henkenjohann, Himker, Jünemann, Keuter, Kostka, Lorenz, Nörenberg, Schepe, Schubert, Suchan, Strunk, Tatusch, Wenzel, Zhang and Zhu. Fortunately, we had no changes among the employees in the office and the technical staff in our workshop, so that we can further count on a proven and extraordinarily efficient team in the future. Special mention should be made of Mr. Rudolph's great personal commitment to his further qualification as an Industriemeister (industrial master craftsman), despite the difficult conditions caused by Corona, and his successful completion of the Meisterprüfung (master craftsman's examination) in October 2020 - many congratulations! Since our administrator Mr Lippert pursued his studies to become a vocational school teacher during the last three years in parallel to his work at the IAL and his leave is scheduled for 2021, we had to find a successor for this central position. Already in December 2020, we could luckily hire Mr Lomis, enabling a good onboarding and a smooth transition of tasks. With Dr Dotz, we were able to win a new lecturer for the summer term, who will give a special course in English on electrical machines for our English-language Master's degree programmes. Another change was due in 2020, as Dr Möller decided to hold his popular lecture on electric traction and vehicle drives for the last time in the 2020 summer term. We are pleased to have won Dr Germishuizen from the Nürnberger Maschinen- und Apparatewerk of Siemens AG as a competent partner to continue this lecture, beginning in the summer term of 2021. At this point, we would like to express our deepest gratitude to all former and current staff members for their many years of participation and the high level of professionalism and visibility we have achieved at all levels.

gilt allen ehemaligen und aktuellen Mitarbeitern unserer herzlichster Dank für ihre langjährige Mitwirkung und die hohe Professionalität und Sichtbarkeit, die wir auf allen Ebenen erreicht haben.

Mitarbeitendenstatistik | Numbers of Employees



- Professoren | Professors
- Juniorprofessoren | Junior professors
- MTV aus Landesstellen | Publicly funded tech./admin. staff
- MTV aus Drittmitteln | Third-party funded tech./admin. staff
- Oberingenieure | Senior engineers
- WM aus Landesstellen | Publicly funded researchers
- WM aus Drittmitteln (DFG, BMBF, etc.) | Third-party funded researchers (DFG, BMBF, etc.)
- WM aus Drittmitteln (Industrie) | Third-party funded researchers (industry)
- Stipendiaten | Scholarships

Prof. Dr.-Ing. Axel Mertens

Welfengarten 1
30167 Hanover, 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, Borchers-Plakette, Friedrich-Wilhelm-Preis
- 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 large of IEEE Power Electronics Society Administrative Committee
- Board Member of the Leibniz Research Centre "Energy 2050 – Transformation of the Energy System" founded at Leibniz Universität Hannover
- Associate Editor of the journal "IEEE Transactions on Power Electronics"
- Member of the Executive Council and the International Scientific Committee of the EPE Association
- Advisor for Department "Power Electronics and Device Technology" within Fraunhofer Institute for Wind Energy and Energy System Technology (IWES), until 2020
- Advisor for Department "Electric Components and Systems" within Fraunhofer Institute for Manufacturing Technology and Applied Materials Research (IFAM), until 2017
- Board Member of Energy Research Centre Lower Saxony (EFZN), until 2016
- Dean of the Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Leibniz Universität Hannover, until 2015
- 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 Hanover, 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
- 2017 IEC 1906 Award

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"
- Since 2019 member of Working Group 31 and Project Leader for international standardization of efficiency classes for high voltage induction motors
- 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 University 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 IEE
- Since 2010 board member of the Lower Saxony Research Centre for Vehicle Technology (NFF)
- 2007-2020 board member of the Hannover Centre for Mechatronics (MZH)
- 2012-2020 elected member of the German Research Foundation (DFG) Review Board 408 "Electrical Engineering"

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

Welfengarten 1
30167 Hanover, Germany

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



Curriculum Vitae

- 1990 - 2002 School: Uninterrupted best of year
- 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 - Best of year
- 2009 - 2013 PhD in Electrical Engineering at the University of Stuttgart, Germany - Full scholarship
- 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
- 2017 Appointed and senior expert for drive systems for excellent research at IPA
- 2020 Positive evaluation of research and teaching activities as Jun.-Prof. as proof of the ability to hold a full professorship (W3)

Further Activities

- Analytical and numerical modelling of synchronous machine
- Generator-inverter interactions (bearing current, additional losses)
- Design of automated calculation tools for electrical machines
- Intelligent optimization algorithms for the design of highly efficient electrical machinery
- Multi-domain modelling of wind and hydrogenerators
- Wearable robotic and actively powered exoskeletons for industrial and medical applications
- Co-founder and appointed member of European research committee on wind drive systems
- Elected member of the German American Frontiers of Engineering 2019
- Member of the EPE ECCE 2022 Local Organizing Committee
- Member of European Educational Research Association
- Academic director of Etech-Akademie
- Reviewer of IEEE Transactions on Industrial Electronics, Journal of Energy Efficiency, Journal of Wearable Technologies, Archives of Electrical Engineering, EuroTech postdoc program
- Elected Chair of IEEE International Conference on Industrial Electronics, Energy Efficiency in Motor Driven Systems, IEEE Southern Power Electronics Conference
- Nominated for the Prize for Excellent Teaching 2019

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

Welfengarten 1
30167 Hanover, 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. Best of year with one semester reduced length of study.
- 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 (summa cum laude)
- 2018 Appointed Junior Professor of Passive Components for Power Electronics at Leibniz Universität Hannover
- 2020 Positive evaluation of research and teaching activities as Jun.-Prof. as proof of the ability to hold a full professorship (W3).

Further Activities

- Magnetic components
- Power electronics packaging
- Capacitors
- Power converters with WBG semiconductors, especially GaN
- Filter design for grid-tied inverters and drive systems
- Faculty Advisor of the LUH student teams of IEEE IFEC'19, '20, '21/22. Finalist Award IFEC'19, Certificate of Excellence IFEC'20
- Acquisition of approx. 1Mio € third-party funds per year for the LUH (2018-2020), approx. 0.5Mio € per year for the own research group.
- Elected deputy as Principal Investigator of the "Qualification and Equal Opportunity Committee" of the DFG Cluster of Excellence "Sustainable and Energy Efficient Aviation"
- Elected member of the EPE ECCE Europe International Scientific Committee
- Member of the EPE ECCE 2022 Local Organizing Committee and Young Professional Chair
- Reviewer of IEEE Transactions on Power Electronics, IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, EPE – IEEE ECCE Europe Series, IPEMC – IEEE ECCE Asia

