

Institutsbericht | Institute Report

2021 / 2022



Impressum | Imprint

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

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

Redaktion: | Editor: IAL (Elfi Jeschina, Beate Pieschel, Johannes Wenzel, Eike Christian Krüger)

Übersetzung: | Translation: Christopher Tidy

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 2021 / 2022

Antriebsregelung

Elektrische Antriebssysteme

Elektrische Maschinen

Leistungselektronik

Institute Report 2021 / 2022

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 |
| Geberlose Regelung von Induktionsmaschinen Self-Sensing Control of Induction Machines | 8 |
| Aktive Geräuschkompenstation von Windenergieanlagen (DampedWEA) Active noise compensation of wind turbines (DampedWEA) | 10 |
| Systemsimulation zur Vorhersage von Lagerströmen sowie elektromagnetischer Verträglichkeit System simulation for prediction of bearing currents as well as electromagnetic compatibility | 12 |
| SE ² A - Sustainable and Energy-Efficient Aviation SE ² A - Sustainable and Energy-Efficient Aviation | 16 |
| Sustainable and Energy Efficient Aviation (SE ² A): Höhenstrahlungseffekte bei Leistungshalbleitern Sustainable and Energy Efficient Aviation (SE ² A): Cosmic radiation effects on power semiconductors | 18 |
| Modulares Antriebssystem für muskelbetriebene, kettenlose Fahrzeuge in der Mikromobilität Modular drive system for chainless muscle-powered vehicles in micromobility | 20 |
| Zeiteffiziente Berechnung von Ummagnetisierungsverlusten Time-efficient calculation of core losses | 22 |
| Verbesserte Vorausberechnung von Wirbelstromverlusten in Permanentmagneten Improved prediction of eddy current losses in permanent magnets | 24 |
| Zeiteffiziente Schwingungsberechnung mit dem analytischen Balkenelement-Modell Time-efficient vibration calculation using an analytical beam element model | 26 |
| Telemetrie und Monitoring Telemetry and Monitoring | 28 |
| Entwurf von Haarnadelwicklungen unter Berücksichtigung der transienten Potentialverteilung Design of Hairpin Windings Considering the Transient Potential Distribution | 29 |
| Geräusch- und Schwingungsreduktion durch vorteilhafte PMSM-Rotorblechschnitte Noise and vibration reduction by advantageous PMSM rotor design | 31 |
| Ansätze zur Früherkennung klimatischer Einflüsse auf Leistungshalbleiter Approaches for Early Detection of Climatic Impacts on Power Semiconductors | 33 |
| Optimale Nutzung der Regelungsfreiheitsgrade des Modularen Multilevel- Matrixumrichters bei variablen Systemfrequenzen Optimal use of the control degrees of freedom of the modular multilevel matrix converter at variable system frequencies | 36 |
| RuBICon: Regelbasierte Initialisierung von umrichterdominierten Netzen RuBICon: Rule-based Initialisation of Converter-dominated Grids | 38 |
| Aktive Gatetreiber für SiC-Umrichter in Elektrofahrzeugen Active Gate Drivers for SiC Inverters in Electric Vehicles | 40 |
| Vollintegrierte und system- optimierte Elektroniklösung am Solarmodul Fully Integrated and System- Optimized Electronics Solution on a Solar Module | 42 |
| Besondere Aktivitäten Special Activities | 44 |
| EPE'22 ECCE Europe EPE'22 ECCE Europe | 44 |
| Neues in und von FEMAG Novelties around FEMAG | 48 |
| Lehre am IAL Teaching at IAL | 50 |
| Lehrveranstaltungen Lectures | 50 |
| Grundlagen der elektromagnetischen Energiewandlung Basics of Electromechanical Power Conversion | 51 |
| Elektrische Antriebe Electric Drives | 52 |

| | |
|---|----|
| Berechnung elektrischer Maschinen | |
| Theory of Electrical Machines | 53 |
| Elektrische Klein-, Servo- und Fahrzeugantriebe | |
| Small Electrical Motors, Servo and Vehicle Drives | 54 |
| Elektronisch betriebene Kleinmaschinen | |
| Small Electronically Controlled Motors | 55 |
| Elektrische Maschinen für eAutomotive-Traktionsanwendungen | |
| Electrical Machines for eAutomotive Traction Applications | 56 |
| Elektrische Antriebssysteme | |
| Electrical Drive Systems | 57 |
| Ethische Aspekte des Ingenieurberufs | |
| Ethical Aspects of the Engineering Profession | 58 |
| Leistungselektronik I | |
| Power Electronics I | 59 |
| Leistungselektronik II | |
| Power Electronics II | 60 |
| Einführung in das deutsche und europäische Energierecht | |
| Introduction into German and European Energy Law | 61 |
| Leistungshalbleiter und Ansteuerungen | |
| Power Semiconductors and Gate Drives | 62 |
| Regelung elektrischer Drehfeldmaschinen | |
| Control of Electrical Three-phase Machines | 63 |
| Netzanschlusstechnik erneuerbarer Energien | |
| Grid connection technology for renewable energies | 64 |
| Elektrische Bahnen und Fahrzeugantriebe | |
| Electrical Traction and Vehicle Drives | 65 |
| Passive Komponenten der Leistungselektronik | |
| Passive Components in Power Electronics | 66 |
| Leistungselektronik | |
| Power Electronics | 67 |
| Wasserkraftgeneratoren | |
| Hydrogenerators | 68 |
| Elektrische Maschinen und Antriebe | |
| Electrical Machines and Drives | 69 |
| Studentische Arbeiten 2021/22 | |
| Students' Theses 2021/22 | 70 |
| Dissertationen 2021/22 Dissertations 2021/22 | 84 |
| Optimierung eines einphasigen PFC-Gleichrichters mit Wide-Bandgap-Leistungshalbleitern auf Basis domänenübergreifender Modelle | |
| Optimization of a single-phase PFC Rectifier using Wide Bandgap Devices based on multi-domain Modeling | 84 |
| Zeiteffiziente Berechnung der Magnetgeräusche drehzahlvariabler elektrischer Maschinen | |
| Time-efficient calculation of magnetic noise of variable-speed electrical machines | 86 |
| Modellierung und Regelung fehlertoleranter Antriebe mit permanentmagneterregten Synchronmaschinen für Elektrofahrzeuge | |
| Modelling and Control of Fault-Tolerant Drives with Permanent Magnet Synchronous Machines for Electric Vehicles | 88 |
| Permanenterregte Synchronmaschinen hoher Drehmomentdichte | |
| Permanent Magnet Synchronous Machines with High Torque Density | 90 |
| Gestaltung von Rotoren permanentmagneterregter Synchronmaschinen für die Metalladditive Fertigung | |
| Design of Permanent Magnet Synchronous Machine Rotors for Metal Additive Manufacturing | 92 |
| Analytische Bestimmung parasitärer Kapazitäten in elektrischen Maschinen | |
| Analytical determination of parasitic capacitances in electrical machines | 94 |
| Elektromagnetische Gestaltung permanentmagneterregter Synchronmaschinen für den geberlos geregelten Betrieb im gesamten Drehzahlbereich | |
| Electromagnetic Design of Permanent Magnet Synchronous Machines for Self-Sensing Control in the Full Speed Range | 96 |

| | |
|--|------------|
| Fünfsträngige Aktoren in Lenkungssystemen für autonomes Fahren | |
| Electric Five-Phase Actuators in Steering Systems for Autonomous Driving | 98 |
| Aktive Geräuschunterdrückung in einer permanentmagnetenerregten Synchronmaschine mit Hilfe von Stromoberschwingungen | |
| Active Noise Cancelation in a Permanent Magnet Synchronous Machine with the Aid of Harmonic Currents | 100 |
| Transiente Simulation elektrisch erregter Synchronmaschinen mit Parameterfindung durch magnetische Ersatznetzwerke | |
| Transient Simulation of Electrically Excited Synchronous Machines with Parameter Finding by Magnetic Equivalent Circuits | 102 |
| Regelung von Induktionsmaschinen im gesamten Drehzahlbereich ohne Gebersystem | |
| Control of Induction Machines in Whole Speed Range Without an Encoder | 104 |
| Wireless Power Transfer for Battery Charging Application of Electric Vehicles | |
| Wireless Power Transfer for Battery Charging Application of Electric Vehicles | 106 |
| Elektrisch erregte Synchronmaschine mit kontaktlosem induktiven Übertragungssystem ohne zusätzlichen Wechselrichter | |
| Electrically excited synchronous machine with contactless inductive transmission system without an additional inverter | 108 |
| Wirbelstromverluste im Statorpresssystem in Großer Schenkelpolsynchronmaschinen | |
| Compression System Losses in Large Salient Pole Synchronous Machines | 110 |
| Das Institut The Institute | 112 |
| Nachruf: Prof. Dr. Johannes Nestler | |
| Obituary: Prof. Dr. Johannes Nestler | 112 |
| Mitarbeitende des IAL | |
| IAL Staff | 114 |
| Chronik 2021/22 | |
| Chronicle 2021/22 | 127 |
| Veröffentlichungen 2021/22 | |
| Publications 2021/22 | 133 |
| Auszeichnungen 2021/22 | |
| Awards 2021/22 | 144 |

Vorwort | Preface

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

unser letzter Institutsbericht über die Jahre 2019 und 2020 begann mit einem Hinweis auf die pandemiebedingte gähnende Leere in den Instituträumlichkeiten. Die Pandemie ist nun (weitgehend) Geschichte – der Trakt H ist jedoch immer noch gähnend leer. Der Grund ist jedoch nun ein höchst erfreulicher: Seit Ende August 2021 wurde 20 Monate lang der gesamte Trakt einschließlich des Kellerlabors kernsaniert einschließlich des Einbaus eines neuen Fahrstuhls, einer neuen Krananlage im Kellerlabor, einer leistungsstärkeren Rückkühlanlage und einer Brandschutztreppe an der Stirnseite des Gebäudes.

Die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des IAL mussten für diese Zeit Ausweichquartieren beziehen, teils in den Trakten A und B des Welfenschlosses, teils aber auch in anderen Universitätsgebäuden in der Appelstraße oder Im Moore. Abschlussarbeiterinnen und Abschlussarbeitern oder studentischen Hilfskräften konnten in dieser Zeit nur vereinzelt Rechnerarbeitsplätze zur Verfügung gestellt werden.

Auch unter diesen schwierigen Rahmenbedingungen den engen fachlichen Austausch, das kollegiale Miteinander und den Teamgeist, der das IAL auszeichnet, aufrecht zu erhalten, war zweifellos herausfordernd; insgesamt ist es aber erstaunlich gut gelungen. Nun freuen sich alle darauf, im Mai wieder in die angestammten, frisch renovierten Instituträume umziehen zu können. Aber mehr noch: Das IAL wird zukünftig den gesamten Trakt, also zusätzlich die bisher vom Fachsprachenzentrum genutzten Räume im 1. und 2. OG, nutzen können und damit (endlich!) ausreichend Büroflächen, zusätzliche Besprechungsräume, genug Rechnerarbeitsplätze für studentische Hilfskräfte und Abschlussarbeitende und sogar einen Sozialraum mit Kaffeküche und Aufenthaltsmöglichkeiten besitzen. Der Wiedereinzug wird sicher noch einmal ein Kraftakt werden, der allen besonderen Einsatz abverlangen wird – zuvorderst natürlich unserer Werkstatt, da alle Versuchsaufbauten im Kellerlabor neu installiert und in Betrieb genommen werden müssen.

Ungeachtet der doppelt schwierigen Bedingungen – neben der Sanierung war ja auch noch die Corona-Pandemie zu bewältigen – hat sich das IAL auch in den Jahren 2021 und 2022 sehr positiv weiterentwickelt. Eine ganze Reihe neuer Forschungsprojekte

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

Our last institute report about the years 2019 and 2020 began with a reference to the yawning emptiness in the Institute's premises due to the pandemic. The pandemic is now (largely) history - but Tract H is still yawningly empty. The reason, however, is now a most pleasant one: since the end of August 2021, the entire wing, including the basement laboratory, has undergone 20 months of core renovation, including the installation of a new lift, a new crane system in the basement laboratory, a more powerful recooling system and a fire escape staircase at the front of the building.

The IAL staff had to move into alternative quarters for this period, partly into wings A and B of the Welfenschloss, but also partly in other university buildings in Appelstraße or Im Moore. During this time, only a few computer workstations could be made available to final year students or student assistants.