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

Professoren i.R. | Retired Professors



em. Prof. Dr.-Ing.
H. O. Seinsch



Prof. i.R. Dr.-Ing.
H.-D. Stölting



Prof. i.R. Dr.-Ing.
Johannes Nestler

Gastdozenten | External Lecturers



Dr.-Ing.
Boris Dotz



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



Dr.-Ing.
Georg Möller

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 ET
Jörg-Uwe Hammer



Dipl.-Ing. (FH)
Clemens Larivière



Fachinformatiker
Hanno Lippert



Fachinformatiker
Spiridon Lomis



Industriemeister
Sebastian Rudolph



Industriemeister
Carsten Selke

Wissenschaftliches Mitarbeiterteam | Team of Research Associates



M.Sc.
Mohammad Ali



M.Sc.
Jan Andresen



M.Sc.
Pramod Apte



M.Sc.
Bakr Bagaber



M.Sc.
Björn Berweiler



M.Sc.
Maximilian Bieber



M.Sc.
Tobias Brinker



M.Sc.
Yongtao Cao



M.Sc.
Allan de Barros



M.Sc.
Rebecca Dierks



M.Sc.
Jochen Dittmann



M.Sc.
Marc Dokus



M.Sc.
Janine Ebersberger



M.Sc.
Marc England



M.Sc.
Leon Fauth



M.Sc.
Pauline Frey



M.Sc.
Torben Fricke



M.Sc.
Sören Fröhling



M.Sc.
Martin Gerlach



M.Sc.
Elmar Haschen



M.Sc.
Daniel Heide



M.Sc.
Jonas Henkenjohann



M.Sc.
Daniel Herwig



M.Sc.
Niklas Himker



M.Sc.
Alexander Hoffmann



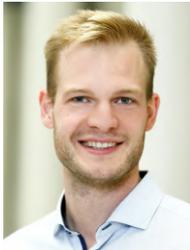
M.Sc.
Max Hullmann



M.Sc.
Lennart Jünemann



M.Sc.
Matthias Kalla



M.Sc.
Ralf Keuter



M.Sc.
Benjamin Knebusch



M.Sc.
Benedikt Rafael Kostka



M.Sc.
Jan Königsberg



M.Sc.
Siqi Lin



M.Sc.
Georg Lindemann



M.Sc.
Malte Lorenz



M.Sc.
Mina Mirzadeh



M.Sc.
Hedieh Movagharnjad



M.Sc.
Christian Nörenberg



M.Sc.
Dominik Reitmeier



M.Sc.
Constantin Schepe



M.Sc.
Marius Schubert



M.Sc.
Frederik Stallmann



M.Sc.
Jan-Ole Stockbrügger



M.Sc.
Robin Strunk



M.Sc.
Anton Suchan



M.Sc.
David Tatusch



M.Sc.
Stefan Urbanek



M.Sc.
Yugandhara Wankhede



M.Sc.
Johannes C. Wenzel



M.Eng.
Julius Wiesemann



M.Sc.
Dapu Zhang



M.Sc.
Xi Zhu

Ehemalige Mitarbeitende, Doktoranden und Dozenten Former Staff Members, PhDs and Lecturers



Dr.-Ing.
Malte John



M.Sc.
Olga Korolova



Dr.-Ing.
Jakub Kucka



M.Sc.
Stefan Lücke



Dr.-Ing.
Jan-Kaspar Müller



Dipl.-Ing.
Gerrit Narjes



M.Sc.
Morteza Raziee



M.Sc.
Jürgen Redlich



Dr.-Ing.
Alexander Rehfeldt



Dr.-Ing.
Volker Schöber



M.Sc.
Christian Sommer



M.Sc.
Stephan Vip



M.Sc.
Constantin Wohlers



Dipl.-Ing.
Silvia Zulk

Chronik 2019/20 | Chronicle 2019/20

2019

Januar 2019

01.01. Rebecca Dierks und Niklas Himker beginnen als Assistentin und Assistent am IAL.

17.-20.01. Teambildungs-/Strategieworkshop in Marianska (Erzgebirge), Erholungsheim der Tschechischen Akademie der Wissenschaften Prag



18.01. Vorträge von Silvia Zulk und Mohammad Ali auf dem LE-Nord-Kolloquium in Magdeburg

23.-24.01. Prof. Ponick und Marc England halten auf der Fachkonferenz OVE MoreDrive 2019 den Vortrag "Automatisierter Entwurf von Haarnadelwicklungen anhand von tabellarischen Belegungsplänen" in Wien, Österreich.

31.01. Letzter Arbeitstag von Malte John und Feuerzangenbowle für Hiwis und Studenten

Februar 2019

01.02. Ralf Keuter beginnt als Assistent am IAL.

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

06.02. Jun.-Prof. Ebrahimi organisiert eine Schulung zum Leiterplattenentwurf von Firma Zucken.

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



19.02. Jun.-Prof. Friebe hält den Vortrag "Freiheitsgrade und Forschungsaspekte in der Elektrifizierung von Flugzeugen" auf dem EFZN-Forschungstag.

25.02. Vortrag von Dr. Kai Brune von der Firma Audi im Rahmen des IAL-Kolloquiums

März 2019

14.03. Doktorprüfung von Malte John

15.-21.03. Tobias Brinker und drei Studenten nehmen an der zweiten Runde des IEEE Wettbewerbs International Future Energy Challenge 2019 während der APEC im Anaheim Convention Center, Los Angeles, USA teil.



27.03. Vortrag von Jun.-Prof. Friebe, *Spannungsbelastung magnetischer Bauelemente durch WBG-Leistungshalbleiter*, auf der ZVEI Jahrestagung 2019 der Fachverbände Transformatoren & Stromversorgungen sowie Electrical Winding & Insulation Systems

28.-29.03. Prof. Ponick leitet die Halbjahressitzung des DKE K311 in Dresden.

31.03. Letzter Arbeitstag von Olga Korolova und Christian Sommer

April 2019

01.-02.04. Institutsworkshop in Wöltingerode



01.04. Dapu Zhang beginnt als Assistent am IAL.

04.-05.04. Prof. Ponick und Prof. Mertens halten ein HdT-Seminar zu Wechselwirkungen zwischen Motor und Frequenzumrichter in München.

10.04. Prof. Ponick leitet die Sitzung von IEC TC2 WG12 in Frankfurt

11.04. Doktorprüfung von Tobias Krone

18.04. Doktorprüfung von Johannes Heseding

24.04. Institutsführung und Themenfrühstück für herausragende Studierende

25.04. Institutsbowling

29.04. Vortrag von Dr. Stijn Stevens von der Firma skytron energy GmbH im Rahmen des IAL-Kolloquiums

30.04. Letzter Arbeitstag von Silvia Zulk

Mai 2019

01.05. Anton Suchan beginnt als Assistent am IAL.

02.05. Prof. Ponick beteiligt sich an einer Podiumsdiskussion der Fridays for Future-Initiative im Kali-Chemie-Hörsaal.



07.-09.05. Teilnahme von Jun.-Prof. Friebe und Prof. Mertens, von Siqi Lin und Julius Wiesemann mit Posterbeiträgen und Silvia Zulk mit einem Vortrag auf der PCIM in Nürnberg.

10.05. Niklas Himker wird für seine Masterarbeit mit dem Studienpreis der SEW-EURODRIVE-Stiftung in Bruchsal ausgezeichnet.



12.-15.05. Posterbeiträge von Torben Fricke, Alexander Rehfeldt, Stefan Urbanek und Stefan Udem (HS) auf der IEMDC-Konferenz 2019 in San Diego, USA

12.-22.05. Besuch im Rahmen des CAPSTONE-Projekts von amerikanischen Studenten von der Purdue Universität und der UTEC aus Lima in Peru unter der Betreuung von Stephan Vip und Dominik Reitmeier am IAL

13.05. Vortrag von Herrn Marek Rylko von der Firma SMA Magnetics Sp., Polen, im Rahmen des IAL-Kolloquiums

14.05. Doktorprüfung von Jakub Kučka

17.05. Prof. Ponick nimmt an der Sitzung des International Advisory Board des Instituts für Thermomechanik der Tschechischen Akademie der Wissenschaften in Prag teil.

20.-24.05. Rebecca Dierks und Leon Fauth nehmen mit Posterbeiträgen an der ECPE European PhD-School in Gaeta, Italien, teil.

24.-30.05. Teilnahme von Prof. Mertens am German-Korean Power Electronics Symposium in Seoul und an der IEEE ECCE Asia 2019 in Busan, Südkorea

Juni 2019

03.-06.06. Marc Dokus hält einen Vortrag auf der PEDG 2019 in Xian, Shaanxi, China.

03.06. Vortrag von Herrn Gerd Neeser von der Firma VfdConsult im Rahmen des IAL-Kolloquiums

04.06. Doktorprüfung von Michael Hackbart

04.06. Hiwi-Grillen

05.06. Hochschulsportfest mit Teilnahme des Immer-Am-Limit-Fußballteams des IAL

06.06. Vortrag von Herrn Dr. Lennart Baruschka von der Firma Siemens, China, im Rahmen des IAL-Kolloquiums



Power electronics as an enabling technology

- Powering most of our modern devices, they are a key to our modern lifestyle
- New technologies like GaN and SiC lead to even higher efficiencies but also bring new challenges
- How intelligent solutions in digitalization change the way we do business

Working in Beijing – an expat's story

- From a start-up to Siemens and with Siemens to China
- Studying abroad – the Tsinghua-Siemens PhD program
- Research and career opportunities in Siemens China
- A fresh expat's experience living in Beijing



Where and when?