Especially under these difficult conditions, it was undoubtedly challenging to maintain the close professional exchange, the collegial cooperation and the team spirit that characterise the IAL; but overall it was surprisingly successful. Now everyone is looking forward to being able to move back into the Institute's traditional, freshly renovated rooms in May. But more than that: in the future, the IAL will be able to use the entire wing, i.e., in addition the rooms previously used by the Centre for Specialised Languages on the 1st and 2nd floors, and thus (finally!) have sufficient office space, additional meeting rooms, enough computer workstations for student assistants and final year students, and even a social room with a coffee kitchen and recreation facilities. Moving back in will certainly be another feat of strength that will demand special effort from everyone - first and foremost, of course, from our workshop, since all the experimental set-ups in the basement lab will have to be reinstalled and put into operation.

Despite the doubly difficult conditions – in addition to the renovation, the Corona pandemic also had to overcome– the IAL continued to develop very positively in 2021 and 2022. A whole series of new research projects were successfully funded, to which our two junior professors Amir Ebrahimi and Jens Friebe contributed significantly. The number of academic staff has now exceeded 55.

könnte neu eingeworben werden, wozu nicht zuletzt unsere beiden Juniorprofessoren Amir Ebrahimi und Jens Friebe maßgeblich beigetragen haben. Die Zahl der wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter hat inzwischen die Marke von 55 überschritten.

Ein Höhepunkt besonderer Art war zweifellos die EPE 2022 in Hannover mit Prof. Mertens als General Chair und nahezu 1.000 Teilnehmenden aus aller Welt, der eine 18monatige, teils sehr zeitaufwändige Vorbereitung vorausging, bei der sich auch eine Reihe wissenschaftlicher Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter stark engagiert haben. Allen, die zum Erfolg dieser renommierten Veranstaltung beigetragen haben, sei an dieser Stelle schon einmal herzlich gedankt. Eine Nachlese zu diesem Ereignis finden Sie, ebenso wie Neuigkeiten aus Forschung und Lehre sowie zu den Veränderungen in der Mitarbeiterschaft über die vergangenen zwei Jahre hinweg, auf den folgenden Seiten. Wir wünschen Ihnen eine interessante Lektüre!

Außerdem möchten wir schon jetzt ankündigen, dass wir für den Sommer 2023 einen Tag der offenen Tür planen, an dem sich die Ehemaligen des IAL ebenso wie Projektpartner:innen einen persönlichen Eindruck vom ‚neuen IAL‘ verschaffen können. Wir werden Sie hierzu rechtzeitig einladen und hoffen, bei diesem Anlass viele von Ihnen persönlich begrüßen zu können.

Hannover, im Dezember 2022

A highlight of a special kind was undoubtedly the EPE 2022 in Hannover with Prof. Mertens as General Chair and almost 1,000 participants from all over the world, which was preceded by 18 months of sometimes very time-consuming preparation, in which a number of scientific staff members were also heavily involved. We would like to take this opportunity to thank all those who contributed to the success of this renowned event. You will find a review of this event, as well as news from research and teaching and changes in the staff over the past two years, on the following pages. We wish you interesting reading!

We would also like to announce that we are planning an open day for the summer of 2023, where alumni of the IAL together with project partners can get a personal impression of the ‚new IAL‘. We will invite you to this in good time and hope to be able to welcome many of you personally on this occasion.

Hannover, December 2022

Forschung am IAL: Projektberichte

Research at IAL: Project Reports

Geberlose Regelung von Induktionsmaschinen

von Niklas Himker, M.Sc.
und Constantin Schepel, M.Sc.

Durch den geberlosen Betrieb von elektrischen Maschinen können Kosten eingespart, das Bauvolumen und Wartungsaufwand reduziert und der Betrieb unter extremen Umweltbedingungen ermöglicht werden. Der geberlose Betrieb von Induktionsmaschinen ist bei niedriger Frequenz bisher nicht zuverlässig möglich. Um eine Induktionsmaschine bei niedrigen Frequenzen regeln zu können, ist eine zusätzliche Spule im Rotor, die einachsig eingelegt und kurzgeschlossen wird, eine mögliche Lösung. Durch Einprägen eines hochfrequenten Signals und Auswerten der Stromantwort kann dann die Rotorlageinformation extrahiert werden. Ein erster Prototyp eines Rotors zum Erproben der geberlosen Regelung bei niedrigen Frequenzen ist in Abbildung 1 dargestellt.



Abb. 1: Rotor des Prototypen mit einer Zusatzwicklung
Fig. 1: Rotor of the prototype with an additional winding

Im Rahmen einer Dissertation [1] ist eine Beobachterstruktur mit zugehöriger Lage- bzw. Drehzahladaption entworfen worden, die im gesamten Betriebsbereich unabhängig von der Statorfrequenz verwendet werden kann. Das Verfahren basiert auf einer hybriden Auswertung, die sowohl die Information über die Felddrehzahl durch die induzierte Spannung als auch die Rotorlageinformation, die durch die zusätzlich Wicklung eingebracht wird, ausnutzt. Die entstandene Struktur ist in Abbildung 3 zu sehen. Zur Auswertung der Lage- bzw. Drehzahlinformation wird ein Beobachter aus den Rotor- und Stator-Spannungsdifferentialgleichungen aufgestellt, welcher die Flussverkettung der Maschine schätzt. Auf der Grundlage der Schätzung wird ein Beobachterfehler berechnet, der unterschiedlich ausgewertet wird, je nachdem, ob die induzierte

Self-Sensing Control of Induction Machines

by Niklas Himker, M.Sc.,
and Constantin Schepel, M.Sc.

Self-sensing operation of electrical machines can save costs and reduce both the construction volume and maintenance requirements. Self-sensing operation of induction machines is challenging at low frequencies when using established methods. To control an induction machine at low frequencies, an additional coil in the rotor, which is inserted uniaxially and short circuited, is a possible solution. By injecting a high-frequency signal and evaluating the current response, rotor position information can be extracted. A first prototype of a rotor for testing self-sensing control at low frequencies is shown in Figure 1.