Room H121
11.00 a.m.
Thursday, June 6th 2019

Speaker info

Dr.-Ing. Lennart Baruschka
Since 09/2018 with
Siemens Ltd. China, Beijing

Head of Research Group
Power Electronics & Control



Unrestricted © Siemens Ltd. China 2019

10.-12.06. Auf der AST 2019, St. Petersburg, Russland, wird ein Paper mit Co-Autor Alexander Hoffmann präsentiert.

11.-12.06. Prof. Mertens und Prof. Ponick schulen Mitarbeiter des internationalen Patentamts in Den Haag zur elektrischen Antriebstechnik.

11.-13.06. Pfingstexkursion nach Süddeutschland zu den Firmen Siemens in Nürnberg, Wittenstein in Igersheim und Hofer Powertrain GmbH in Würzburg mit den Juniorprofessoren Ebrahimi und Friebe



12.-14.06. Jun.-Prof. Friebe nimmt an dem 28th IEEE International Symposium on Industrial Electronics in Vancouver, Canada, mit der Präsentation eines Papers und der Leitung der Session teil.

17.-20.06. Auf der International Wind Energy Science Conference (WESC) 2019 in Cork, Ireland, hält Jun.-Prof. Ebrahimi einen Vortrag.

20.06. Vortrag von Charles Sullivan (IEEE Fellow), New Hampshire, USA, im Rahmen des IAL-Kolloquiums



25.-29.06. Teilnahme und Vortrag von Prof. Mertens bei der FEPPCON X Future of Electronic Power Processing and Conversion (IEEE PELS) in Tromsø, Norwegen.

28.06. Max Hullmann erhält für seine Masterarbeit in Heidenheim den Hanns-Voith-Stiftungspreis im Bereich Wasserkraft.



29.06. Die IAL-Band tritt auf einer Veranstaltung des SC Germania List auf.



30.06. Letzter Arbeitstag von Gerrit Narjes

Juli 2019

04.07. Sommerfest der LUH

11.07. Jun.-Prof. Ebrahimi und Jürgen Redlich halten bei der Etech-Akademie das Online-Seminar "Entwurf elektrischer Maschinen für Elektrofahrzeuge".

12.-23.07. Gastaufenthalt und Vorträge von Prof. Mertens an der University of Chile in Santiago (Prof. Patricio Mendoza)

28.-31.07. Teilnahme am Finale des IEEE-Wettbewerbs International Future Energy Challenge

120

2019 in Madison von Tobias Brinker und den Studenten Hauke Heeren und Felix Willer und dem Erreichen des 5. Platzes von 27 teilnehmenden Teams



August 2019

01.08. Yugandhara Wankhede und Malte Lorenz beginnen als Assistentin und Assistent am IAL.

01.08. Jarren Lange von der University of the Witwatersrand in Johannesburg, Südafrika, kommt als Gastwissenschaftler für drei Monate ans IAL.

01.08. IAL-Betriebsausflug mit Wanderung des Geokurses und Bosseln von Bennemühlen bis Bisendorf zum Grill-Ausklang bei Prof. Mertens



20.08. John Hayes (University College Cork, vormals GE, Mitarbeit am EV1, Autor des Buches *Electric Powertrain*) hält ein dreistündiges Seminar für Mitarbeiter, Studierende und Industriepartner des IAL.



27.-29.08. Jan Andresen, Torben Fricke, Stephan Vip und Matthias Kalla nehmen an der AEGEAN Conference on Electrical Machines and Power Electronics in Istanbul, Türkei, teil.



31.08. Letzter Arbeitstag des FWJlers Linus Götte

September 2019

01.09. Yongtao Cao beginnt als Assistent am IAL.

02.09. 6-wöchiger Besuch des Gastwissenschaftlers Prof. Patricio Mendoza Araya von der Universität Santiago de Chile

03.-05.09. Eine Abordnung des IAL mit Prof. Mertens und Jun.-Prof. Friebe sowie Rebecca Dierks, Tobias Brinker, Leon Fauth, Jakub Kučka, Siqi Lin, Ass. Prof. Mendoza nimmt mit Vorträgen und Sitzungsleitungen an der Konferenz EPE 2019 - ECCE Europe in Genova teil.



04.-05.09. Vorstellung des Institutes und der Projekte auf dem E-MOTIVE Expertenforum in Schweinfurt von Alexander Hoffmann

04.09. Prof. Mertens wird in das Executive Council der EPE Association gewählt.

09.-10.09. Prof. Mertens nimmt mit Niklas Himker und Georg Lindemann mit Vorträgen an der IEEE SLED 2019 in Turin, Italien, teil.

10.-11.09. Prof. Ponick hat die Sitzungsleitung bei der IKMT in Würzburg und Alexander Hoffman nimmt mit einem Paper teil.

17.-19.09. Jun.-Prof. Ebrahimi, Max Hullmann, Alexander Hoffmann, Mina Mirzadeh, Jürgen Redlich, Alexander Rehfeldt nehmen an der EEMODS Konferenz in Tokyo, Japan teil.

18.-19.09. Prof. Ponick hält einen Vortrag auf dem Technischen Tag der VEM in Wernigerode.

26.-27.09. Prof. Ponick leitet die Halbjahressitzung des DKE K311 in Amberg.

29.09.-03.10. Prof. Mertens und Jan Müller nehmen mit Vortrag an der IEEE-ECCE Konferenz (11th Energy Conversion Congress & Expo) in Baltimore teil. Teilnahme von Prof. Mertens am Adcom Meeting der IEEE PELS.



Oktober 2019

07.10. Doktorprüfung von Fabian Oelkers

09.10. Vortrag zu Microgrids in Chile von Assistant Prof. Patricio Mendoza-Araya, University of Chile, im LIFE2050



10.10. Besuch von Prof. Mertens an der Univ. of Eindhoven, NL, Prof. Lomonova, als Opponent einer Doktorprüfung

17.10. Teilnahme von Prof. Ponick, Martin Gerlach, Alexander Hoffmann, Georg Lindemann, Dr. Rober Meyer, Dominik Reitmeier und Julius Wiesemann beim e-Mobility-Treffen in Mannheim



17.10. Prof. Zadeh von der NTNU Trondheim, Norwegen, besucht Jun.-Prof. Ebrahimi und das IAL.

22.-23.10. Jun.-Prof. Ebrahimi nimmt in Berlin am VDI CIGRE Symposium und der EXO-Konferenz teil.

24.-25.10. Prof. Mertens und Prof. Ponick halten ein HdT-Seminar zu Grundlagen elektrischer Antriebe in München.

28.10.-05.11. Jun.-Prof. Friebe besucht im Rahmen der Erasmus-Kooperation mit der LUH die Toosi Universität in Teheran und hält dort eine viertägige Vortragsreihe.



November 2019

01.11. Jochen Dittmann und Robin Strunk beginnen als Assistenten am IAL.

05.11. Prof. Mertens hält einen Vortrag auf der FVA-Info-Tagung in Würzburg.

07.-08.11. Prof. Mertens leitet ein HdT-Seminar zu Leistungselektronik in Kraftfahrzeugen in Hannover mit einem Beitrag u. a. von Prof. Ponick.

11.-12.11. Teilnahme von Prof. Ponick und Prof. Mertens am Strategieworkshop des Niedersächsischen Forschungszentrums für Fahrzeugtechnik in Wöltingerode.

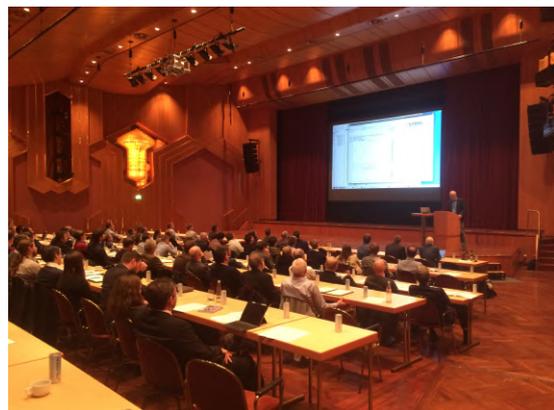
14.-15.11. Prof. Ponick und Prof. Mertens halten ein HdT-Seminar zu Wechselwirkungen zwischen Motor und Frequenzumrichter in Essen.

15.11. Benedikt Kostka beginnt als Assistent am IAL.

18.11. Vortrag von Dr. Timur Werner hält im Rahmen des IAL-Kolloquiums

19.11. Jun.-Prof. Ebrahimi nimmt an der Exo Konferenz in Stuttgart teil.

20.-21.11. Austausch mit ca. 140 Fachkollegen aus Forschung und Industrie beim FEMAG-Anwendertreffen im Bürgerzentrum in Bruchsal mit Vorträgen von Dr. Steinbrink, Prof. Ponick u.a.



27.-28.11. Prof. Ponick leitet die Sitzung von IEC TC2 WG12 in London und stellt auf der Sitzung von WG31 einen neuen Normentwurf für Wirkungsgradklassen für Hochspannungsmotoren vor.

Dezember 2019

01.-04.12. Jun.-Prof. Friebe hält einen Vortrag auf der COBEP 2019 SPEC in Santos, Brasilien.

01.12. Janine Ebersberger und Johannes Wenzel beginnen als Assistentin und Assistent am IAL.

04.12. Bakr Bagaber und Matthias Kalla besuchen die FVA Infotagung in Würzburg.

06.12. Prof. Ponick überreicht als Studiendekan den Absolventen auf dem Tag der Fakultät ihre Abschlusszeugnisse. *Fotos: Julian Martitz*



09.12. Prof. Mertens und Prof. Ponick halten eingeladene Vorträge auf dem Einführungstag des CTI-Symposiums in Berlin.

13.12. Jun.-Prof. Friebe hält einen Vortrag an der Universität Chile im Rahmen eines Seminars zu Erneuerbaren Energien.

16.12. Besuch von Prof. W. Cronje von der Witwatersrand University, Johannesburg, am IAL

17.-18.12. Abschluss Symposium des DFG-Sonderforschungsbereichs 880 zum Hochauftrieb künftiger Verkehrsflugzeuge in Braunschweig mit Teilnahme von Matthias Kalla und Jan Müller

19.12. Doktorprüfung von Florian Boseniuk

20.12. Internationales Jahresabschlusskolloquium



31.12. Letzter Arbeitstag von Jakub Kučka und Stefan Lücke

2020

Januar 2020

01.01. Christian Nörenberg, Constantin Schepe und David Tatusch beginnen als Assistenten am IAL.

07.01. Die Jun.-Prof. Ebrahimi und Friebe stellen im Rahmen der Ringvorlesungen ihre Forschungsgebiete vor.

09.-12.01. Teambildungs-/Strategieworkshop in Marianska (Erzgebirge), Erholungsheim der Tschechischen Akademie der Wissenschaften Prag



16.01. Doktorprüfung von Marcel Moriße

23.01. Hiwi-Feuerzangenbowle



27.01. Vortrag von Prof. Mertens an der Univ. of Aalborg, Prof. Blaabjerg, und Opponent einer Doktorprüfung

29.-31.01. Prof. Ponick hält einen eingeladenen Vortrag zur Zukunft der elektrischen Antriebstechnik an der ETH Zürich im Rahmen eines Workshops.

31.01. Letzter Arbeitstag von Jan-Kaspar Müller

Februar 2020

03.02. Jun.-Prof. Friebe nimmt virtuell als Externer Gutachter an der PhD-Defense von Robert T. Ryan, University of Cork, Ireland, teil.



10.02. Herr Ulbrich vom VEM Sachsenwerk hält einen Vortrag im Rahmen des IAL Kolloquiums.

20.-21.02. Fakultätsklausurtagung in Bad Nenndorf

26.02. Ehrung der in die Dean's List aufgenommenen Studierenden aus Elektrotechnik, Energietechnik und Mechatronik durch Prof. Ponick

März 2020

02.03. Prof. Mertens besucht auf Einladung von Prof. Djujic das EPFL in Lausanne (die neue Wirkungsstätte von Jakub Kucka) als Opponent einer Promotionsprüfung

11.03. Jun.-Prof. Ebrahimi gibt eine Führung im GeCoLab und Testzentrum im Rahmen eines Treffens des VDE ETG FB A1.

13.03. Das Präsidium der LUH verschiebt den Semesterstart auf den 20.04.

16.03. Lockdown - offizieller Notfallbetrieb

26.03. Prof. Ponick leitet die Halbjahressitzung des DKE K311, die erstmals als Web-Meeting stattfindet.

31.03. Letzter Arbeitstag von Morteza Raziee

April 2020

01.04. Maximilian Bieber beginnt als Assistent am IAL.

20.04. Start der Vorlesungszeit im Onlinesemester

23.04. Tobias Brinker und drei Studenten nehmen an der zweiten Runde des IEEE Wettbewerbs International Future Energy Challenge 2020 in Form einer Webkonferenz teil.

Mai 2020

07.05. Anton Suchan erhält für seine Masterarbeit den Studienpreis der SEW-EURODRIVE-Stiftung.

14.-15.05. Prof. Ponick leitet das Web-Meeting von IEC TC2 WG12.

15.05. Pauline Frey beginnt als Assistentin am IAL.

27.05. Allan de Barros beginnt als Assistent am IAL.

Juni 2020

03.06. Doktorprüfung von Jonathan Jürgens

12.06. Prof. Ponick nimmt am Web-Meeting des International Advisory Board des Instituts für Thermomechanik der Tschechischen Akademie der Wissenschaften teil.

19.06. Jun.-Prof. Ebrahimi nimmt beim ersten EAWE Komitee als Mitglied und Mitgründer im Online-Treffen teil.

24.-26.06. Teilnahme von Martin Gerlach, Alexander Hoffmann und Stefan Urbanek am Virtual Meeting SPEEDAM in Sorrento, Italien

30.06. Letzter Arbeitstag von Alexander Rehfeldt

Juli 2020

07.07. Jun.-Prof. Friebe und Benjamin Knebusch nehmen online an der PCIM in Nürnberg teil.

13.07. Virtuelle Teilnahme an der IFAC 2020 von Marc Dokus, Frederik Stallmann und Prof. Mertens

15.07. Jonas Henkenjohan beginnt als Assistent am IAL.

21.-22.07. Prof. Ponick und Prof. Mertens halten ein HdT-Seminar zu Wechselwirkungen zwischen Motor und Frequenzumrichter in Essen (!)

August 2020

01.08. Pramod Apte beginnt als Assistent am IAL.

04.08. Virtueller Vortrag von Prof. Mertens zu Low-Frequency HVAC Transmission beim IEEE PES General Meeting 2020

23.-26.08. Online-Teilnahme an der ICEM 2020 in Götheburg von Martin Gerlach, Elmar Haschen, Christian Nörenberg, Jürgen Redlich, Constantin Schepe und Constantin Wohlers.

30.08. Tobias Brinker und vier Studenten nehmen am Halbfinale des IEEE Wettbewerbs International Future Energy Challenge 2020 in Form einer Web-konferenz teil. Erreichen der Top 7 von 26 teilnehmenden Teams (Certificate of Excellence).

31.08. Letzter Arbeitstag von Stephan-Akash Vip

September 2020

01.-03.09. Leon Fauth nimmt online am Deutschen Luft- und Raumfahrtkongress 2020 teil.

01.09. Lennart Jünemann beginnt als Assistent am IAL.

07.-11.09. Niklas Himker nimmt an der EPE 2020 virtuell teil.

07.09. Dr. Jakub Kučka, Dr. Dennis Karwatzki und Prof. Mertens geben ein "virtuelles" Tutorial zur Regelung von Modularen Multilevel-Convertern bei der EPE'20.

08.-10.09. Diverse Vorträge und Sitzungsleitungen von Angehörigen des IAL bei der EPE'20 - ECCE Europe Virtual Conference

08.09. Dr. Jakub Kučka erhält in virtueller Preisverleihung den EPE Young Member Award 2020 für sein EPE-Paper und seinen Vortrag vom Vorjahr.