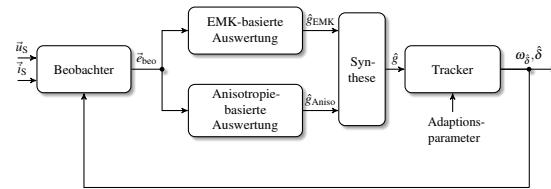


Abb. 3: Blockschematic of the sensorless
control
Fig. 3: Block diagram of the self-sensing control

Within the scope of a PhD thesis [1], an observer structure with associated position or speed adaptation has been designed, which can be used across the entire operating range independent of the stator frequency. The method is based on a hybrid evaluation that exploits both the speed information provided by the induced voltage and the rotor position information acquired by the additional winding. The resulting structure can be seen in Figure 3. To evaluate the position or speed, an observer is derived based on the rotor and stator voltage differential equations, which estimates the flux linkage of the machine. Based on this estimate, an observer error is calculated, and the calculation evaluates the information from either the induced voltage or the additional winding. The evaluation uses analytical expressions to determine the direction in which the true position or speed deviates from the estimated position or speed. The information from the two paths in Figure 3 is synthesized to a single signal according to the actual speed and then evaluated by a tracker, which adjusts the estimated position or speed. The estimated position and speed are fed

Spannung oder die zusätzliche Wicklung als Information verwendet wird. Die Auswertung nutzt analytische Ausdrücke um die Richtung zu bestimmen, in der die wahre Lage bzw. Drehzahl von der geschätzten Lage bzw. Drehzahl abweicht. Diese beiden Informationen werden je nach Drehzahl zu einem gemeinsamen Signal zusammengesetzt, um von einem Tracker ausgewertet zu werden, der die geschätzten Lage bzw. Drehzahl adaptiert. Diese geschätzte Lage und Drehzahl wird dem Beobachter zurückgeführt, wodurch ein geschlossener Kreis für die Schätzung entsteht. Die geschätzte Drehzahl wird zudem von der Regelung der Induktionsmaschine verwendet.

Erste Ergebnisse weisen sowohl für den Bereich bei niedrigen Drehzahlen als auch bei hohen Drehzahlen einen stabilen geberlosen Betrieb auf. Der Übergang vom Stillstand zu negativen Drehzahlen und später zu positiven Drehzahlen ist in Abbildung 2 gezeigt. Ab einer Drehzahl von 150 1/min startet der Übergang zwischen der Auswertung der Rotorlageinformation aus der Zusatzwicklung und der Auswertung der induzierten Spannung. Ab einer Drehzahl von 200 1/min wird alleine die Information der induzierten Spannung verwendet, was durch den Drift des im unteren Bild abgebildeten Rotorlageschätzfehlers sichtbar wird.

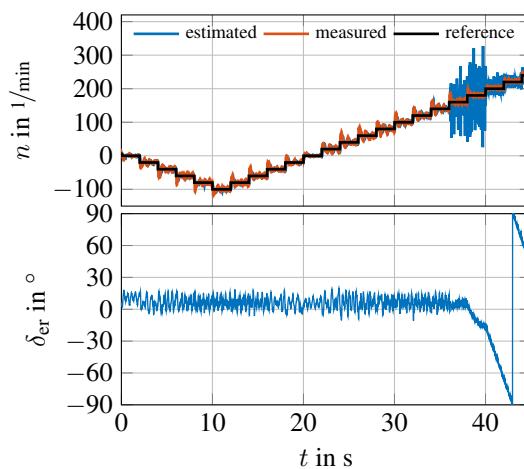


Abb. 2: Geberlose Regelung im drehzahlgeregelten Betrieb bei einer Belastung von 40 % des Bemessungsmoments bei verschiedenen Drehzahlsollwerten

Fig. 2: Self-sensing control in speed-controlled operation with 40 % of the rated torque at different speed setpoints

Aktuell wird an einem neuen Rotordesign geforscht, welches eine bessere Auswertung der Rotorlageinformation durch die Zusatzwicklung ermöglichen soll und somit den Rotorlageschätzfehler bei niedrigen Frequenzen weiter reduzieren soll. Zudem soll der Einfluss der Zusatzwicklung auf das Betriebsverhalten der Maschine weiter reduziert werden. Ein möglicher Entwurf ist in Abbildung 4 dargestellt, welcher anders als beim aktuellen Prototypen eine filigraner eingearbeitete Zusatzwicklung aufweist.

back to the observer, creating a closed loop for the estimation. The estimated speed is also used by the control of the induction machine.

Initial results show stable self-sensing operation for both the low-speed and high-speed regions. The transition from standstill to negative speeds and then to positive speeds is shown in Figure 2. From a speed of 150 1/min upwards, the transition from evaluation of the rotor position information associated with the additional winding to evaluation of the induced voltage starts. From a speed of 200 1/min upwards, only the information concerning the induced voltage is used, which becomes visible in the drift of the rotor position estimation error shown in the bottom plot of Figure 2.

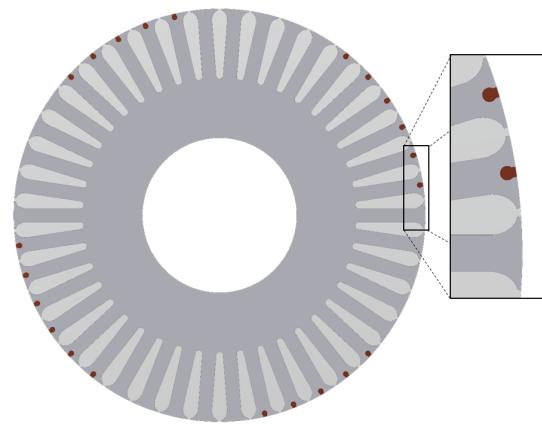


Abb. 4: Querschnitt des weiterentwickelten Rotors mit Zusatzwicklung

Fig. 4: Cross-section of the further developed rotor with an additional winding

Ongoing research concerns a new rotor design that should enable better evaluation of the rotor position information from the additional winding and thus reduce the rotor position estimation error at low speeds. Furthermore, the influence of the additional winding on the performance of the machine should be reduced further. A possible design is shown in Figure 4, which, in contrast to the current prototype, has a more detailed additional winding.

- [1] Stefan Lücke. *Regelung von Induktionsmaschinen im gesamten Drehzahlbereich ohne Gebersystem*. TEWISS Verlag, 2022.

Aktive Geräuschkompenstation von Windenergieanlagen (DampedWEA)

von Jonas Henkenjohann, M.Sc.
und Dapu Zhang, M.Sc.

In der Mehrheit der Bevölkerung herrscht der Konsens, dass Elektromotoren leise sind. Im Vergleich zu Verbrennungsmotoren ist diese Annahme auch vollkommen legitim. Jedoch treten durch den geringen Geräuschpegel im Betrieb von Elektromotoren weitere Phänomene auf, denen im Bereich der Verbrennungstechnik bisher kaum Beachtung geschenkt werden musste. Unter anderem sind hier die Resonanzerscheinungen der mechanischen Struktur wie z.B. des Gehäuses oder des Stators entscheidend. Sie sorgen dafür, dass, wenn resonanznah angeregt, die elektrische Maschine tonale Einzeltöne abstrahlt. Gerade diese separaten Einzeltöne werden allerdings vom Menschen als besonders störend empfunden. Dies stellt Windenergieanlagenhersteller vor Probleme, da strenge Richtlinien bezüglich der Schallemissionen eingehalten werden müssen. Im Projekt DampedWEA befassen sich beide Fachgebiete des IAL in enger Zusammenarbeit mit Abhilfemaßnahmen bei getriebelosen Windenergieanlagen.

Active noise compensation of wind turbines (DampedWEA)

by Jonas Henkenjohann, M.Sc.,
and Dapu Zhang, M.Sc.

There is a belief among the majority of the population that electric motors are quiet. Compared to internal combustion engines, this assumption is completely valid. However, due to the low noise level during operation of electric motors, other phenomena occur which have so far received little attention in the field of combustion engine. Among other things, the resonance phenomena of the mechanical structure, such as the housing or stator, are decisive here. These ensure that, when excited, the electrical machine emits tonal sounds. However, it is precisely these separate individual tones that are perceived by humans as particularly disturbing. This fact creates problems for the wind turbine manufacturers, as they have to comply with strict guidelines regarding sound emissions. In the DampedWEA project, both departments of the IAL are working closely together on mitigation measures for the application field of gearless wind turbines.

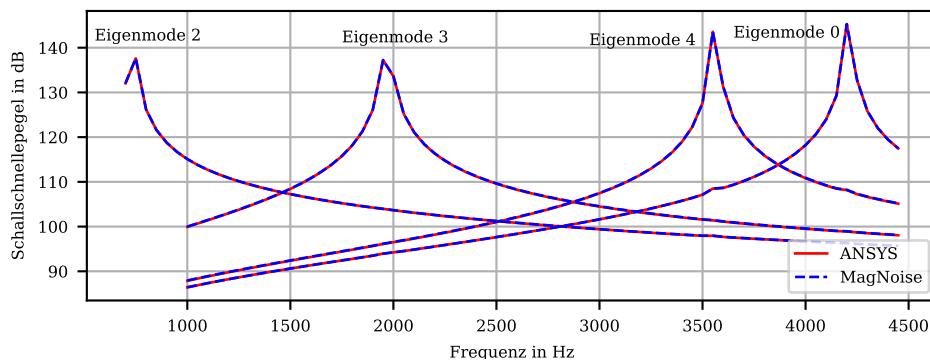


Abb. 5: Vergleich der Schwingungsberechnung zwischen MagNoise und ANSYS
Fig. 5: Comparison of the vibration calculation between MagNoise and ANSYS Mechanical

Ein wichtiger Forschungsbereich ist die zeiteffiziente Vorausberechnung der Magnetgeräusche. Hierfür ist in den letzten Jahren die Software „MagNoise“ entstanden. Kern der Berechnungsmethodik MagNoise ist eine modale Übertragungsfunktion von den Knoten an der Statorbohrung, an denen die maxwellschen Grenzflächenkräfte angreifen, zu den Knoten auf der Oberfläche des Stators. Die Übertragungsfunktion wird aus der Modalwertmatrix eines strukturmechanischen FEM-Modells ermittelt. Durch die Modellierung der vollständigen Geometrie in einer FEM-Software besitzt die Übertragungsfunktion eine hohe Genauigkeit. Mithilfe der modalen Transformation sind alle anderen Knoten au-

An important research area is the time-efficient prediction of magnetic noise. In this context, the software “MagNoise” has been developed in the last few years. The core of the MagNoise calculation methodology is a modal transfer function linking the nodes at the bore radius of the stator, on which the force acts, to the nodes on the outer surface of the stator. The transfer function can be derived from the modal matrix of a structural mechanical FEA model. By modeling the complete geometry in the numerical simulation, the transfer function obtained has a high accuracy. With the help of the modal transformation, all other nodes except for the nodes at the bore radius and on the outer surface in the FEA

Bei den Knoten an Bohrung und Außenkontour im FEM-Modell irrelevant und werden bei der Schwingungsberechnung nicht mehr berücksichtigt. Dadurch können die Datensätze in der Schwingungsberechnung auf 1% reduziert und die Rechenzeit ohne Genauigkeits-Einbußen um 99,9% verringert werden [2]. Im Rahmen des Projekts wurde die Berechnungsmethodik MagNoise aufgrund der Besonderheiten eines Windenergiegenerators auf der Rotorseite erweitert und zur Schwingungsvorausberechnung am Rotorgurt und Rotorflansch verwendet.

model become irrelevant and are no longer considered in the vibration calculation. Thus, the data sets in the vibration calculation can be reduced to 1% of their original size and the calculation time can be dramatically reduced without loss of accuracy. Within the scope of the project, the MagNoise calculation methodology was extended to cope with the special features of a wind energy generator considered on the rotor side and used for vibration prediction of the rotor belt and rotor flange.

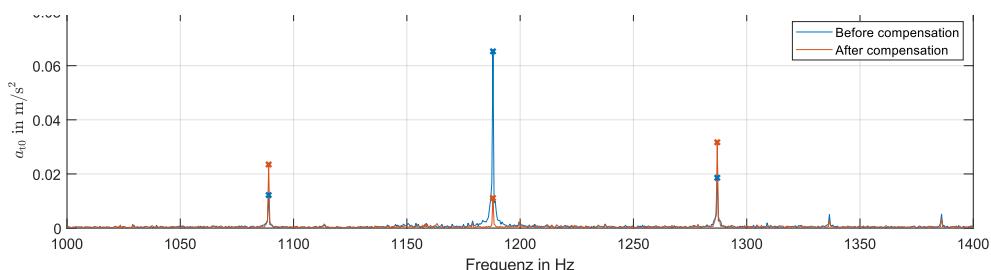


Abb. 6: Vergleich des Spektrums der Beschleunigung der Mode 0 vor und nach der Kompensation

Fig. 6: Comparison of the spectrum of mode 0 acceleration before and after compensation

Des Weiteren forscht das IAL im Bereich der aktiven Geräuschkompenstation. Das Ziel ist es hierbei, durch das Einprägen von Oberschwingungsströmen die Anregung von zu verhindern. Die entwickelte Methode sieht dadurch aus, dass die in vielen Antrieben kritische Schwingungsform (Mode) Null durch das Einprägen von Oberschwingungsströmen kompensiert werden kann. Als Alleinstellungsmerkmal wird im Projekt DampedWEA zur Bestimmung der benötigten Oberschwingungsströme kein geschlossener Regelkreis verwendet. Stattdessen basiert die Berechnung der benötigten Oberschwingungsströme auf der in [3] vorgestellten theoretischen Beschreibung. Es hat sich gezeigt, dass durch die verwendeten Methoden eine nahezu vollständige Kompenstation der akustisch kritischen Schwingungen erreicht werden konnte (vgl.: Abb. 6). Im Rahmen des Projekts wurde darüber hinaus evaluiert, inwie weit die Methoden aus [3] auf sechsphasige Maschinen übertragbar sind. Durch die zusätzlichen Freiheitsgrade von sechsphasigen Maschinen entsteht die Möglichkeit, auch Oberwellen der Flussdichte mit höheren räumlichen Ordnungen für die Kompenstation zu beeinflussen. Dieser Ansatz wird „Harmonic Field Injection“ (HFI) genannt und wurde in [4] veröffentlicht.