28.09.-01.10. Teilnahme von Niklas Himker an der virtuellen Konferenz PEDG 2020, Dubrovnik, Kroatien

30.09. Dr. Georg Möller beendet seine Lehrtätigkeit am IAL.

Oktober 2020

01.10. Dr. Boris Dotz wird externer Lehrbeauftragter am IAL.

12.10. Start der Vorlesungszeit mit hybrider Lehre

16.10. Sebastian Rudolph absolviert erfolgreich die Ausbildung als geprüfter Industriemeister Fachrichtung Metall

18.-21.10. Online-Teilnahme von Anton Suchan, Constantin Wohlers und Dapu Zhang an der IEE IECON 2020, Singapore

19.10. Doktorprüfung von Henrik Schroeder

22.10. Prof. Ponick leitet die Halbjahressitzung des DKE K311, die wiederum als Web-Meeting stattfindet.

29.-30.10. Prof. Mertens und Prof. Ponick halten ein HdT-Seminar zu Grundlagen elektrischer Antriebe, das erstmals als Online-Seminar stattfindet.

November 2020

02.11. Umstellung auf Online-Lehre - digitale Kaffeepause



03.11. Digitale Kaffeepause



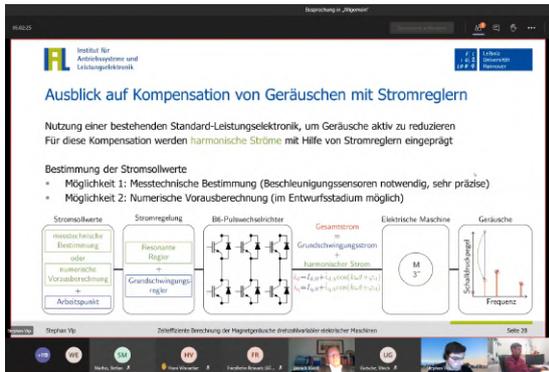
04.11. Prof. Ponick steht Studierenden auf dem Online-Abend der Professuren Rede und Antwort.

07.-11. EPE'20 ECCE Europe

12.11. Prof. Ponick leitet das Web-Meeting von IEC TC2 WG12.

15.11. Sören Fröhling beginnt als Assistent am IAL.

18.11. Das jährliche FEMAG-Anwendertreffen findet, organisiert durch Dr. Steinbrink, erstmals online statt mit Beiträgen von Max Hullmann und Stephan Vip und ca. 160 Teilnehmern.



19.-20.11. Prof. Ponick und Prof. Mertens halten ein HdT-Seminar zu Wechselwirkungen zwischen Motor und Frequenzumrichter als Online-Seminar.

20.11. Constantin Schepe erhält für seine Masterarbeit den Hanns Voith Stiftungspreis in der Kategorie Wasserkraft.

24.-27.11. Virtuelle ICEMS 2020, Hamamatsu, Japan, mit Beiträgen von Jun.-Prof. Friebe, Tobias Brinker, Leon Fauth und Daniel Herwig

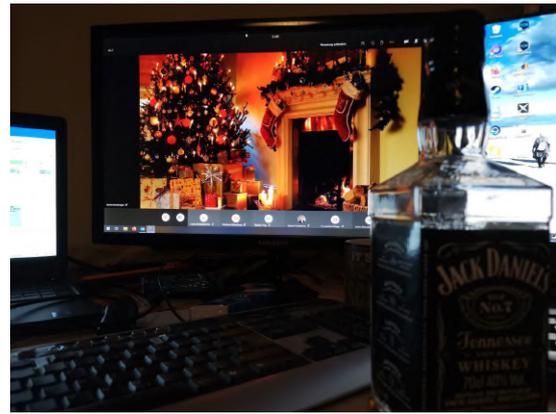
Dezember 2020

01.12. Marius Schubert und Xi Zhu beginnen als Assistenten und Spiridon Lomis als IT-Administrator am IAL.

02.12. Online-Teilnahme von Matthias Kalla mit dem Fraunhofer IEM an der FVA Infotagung

03.12. Doktorprüfung von Alexander Rehfeldt

11.12. Digitales Internationales Jahresabschlusskolloquium



17.12. Doktorprüfung von Jan-Kaspar Müller

20.12. Marc Dokus erhält für sein Paper "Sequence Impedance Characteristics of Grid-Feeding Converters" auf der IPEMC2020 ECCE Asia einen Best Paper Award

31.12. Letzter Arbeitstag von Jürgen Redlich und Constantin Wohlers

Ausblick Wir hoffen und freuen uns auf gemeinsame Zusammenkünfte und Events!



Veröffentlichungen 2019/20 | Publications 2019/20

Aufsätze in Fachzeitschriften 2019 | Journal Articles 2019

De Gennaro, M.; Jürgens, J.; Zanon, A.; Gragger, J.; Schlemmer, E.; Fricassè, A.; Marengo, L.; Ponick, B.; Trancho, E.; Kinder, J.; Cavallini, A.; Mancinelli, P.; Hernandez, M.; Messagie, M.

Designing, Prototyping and Testing of a Ferrite Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Machine for Hybrid and Electric Vehicles Applications

Sustainable Energy Technologies and Assessments, vol. 31 (2019), pp. 86 - 101

Denkena, B.; Bergmann, B.; Teige, C.; Böhse, F.; Königsberg, J.; Klemme, H.

Störfaktoren ausgeschlossen

NC-Fertigung, Ausgabe 07-08 (2019), pp. S. 18-21

Denkena, B.; Bergmann, B.; Teige, C.; Ponick, B.; Königsberg, J.

Hybride Spindel für vielfältigen Einsatz - Vorspannungsregelung von Spindeln mit Hilfe von Formgedächtnislegierungen

mav, 01.12.2019, pp. S. 70-73

England, M.; Ponick, B.

Automatisierter Entwurf von Haarnadelwicklungen anhand von tabellarischen Belegungsplänen

e & i - Elektrotechnik & Informationstechnik, vol. 136 no. 2 - April 2019, pp. 159 - 167

Kucka, J.; Mertens, A.

Common-Mode Voltage Injection Techniques for Quasi-Two-Level PWM-Operated Modular Multilevel Converters

IEEE Journal of Industry Applications, vol. 8, no. 2, pp. 287-294

Raziee, S. M.; Misir, O.; Ponick, B.

Multiple Multiphase Combined Star-Polygon Winding Analysis

IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 66, no. 10, pp. 7468-7479

Sarstedt, M.; Dokus, M.; Gerster, J.; Himker, N.; Hofmann, L.; Lehnhoff, S.; Mertens, A.

Standardized Evaluation of Multi-Level Grid Control Strategies for Future Converter-Dominated Electric Energy Systems

at-Automatisierungstechnik, vol. 67, no. 11, pp. 936-957

Konferenzbeiträge 2019 | Conference Articles 2019

Ebrahimi, A.

Challenges of developing a digital twin model of renewable energy generators

IEEE ISIE 2019, Vancouver, Canada, 12-14.06.2019

Ebrahimi, A.; Meiswinkel, M.

Modeling of Radial and Tangential Roebel Bar Force Distributions in Large Electrical Machines Considering Longitudinal Transposition

EEMODS 2019, Tokyo Japan, 17.-19.09.2019

Brinker, T.; Fauth, L.; Lin, S.; Friebe, J.

Impact of Passive Common Mode Cancellation on the Efficiency and Switching Performance of Power Converters

EPE'19 ECCE Europe, 02.-05.09.19

Buchali, T.; Stallmann, F.; Mertens, A.

New Control Concept for a Safety-critical Actuator in Highly Automated or Autonomous Cars

EPE'19 ECCE Europe, 02.-05.09.19

Dierks, R.; Kucka, J.; Mertens, A.

Optimization of the Low-Frequency Mode for Modular Multilevel Converters Based On Frequency Domain Analysis

EPE'19 ECCE Europe, 02.-05.09.19

Dokus, M.; Mertens, A.

Sequence Impedance-Based Stability Analysis of Droop-Controlled AC Microgrids

PEDG 2019, Xian 03.-06.06.2019

Fauth, L.; Brinker, T.; Lin, S.; Friebe, J.

Asymmetric Half-Bridge Configurations in Power Electronics Converters

EPE'19 ECCE Europe, 02.-05.09.19

Fricke, T.; Schwarz, B.; Ponick, B.