- [3] Andresen, J. et al. "Theory of Influencing the Breathing Mode and Torque Pulsations of Permanent Magnet Electric Machines with Harmonic Currents". In: *EPE'20 ECCE Europe*. 2020.

Furthermore, IAL conducts research in the field of active noise compensation. The aim here is to prevent the excitation of resonances by injecting harmonic currents. The developed method is characterized by the fact that the critical oscillation form (mode) zero in many drives can be compensated by injecting harmonic currents. As a unique feature, the DampedWEA project does not use a closed loop to determine the required harmonic currents. Instead, the calculation of the required harmonic currents is based on the theoretical description presented in [3]. It has been shown that by following these methodologies, almost complete compensation of the acoustically critical oscillations could be achieved (cf.: Fig. 6). The project also evaluated the extent to which the methods from [3] can be applied to six-phase machines. Due to the additional degrees of freedom of six-phase machines, the possibility also arises of using harmonics of the flux density with higher spatial order for the compensation. This approach is called "Harmonic Field Injection" (HFI) and has been published in [4].

- [2] Stephan Vip. "Zeiteffiziente Berechnung der Magnetgeräusche drehzahlvariabler elektrischer Maschinen". Dissertation. Hannover, 2021.
- [4] Henkenjohann, J. et al. "Comparison of Magnetic Noise Compensation Techniques for Dual Three-Phase Electrically Excited Synchronous Machines". In: *EPE'22 ECCE Europe*. 2022.

Systemsimulation zur Vorhersage von Lagerströmen sowie elektromagnetischer Verträglichkeit

von Cara-Nastasja Behrendt, M.Sc.,
Pauline Höltje, M.Sc. und
Lennart Jünemann, M.Sc.

In elektrischen Antriebssystemen werden zunehmend Elektromotoren mit Frequenzumrichterspeisung eingesetzt. Moderne Frequenzumrichter, vor allem mit Wide-Bandgap (WBG)-Leistungshalbleitern, erreichen hohe Spannungsgradienten und ermöglichen einen dynamischen Betrieb mit geringen Schaltverlusten. Dies führt jedoch zu einer elektrischen Beanspruchung der Lager und anderer Maschinenelemente. Maschinenelemente, die einer kritischen elektrischen Belastung ausgesetzt sind, können massiv beschädigt werden. Dies kann zum Ausfall des betroffenen Bauteils oder des gesamten Systems führen.

Am IAL wird daher an der Vorausberechnung der schädigenden Mechanismen und zugehörigen Abhilfemaßnahmen geforscht. Um schädigende Ströme vorauszuberechnen, ist es notwendig, die CM-Größen zu kennen. Dafür werden die Antriebssysteme, bestehend aus Einspeisung, Filterkomponenten, Wechselrichter, Anschlusstechnik und elektrischer Maschine, mit ihren parasitären Elementen in einem Hochfrequenzmodell (HF-Modell) abgebildet. Dies geschieht ausschließlich auf Basis von Material- und Geometriedaten, um die Vorausberechnung im frühen Entwicklungsprozess gewährleisten zu können, was die Wirtschaftlichkeit erhöht und die Time-to-market verkürzt. Die Common Mode(CM)-Spannung wird dabei häufig als trapezförmige Spannung modelliert, was allerdings zu unrealistischen Ergebnissen führt. Grund dafür sind die vernachlässigten Überspannungen, die bei der Kommutierung entstehen. Außerdem kann es durch ungenaue Modellierung der Spannungsflanken zu Unterschieden in den Frequenzspektren kommen. Um diese unzulässige Modellierung zu verbessern, müssen für die Vorausberechnung der Wechselrichterausgangsspannungen sowie der CM-Größen die nicht idealen Ersatzschaltbildelemente berücksichtigt werden. Dazu gehören die Einspeisung, die Filterkomponenten, die Leistungsmodule und die Anschlusstechnik. Dabei werden die parasitären Elemente berücksichtigt sowie die Kopplungen der einzelnen Ersatzschaltbildelemente. Auf die Wechselrichterausgangsüberspannungen hat die Streuinduktivität der Kommutierungszeile, also die Verschienung des Zwischenkreiskondensators mit der Halbbrücke im Wechselrichter, einen Einfluss. Daher muss dieser Pfad möglichst

System simulation for prediction of bearing currents as well as electromagnetic compatibility

by Cara-Nastasja Behrendt, M.Sc.,
Pauline Höltje, M.Sc.,
and Lennart Jünemann, M.Sc.

Electric motors with frequency inverter supplies are increasingly being used in electric drive systems. Modern frequency inverters, especially using wide-bandgap (WBG) power semiconductors, achieve high voltage gradients and enable dynamic operation with low switching losses. However, this results in electrical stress on the bearings and other machine elements. Machine elements exposed to critical electrical stress can be massively damaged. This can lead to failure of the affected component or the entire system. Research is therefore being carried out at the IAL on the prediction of the damaging mechanisms and the associated remedial action.

In order to predict damaging currents, it is necessary to know the CM quantities. For this purpose, the drive systems, consisting of the source, filter components, inverter, connection technology and electrical machine, are modeled together with their parasitic elements in a high-frequency model (HF model). This is performed on the basis of geometric data in order to be able to guarantee a prediction in the early development process, which increases cost-effectiveness and shortens the time to market. The CM voltage is often modeled as a trapezoidal voltage, but this leads to invalid results. The reason for this can be traced back to the neglected overvoltages that occur during commutation. In addition, inaccurate modeling of the voltage edges can lead to differences in the frequency spectrum.