Schwarz-Christoffel-Based Open-Circuit Clamping Plate Field Calculation in Hydro Generators

IEEE IEMDC 2019, San Diego 12.-15.05.2019

Friebe, J.; Lin, S.; Fauth, L.; Brinker, T.

Premagnetized Inductors in Single Phase dc-ac and ac-dc- Converters

COBEP SPEC 2019, Santos, Brazil, 01.-05.12.2019

Himker, N.; Lindemann, G.; Mertens, A.

Iterative Tracker for Anisotropy-Based Self-Sensing Control of PMSM

IEEE SLED 2019, Turin, Italien, 09.-10.09.2019)

Hoffmann, A.; Gerlach, M.; Lindemann, G.; Reitmeier, D.; Wiesemann, J.; Mertens, A.; Ponick, B.;

Hyper High-Speed for the Electrified Automotive Powertrain for Maximum Range

E-MOTIVE Expert Forum 04.-05.09.2019, Schweinfurt

Hoffmann, A.; Kanus, M.; Overmeyer, L.; Ponick, B.

Design of an Integrated Linear Flux Modulating Motor for a Direct-drive Belt Conveyor

IKMT2019, 10.-11.09.2019, Würzburg

Hoffmann, A.; Kanus, M.; Overmeyer, L.; Ponick, B.

Operation Analysis of an Integrated Linear Flux Modulating Motor for a Direct-driven Belt Conveyor

EEMODS 2019, Tokyo Japan, 17.-19.09.2019

Hullmann, M.; Urbanek, S.; Ponick, B.

Surface Eddy Current Suppression on Additively Manufactured Solid Rotor Active Parts

EEMODS 2019, Tokyo Japan, 17.-19.09.2019

Kalla, M.; Korolova, O.; Neufeld, A.; Hofmann, L.; Ponick, B.

Calculating Frequency Responses of Synchronous Machines Using MIMO Transfer Functions

ACEMP-OPTIM 2019 27.8-29.8.19, Istanbul

Kanus, M.; Hoffmann, A.; Overmeyer, L.; Ponick, B.

Linear Direct Drive for Light Conveyor Belts to Reduce Tensile Forces

AST 2019, St. Petersburg, Russia, 10.-12.06.2019

Kanus, M.; Hoffmann, A.; Overmeyer, L.; Ponick, B.

Lineardirektantrieb für biegeschlaffe Transportbänder zur Reduzierung der Gurtzugkraft

15. Fachkolloquium der WGTL in Rostock 11.+12.09.2019

Kucka, J.; Lin, S.; Friebe, J.; Mertens, A.

Quasi-Two-Level PWM-Operated Modular Multilevel Converter With Non-Linear Branch Inductors

EPE'19 ECCE Europe, 02.-05.09.19

Lin, S.; Brinker, T.; Fauth, L.; Friebe, J.

Review of Dimensional Resonance Effect for High Frequency Magnetic Components
EPE'19 ECCE Europe, 02.-05.09.19

Lin, S.; Friebe, J.; Langfermann, S.; Owzareck, M.

Premagnetization of High-Power Low-Frequency DC-Inductors in Power Electronic Applications
PCIM 2019, Nürnberg 07.-09.05.2019

Lindemann G.; Himker, N.; Mertens, A.

Enhanced Observer with Adaptive Reference Frame for Self-Sensing Control of PMSM
IEEE SLED 2019, Turin, Italien, 09.-10.09.2019)

Mirzadeh, M.; Narjes, G.; Ponick, B.

Evaluation of High-Tech Electrical Steel in a High-Speed Permanent Magnet Synchronous Machine for an Aircraft Application
EEMODS 2019, Tokyo Japan, 17.-19.09.2019

Mueller, J.-K.; Manthey, T.; Han D.; Sarlioglu, B.; Friebe, J.; Mertens, A.

Output Sine-Wave Filter Design and Characterization for a 10 kW SiC Inverter
ECCE USA, 29.09.-03.10.19

Rehfeldt, A.; Fricke, T.; Emmrich, D.; Ponick, B.

Semi-Analytical Calculation of Field Distribution in Yoke/Tooth Transition in Electrical Machines
IEEE IEMDC 2019, San Diego 12.-15.05.2019

Rehfeldt, A.; Fricke, T.; Schwarz, B.; Ebrahimi, A.; Ponick, B.

Semi-Analytical Calculation of Field and Loss Distribution in the Tooth Tips of Electrical Machines
EEMODS 2019, Tokyo Japan, 17.-19.09.2019

Trinh, N.; Atallah, A.; Sharma, K.; Kuhn, G.; Juretzek, U.; Rosendahl, J.; Bagaber, B.; Mertens, A.

DFIG-Based Power Plant: System Description and Performance
PESGM 2019, Atlanta, 04.08.-08.08.2019

Urbanek, S.; Heide, D.; Bagaber, B.; Lohss, M.; Specht, B.; Paulig, X.; Mertens, A.; Ponick, B.

Analysis of External Rotor Electric Drives for an All-Automatic Airborne Wind Energy System
IEEE IEMDC 2019, San Diego 12.-15.05.2019

Wiesemann, J.; Sommer, C.; Mertens, A.

Switching Characteristics of a 1.2 kV SiC MOSFET Module using a Controllable Current-Sourced Gate Driver
PCIM 2019, Nürnberg 07.-09.05.2019, pp. 1466-1471

Zulk, S.; Mertens, A.

Optimization of Air-Cooled On-Board Battery Chargers for Electric Vehicles Using WBG Devices
PCIM 2019, Nürnberg, 07.-09.05.2019, pp. 253-260

Buchbeiträge 2019 | Books 2019

Hackbart, M.

Berechnung des Einflusses von Dämpferwicklung und massivem Läuferballen auf den Stoßkurzschluss von Turbogeneratoren

Dissertation, ISLE Verlag Ilmenau, ISBN: 978-3-938843-99-4

John, M.

Frequency-Domain Modeling of Harmonic Interactions in Pulse-Width Modulated Voltage-Source Inverter Drives
Dissertation, Repositorium der LUH, OnlineRes: <https://doi.org/10.15488/4705>

Jonsky, T.

Modellierung und Regelung von fünfphasigen Synchronmaschinen unter Berücksichtigung von Sättigungseffekten und Mehrfachanisotropien

Dissertation, Repositorium der LUH, OnlineRess: <https://doi.org/10.15488/4778>

Krone, T.

Beiträge zu fehlertoleranten Fahrzeugantrieben mit Radnabenmotoren ohne Reibungsbremse

Dissertation, Repositorium der LUH, OnlineRess: <https://doi.org/10.15488/4782>

Kucka, J.

Quasi-Two-Level PWM Operation of Modular Multilevel Converters: Implementation, Analysis and Application to Medium-Voltage Drives

Dissertation, Repositorium der LUH, OnlineRess: <https://www.repo.uni-hannover.de/handle/123456789/4870>

Sonstige Publikationen 2019 | Other Publications 2019

Friebe, J.

Freiheitsgrade und Forschungsaspekte in der Elektrifizierung von Flugzeugen

EFZN-Forschungstag, 19.02.2019, Braunschweig

Friebe, J.; Fauth, L.; Knebusch, B.

Spannungsbelastung magnetischer Bauelemente durch WBG-Leistungshalbleiter

ZVEI Jahrestagung 2019 der Fachverbände Transformatoren & Stromversorgungen sowie Electrical Winding & Insulation Systems, 26.03.-27.03.2019, Nürnberg-Boxdorf

Friebe, J.; Mertens, A.

Power Electronics in Decentralized Systems and Microgrids

Segundo seminario - Sistemas Energeticos de Pequena Escala, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 13.12.2019

Aufsätze in Fachzeitschriften 2020 | Journal Articles 2020

Denkena, B.; Bergmann, B.; Böhse, M.-F.; Königsberg, J.; Ponick, B.

Leistungspotenzial ausgeschöpft - Neues aktives Dämpfungskonzept für Motorspindeln

mav, 01.10.2020, pp. S. 58-61

John, M.; Mertens, A.

Frequency-Domain Modeling of Harmonic Interactions in Voltage-Source Inverters with Closed-Loop Control

Energies 2020, 13(21), 5823

Kucka, J.; Lin, S.; Friebe, J.; Mertens, A.

Quasi-Two-Level PWM-Operated Modular Multilevel Converter With Nonlinear Branch Inductors

IEEE Transactions on Power Electronics

Kucka, J.; Mertens, A.

Improved Current Control for a Quasi-Two-Level PWM-Operated Modular Multilevel Converter

IEEE Transactions on Power Electronics, vol 35 no 7, pp. 6842-6853

Kucka, J.; Mertens, A.

Designing a Passively Damped Quasi-Two-Level-Operated Modular Multilevel Converter for Drive Applications

IEEE Access, vol 8, pp. 80218-80232

Meiswinkel, M.; Ebrahimi, A.; Wohlers, C.; Neschitsch, T.

Transient Roebel Bar Force Calculation in Large Salient-Pole Synchronous Machines

IEEE Access Journal, vol. 8, 2020, Digital Object Identifier 10.1109/ACCESS.2020.3046789

Pfeiffer, J.; Küster, P.; Schulz, I. E. M.; Friebe, J.; Zacharias, P.

Review of Flux Interaction of Differently Aligned Magnetic Fields in Inductors and Transformers,

IEEE Access

Schefer, H.; Fauth, L.; Kopp, T.; Mallwitz, R.; Friebe, J.; Kurrat, M.

Discussion on Electric Power Supply Systems for All Electric Aircraft
IEEE Access, vol 8, pp. 84188 - 84216

Schweigert, D.; Gerlach, M. E.; Hoffmann, A.; Morhard, B.; Tripps, A.; Lohner, T.; Otto, M.; Ponick, B.; Stahl, K.

On the Impact of Maximum Speed on the Power Density of Electromechanical Powertrains
MDPI Vehicles, 2(2), pp. 365-397

Stockbrügger, J.O.; Ponick, B.

Analytische Ermittlung des Stirraumanteils der Wicklung-Stator-Kapazität in elektrischen Maschinen zur Vorausberechnung des hochfrequenten Common-Mode-Stroms
e & i Elektrotechnik und Informationstechnik, Band 137 Ausgabe 4, pp. 203-211

Stockbrügger, J.O.; Ponick, B.

Analytische Ermittlung des Nutschlitzanteils der Stator-Rotor-Kapazität zur Vorausberechnung und Reduzierung von Lagerspannungen in elektrischen Maschinen
e & i Elektrotechnik und Informationstechnik, Band 137 Ausgabe 4, pp. 212-217

Stockbrügger, J.O.; Ponick, B.

Analytische Ermittlung der Wicklung-Stator-Kapazität in elektrischen Maschinen zur Vorausberechnung des hochfrequenten Common-Mode-Stroms
e & i Elektrotechnik und Informationstechnik, Band 137 Ausgabe 4, pp. 196-202

Stockbrügger, J.O.; Ponick, B.

Analytische Ermittlung des Nutschlitzanteils der Wicklung-Rotor-Kapazität zur Vorausberechnung von Lagerspannungen in elektrischen Maschinen
e & i Elektrotechnik und Informationstechnik, Band 137 Ausgabe 4, pp. 188-195

Stockbrügger, J.O.; Ponick, B.

Analytical Determination of the End-Winding Portion of the Winding-to-Rotor Capacitance for the Prediction of Bearing Voltage in Electrical Machines
Electrical Engineering (Archiv für Elektrotechnik)

Stockbrügger, J.O.; Ponick, B.

Analytical Determination of the Turn-to-Turn Capacitances for the Prediction of Voltage Peaks in a PWM-Fed Motor Winding
Electrical Engineering (Archiv für Elektrotechnik)

Stockbrügger, J.O.; Ponick, B.

Analytical Determination of the Slot and the End-Winding Portion of the Winding-to-Rotor Capacitance for the Prediction of Shaft Voltage in Electrical Machines
Energies 2021 (MDPI), Band 14 Ausgabe 174

Konferenzbeiträge 2020 | Conference Articles 2020

Ali, M.; Friebe, J.; Mertens A.

Simplified Calculation of Parasitic Elements and Mutual Couplings of Wide-bandgap Power Semiconductor Modules
EPE'20 ECCE Europe (virtuell) 07.-11.09.2020

Ali, M.; Müller, J.-K.; Friebe, J.; Mertens A.

Analysis of Switching Performance and EMI Emission of SiC Inverters under the Influence of Parasitic Elements and Mutual Couplings of the Power Modules
EPE'20 ECCE Europe (virtuell) 07.-11.09.2020

Andresen, J.; Vip, S.; Mertens, A.; Paulus, S.

Compensation of the Radial and Circumferential Mode 0 Vibration of a Permanent Magnet Electric Machine based on an Experimental Characterisation
EPE'20 ECCE Europe (virtuell) 07.-11.09.2020

Andresen, J.; Vip, S.; Mertens, A.; Paulus, S.

Theory of Influencing the Breathing Mode and Torque Pulsations of Permanent Magnet Electric Machines with Harmonic Currents
EPE'20 ECCE Europe (virtuell) 07.-11.09.2020

Berweiler, B.; Ponick, B.

Current and Average Temperature Calculation for Electrically Excited Synchronous Machines in Case of Contactless Energy Supply
ICEM 2020 (virtuell) 23.-26.08.2020, Göteborg

Brinker, T.; Willer, F.; Heeren, H.; Fauth, L.; Friebe, J.

Design of a Hybrid Two-Stage GaN-Si Inverter for BLDC Motors
ICEMS 2020 (virtuell) 24.-27.11.2020

Dierks, R.; Kucka, J.; Mertens, A.

Using Both the Circulating Currents and the Common-Mode Voltage for the Branch Energy Control of Modular Multilevel Converters
EPE'20 ECCE Europe (virtuell) 07.-11.09.2020

Dokus, M.; Mertens, A.

Sequence Impedance Characteristics of Grid-Feeding Converters
ECCE Asia 2020 (virtuell) 29.11. - 02.12.2020

Dokus, M.; Mertens, A.

Sequence Impedance Characteristics of Grid-Forming Converter Controls
PEDG 2020 (virtuell) 28.09.2020

Dokus, M.; Sarstedt, M.; Mertens, A.

On the Stability of Converter-Dominated Power Systems: Impedance-Based Analysis
SGES 2020 (virtuell) 23.11 - 26.11.2020

Dokus, M.; Stallmann, F.; Mertens, A.

Sequence Impedance-Based Stability Analysis of AC Microgrids Controlled by Virtual Synchronous Generator Control Methods
IFAC 2020 (virtuell) 13.07.2020

Ebersberger, J.; Müller, J.-K.; Mertens, A.

Dynamic Characterization of a SiC-MOSFET Half Bridge in Hard- and Soft-Switching and Investigation of Current Sensing Technologies
EPE'20 ECCE Europe (virtuell) 07.-11.09.2020

Fauth, L.; Jusko, S.; Friebe, J.; Mertens, A.

GaN HEMT Based Inverter for Driving Ultrasonic Transducers
ICEMS 2020 (virtuell) 24.-27.11.2020

Fricke, T.; Schwarz, B.; Ponick, B.

Single Equation Clamping Plate Loss Model for Large Synchronous Machines
ICEM 2020 (virtuell) 23.-26.08.2020, Göteborg

Fricke, T.; Schwarz, B.; Ponick, B.

A Magnetic Equivalent Circuit to Account for Gaps Between Clamping Plate Segments in Large Synchronous Machines
ICEM 2020 (virtuell) 23.-26.08.2020, Göteborg

Friebe, J.; Fauth, L.

Efficiency Optimization for Partial Load Operation of Interleaved Converters
ICEMS 2020 (virtuell) 24.-27.11.2020

Gerlach, M.E.; Ponick, B.

Influence of the Stator Winding and Forming of the End Winding on the Vibration Behavior of Electric Machine's Stator Core
ICEM 2020 (virtuell) 23.-26.08.2020, Göteborg, pp. 1171-1177

Gerlach, M.E.; Zajonc, M.; Ponick, B.

Methodology to Evaluate the Mechanical Stress in High Speed Electric Machines with Buried Magnets
SPEEDAM 2020 (virtuell) 24.06.2020, Sorrento, pp. 84-91

Haschen, E.; Ponick, B.