To improve this improper modeling, the non-ideal equivalent circuit elements must be considered for accurate prediction of inverter output voltages as well as the CM values. These include filter components, power modules, and connection technology. The real parasitic elements are considered as well as couplings of the individual equivalent circuit elements. The stray inductance of the commutation cell, the DC link capacitor and the half bridges in the inverter, has an influence on the inverter output overvoltages. Therefore, this path must be mapped in as much detail as possible in order to map an in-depth overvoltage. For this purpose, the half-bridge modules used are modeled in a 3D model at the IAL. Figure 9 shows such a modeling of a half-bridge module. A SiC half-bridge can be seen, with power and drive paths taken into account. These models can then be used to perform simulations that are used to extract the parasitic inductances and

detailliert abgebildet werden, um eine eingehend die Überspannung abzubilden. Die verwendeten Halbbrücken werden in einem 3D-Modell abgebildet. In Abbildung 9 ist beispielsweise ein solches Modell einer SiC-Halbbrücke inklusive der Leitungs- und Ansteuerpfade dargestellt. Mit Hilfe dieser Modelle lassen sich anschließend Simulationen durchführen, die zur frequenzabhängigen Extraktion der parasitären Induktivitäten und der ohmschen Widerstände dienen. Die im Datenblatt angegebene Streuinduktivität reicht dabei für die Modellierung im Ersatzschaltbild nicht aus, da aufgrund des Skin-Effekts für hochfrequente Ströme ein anderer Induktivitätswert wirksam ist. Zusätzlich werden an den 3D-Modellen Sensitivitäten untersucht, um die benötigte Genauigkeit der zu modellierenden Komponenten festzustellen. Bei hohen Frequenzen besitzt die Spannung als Signal im Leiter so geringe Wellenlängenanteile, dass die Leiterlänge der Wicklung nicht mehr unberücksichtigt bleiben kann. Nach der Leitungstheorie ist dann die Wicklung einer Maschine zu diskretisieren, sodass jeder einzelne Leiter im Blechquerschnitt der Maschine durch das Ersatznetzwerk in Abbildung 7 abgebildet werden kann.

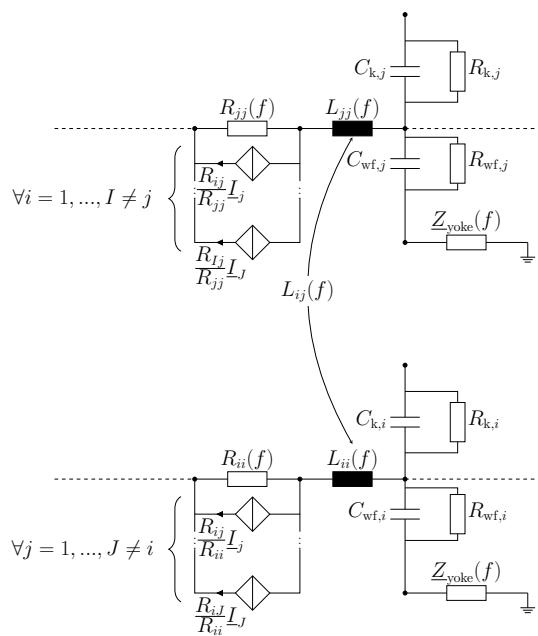


Abb. 7: Diskretisiertes Ersatznetzwerk zweier gekoppelter Leiter [5]

Fig. 7: Discretized equivalent network of two coupled conductors [5]

Durch diesen Ansatz der Wicklungsmodellierung lässt sich die CM-Impedanz der Maschine mit einer hohen Übereinstimmung zur Messung, wie in Abbildung 10 zu sehen, vorausberechnen. Zusammen mit der modellierten CM-Spannung lässt sich daraus der CM-Strom als Ausgangspunkt zirkularer Lagerströme bestimmen. Weist das Lager im Betrieb ein ohmsch-induktives Verhalten auf,

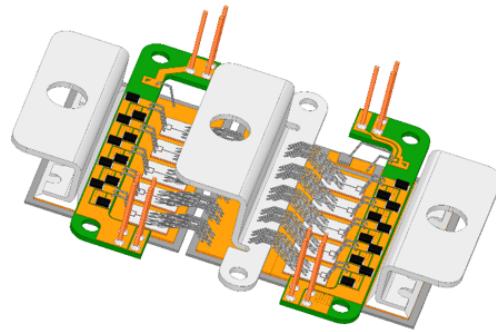


Abb. 9: 3D-Modell eines SiC-Leistungsmoduls
Fig. 9: 3D-model of a SiC power module

ohmic resistances. The leakage inductance specified in the data sheet is not sufficient for modeling in the equivalent circuit, since a different inductance value is effective for high-frequency currents due to the skin effect. At high frequencies, the voltage as a signal in the conductor has such a small wavelength that the conductor length of the winding can no longer be neglected. According to the transmission line theory, the winding of a machine needs to be discretized in such a way that each individual conductor in the cross-section of the machine can be represented by the equivalent network in Figure 7.

This approach to winding modeling allows the CM impedance of the machine to be predicted with a high degree of agreement to the measurements, as seen in Figure 10. Together with the modeled CM voltage, the CM current, as the cause of circulating bearing currents, can be determined.

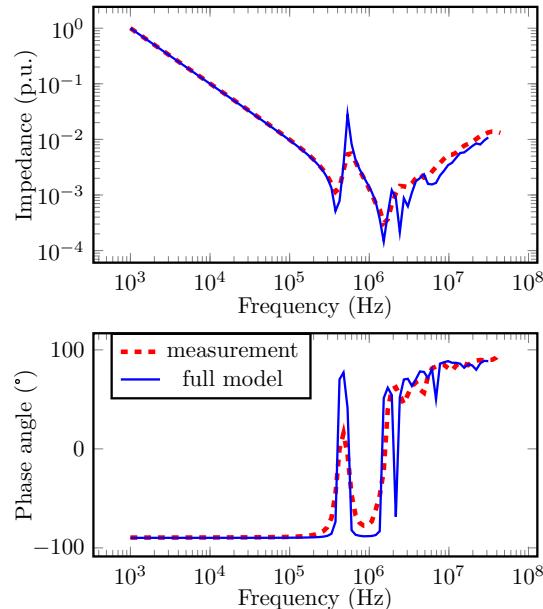


Abb. 10: Frequenzabhängigkeit der CM-Impedanz eines Stators [5]