Calculation of Slot Leakage Flux Using Equivalent Magnetic Circuits
ICEM 2020 (virtuell) 23.-26.08.2020, Göteborg

Heimholdt-Zhu, T.; Knebusch, B.; Borcherding, H.

High-Frequency Models for the Prediction of Transient Effects in Motor Windings Under Fast Rising Impulse Voltages
PCIM 2020 (virtuell) 07.07.2020, Nürnberg

Herwig, D.; Brockhage, T.; Mertens, A.

Combining Multiple Temperature-Sensitive Electrical Parameters Using Artificial Neural Networks
EPE'20 ECCE Europe (virtuell) 07.-11.09.2020

Herwig, D.; Brockhage, T.; Mertens, A.

Impact of Parasitics in Power Modules and Gate Drivers on TSEP-based Temperature Estimations
ICEMS 2020 (virtuell) 24.-27.11.2020

Himker, N.; Strunk, R.; Mertens, A.

Grid Impedance Estimation with Oversampling for Grid-Connected Converters
EPE'20 ECCE Europe (virtuell) 07.-11.09.2020

Himker, N.; Wächter, M.; Peinke, J.; Mertens, A.

Dynamic Behaviour and Modelling of Variable-Speed Wind Turbines
PEDG 2020 (virtuell) 28.09.2020

Hoffmann, A.; Ponick, B.

Statistical Deviation of High-Frequency Lumped Model Parameters for Stator Windings in Three-Phase Electrical Machines
SPEEDAM 2020 (virtuell) 24.06.2020, Sorrento, pp. 92-97

Kanus, M.; Hoffmann, A.; Overmeyer, L.; Ponick, B.

Linear Direct Drive for Light Conveyor Belts to Reduce Tensile Forces
International Conference on Cyber-Physical Systems and Control (CPS&C'2019), pp. 398-406

Lorenz, M.; Kucka, J.; Mertens, A.

Active Current and Energy Control for the Quasi-Three-Level Operation Mode of an Extended Modular Multi-level Converter Topology
EPE'20 ECCE Europe (virtuell) 07.-11.09.2020

Nörenberg, C.; Redlich, J.; Ponick, B.

Novel Method for Considering AC Copper Losses in Traction Motors
ICEM 2020 (virtuell) 23.-26.08.2020, Göteborg

Roche, J.P.; Friebe, J.; Niggemann, O.

Machine Learning for Grey Box Modelling of Electrical Components for Circuit- and EMC-Simulation
PCIM 2020 (virtuell) 07.07.2020, Nürnberg

Sarstedt, M.; Kluß, L.; Dokus, M.; Gerster, J.; Hofmann, L.

Simulation of Hierarchical Multi-Level Grid Control Strategies
SGES 2020 (virtuell) 23. - 26.11.2020

Schepe, C.; Haschen, E.; Ponick, B.

Calculation of Circulating Currents in Parallel Branches of Salient Pole Synchronous Machines
ICEM 2020 (virtuell) 23.-26.08.2020, Göteborg

Stallmann, F.; Mertens, A.

Sequence Impedance Modeling of the Matching Control and Comparison with Virtual Synchronous Generator
PEDG 2020 (virtuell) 28.09.2020

Suchan, A.; Ponick, B.

Brush Dynamics in Electrically Excited Synchronous Machines and their Influence on the Field Winding
IECON 2020 (virtuell) 18.-21.10.2020, Singapur

Urbanek, S.; Keuter, R.; Peter, E.; Ponick, B.

Effects of Continuous Rotor Skewing in Additively Manufactured Permanent Magnet Rotors
SPEEDAM 2020 (virtuell) 24.06.2020, Sorrento

Vip, S.-A.; Andresen, J.; Dräger, F.; Ponick, B.

NVH-Simulation of Permanent Magnet Synchronous Traction Drives Including Torsional Mode Shapes
ICEM 2020 (virtuell) 23.-26.08.2020, Göteborg

Wankhede, Y.; Fauth, L.; Friebe, J.

Design and Control of a Virtual DC-Link for a full GaN-based Single Phase Converter with High Power Density
EPE'20 ECCE Europe(virtuell) 07.-11.09.2020

Wohlers, C.; Ponick, B.

First Estimations of Stator Dimensions for Permanent Magnet Synchronous Machines with Tooth-Coil Windings and Direct Liquid Cooling
ICEM 2020 (virtuell) 23.-26.08.2020, Göteborg

Wohlers, C.; Ponick, B.

A Novel Method for the Fast Calculation of the Characteristics of PM Synchronous Machines
IECON 2020 (virtuell) 18.-21.10.2020, Singapur, pp. 832-837

Zhang, D.; Ebrahimi, A.; Wohlers, C.; Redlich, J.; Ponick, B.

On the Analytical Calculation of Eddy-Current Losses in Permanent Magnets of Electrical Machines
IECON 2020 (virtuell) 18.-21.10.2020, Singapur

Buchbeiträge 2020 | Books 2020

Boseniuk, F.

Parametrisierung von thermischen Modellen für permanentmagneterregte Synchronmaschinen mittels experimenteller Identifikationsmethoden
Dissertation, TEWISS Verlag ISBN 978-3-95900-425-1

Ebrahimi, A.

Advances in Modelling and control of Wind and Hydrogenerators
ISBN: 978-1-83880-533-3

Heseding, J.

Baukastensysteme für den Antriebsstrang von Elektrofahrzeugen

Dissertation, TEWISS Verlag ISBN 978-3-95900-436-7

Jürgens, J.

Elektrisch erregte Synchronmaschinen für unterschiedliche Antriebskonzepte in Elektrofahrzeugen

Dissertation, TEWISS Verlag ISBN 978-395900-466-4

Morisse, M.

Über System- und Regelungsdynamiken von Windenergieanlagen und deren Einfluss auf die Umrichterlebensdauer

Dissertation, Repositorium der LUH, Online-Ress.: <https://www.repo.uni-hannover.de/handle/123456789/9431>

Oelkers, F.

Fehlererkennung in Antriebssystemen mit permanentmagneterregten Synchronmaschinen

Dissertation, TEWISS Verlag ISBN 978-3-95900-417-9

Rehfeldt, A.

Verbesserte Berechnung von Magnetfeldern und Ummagnetisierungsverlusten in elektrischen Maschinen

Dissertation, TEWISS Verlag ISBN 978-3-95900-519-7

Schroeder, H.

Wicklungskopfloze Turbogeneratoren mit Mehrphasentransformatoren

Dissertation, TEWISS Verlag ISBN 978-3-95900-510-4

Sonstige Publikationen 2020 | Other Publications 2020

Fauth, L.; Schefer, H.; Kopp, T.; Mallwitz, R.; Friebe, J.; Kurrat, M.

Power Supply Systems for All Electric Aircraft

Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 01.-03.09.2020

Knebusch, B.

Elektrische Lagerbelastung - Lagerströme durch Betrieb am Frequenzumrichter

BENNING Fachtagung 12.03.2020, Bocholt

Auszeichnungen 2019/20 | Awards 2019/20

2019

10.05.

Niklas Himker wird für seine Masterarbeit mit dem Studienpreis der SEW-EURODRIVE-Stiftung ausgezeichnet.

28.06.

Max Hullmann erhält für seine Masterarbeit im Bereich Wasserkraft den Hanns-Voith-Stiftungspreis.

2020

07.05.

Anton Suchan erhält für seine Masterarbeit den Studienpreis der SEW-EURODRIVE-Stiftung.

08.09.

Dr. Jakub Kučka erhält den *2020 EPE Outstanding Young Member Award* für sein Paper und seinen Vortrag auf der EPE'20 ECCE Europe Virtual Conference.

20.11.

Constantin Schepe erhält für seine Masterarbeit den Hanns Voith Stiftungspreis.

20.12.

Marc Dokus erhält für sein Paper *Sequence Impedance Characteristics of Grid-Feeding Converters* auf der IPEMC2020–ECCE Asia einen Best Paper Award.



Kontakt | Contact

Institut für Antriebssysteme 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



standortfinder.uni-hannover.de