Fig. 10: Frequency dependence of the CM impedance of a stator [5]

können zirkulare Lagerströme durch die Kontakte zwischen Wälzkörpern und Laufrinne des Lagers fließen. Für die Vorausberechnung des zirkularen Lagerstroms bedarf es daher eines ohmsch-induktiven Ersatznetzwerks, welches alle möglichen Pfade des Stroms durch das Gehäuse und die Maschinenelemente abbildet. Jedem Teilpfad wird dabei eine Impedanz zugeordnet, die sich auf Basis von Geometrie- und Materialparametern berechnen lässt. Zusammen mit der vom CM-Strom induzierten Wellenspannung lässt sich der auftretende zirkulare Lagerstrom aus dem Verhältnis der Wellenspannung und der Gesamtimpedanz des Netzwerks bestimmen. Die Belastung der einzelnen Maschinenelemente durch diesen zirkularen Lagerstrom kann letztlich durch die Beschreibung des Stromteilers ermittelt werden. Im Betrieb kann und soll sich ein isolierend wirkender Schmierfilm zwischen den Wälzkörpern und den Laufrinnen ausbilden. Das Lager weist dann ein ohmsch-kapazitives Verhalten auf. Dies führt in Verbindung mit der galvanischen Trennung des Statorblechs, der Statorwicklung und des Rotors dazu, dass sich ein kapazitiver Spannungsteiler über dem Antriebs-system aufbaut. Ein Electric-Discharge-Machining-Strom (EDM-Strom) entsteht, sobald die an den Lagern anliegende Spannung die Durchschlagsspannung des Schmierfilms übersteigt. Für die Modellierung der EDM-Lagerströme ist es notwendig, die Kapazitäten der Aktivteilkomponenten sowie die der Lager zu bestimmen. Die Lagerkapazitäten sind abhängig von der Temperatur, dem Schmierstoff, der Lagergeometrie und dem jeweiligen Betriebspunkt.

Messung von Lagerströmen

Um die Modellierungen zu validieren, werden am IAL auch verbesserte Verfahren zur Messung von Lagerströmen erarbeitet. Für die Messung von Lagerströmen ist ein Umbau eines üblichen Antriebs-systems notwendig: Zunächst werden wie bisher die Lager vom Gehäuse durch Einbringen einer Isolationsschicht getrennt und somit die Lagerstrompfade unterbrochen. Im nächsten Schritt wird durch eine neuartige Messplatine die Isolierung überbrückt, so dass ein definierter zu- und abschaltbarer Pfad für den Lagerstrom entsteht. Durch gezieltes Durch-schalten der einzelnen Messplatten an den Lagern kann nun jeweils der EDM-Lagerstrom oder der zirkulare Lagerstrom aufgenommen werden. Diese Methodik ermöglicht die Messung auch in serienreifen Anrieben, bei denen wenig Bauraum rund um die Lager zur Verfügung steht. Außerdem bietet die Methode der Messplatine den Vorteil, dass der Pfad des Lagerstroms nur minimale Änderungen erfährt, sodass es keine Beeinflussung durch zusätzlich integrierte Impedanzen gibt.

Abbildung 8 zeigt eine Messung der CM-Spannung,

If the bearing exhibits resistive-inductive characteristics during operation, circulating bearing currents can flow through the contact between the rolling element and the race of the bearing. Therefore, to predict the circulating bearing current, a resistive-inductive equivalent network is required, which includes all possible paths of the current through the housing and the machine elements. Each part of the path is assigned to an impedance that can be calculated based on geometry and material parameters. Together with the shaft voltage, which is induced by the CM current, the circulating bearing current can be derived as the ratio between the shaft voltage and the total impedance of the network. The stress on the individual machine elements by this circulating current can be determined caused by the description of the current divider.

In operation, an insulating lubricant film can build up between the rolling elements and the races. As a result, the bearing shows a resistive-capacitive behavior. Together with the galvanic isolation of the stator plate, the stator winding and the rotor, this behavior creates a capacitive voltage divider across the drive system. An electric discharge machining (EDM) current occurs as soon as the voltage applied to the bearings exceeds the breakdown voltage of the lubricant film. To model EDM bearing currents, it is necessary to determine the capacitances of the electrical machine as well as those of the bearings. The bearing capacitances depend on the temperature, the lubricant characteristics, the bearing geometry and the respective operating point.

Measuring Bearing Currents

To validate the modeling approach, the IAL is researching on the measurement of bearing currents. For the measurement of bearing currents, a modification of a common drive system is necessary: first, the bearings are separated from the housing by inserting an insulation layer, thus interrupting the bearing current paths. In the next step, the insulation is bridged by a measuring board so that a defined path for the bearing current is created. The EDM or circulating bearing current can now be recorded by selectively switching through the individual measuring boards on the bearings. This method also enables measurement in drives where the installation space around the bearings is limited. In addition, the method using the measuring board offers the advantage that the path of the bearing current experiences only minor changes. In this way, there is no influence from additionally integrated impedances.

Figure 8 shows a measurement against time of the CM voltage, the bearing voltage, the CM current and the currents flowing through the three motor shaft bearings, whereby the bearing currents were measured with the described technique. In this case,

der Lagerspannung, des CM-Stroms und der Ströme, die durch die drei Motorlager fließen, im Zeitverlauf. Die Messungen wurden an einem Traktionsantrieb durchgeführt. Der zirkulare Lagerstrom ist ein Anteil des CM-Stroms. Im gemessenen System fließt der gesamte Lagerstrom durch das Non-Drive-End(NDE)-Lager und schließt sich durch die beiden weiteren Motorwellenlager. Die Ströme in dem Drive-End(DE)- und dem dritten (Z) Lager weisen im Vergleich zum NDE-Lager ein negatives Vorzeichen auf, da der Strom in die entgegengesetzte Richtung fließt.

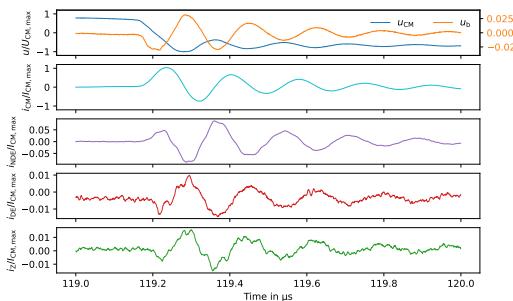


Abb. 8: Messung von Lagerströmen in einem Traktionsantrieb
Fig. 8: Measurement of bearing currents in an electric traction drive system

Optimierung von Filtern

Für eine Vorausberechnung der elektromagnetischen Störemissionen ist eine genaue Modellierung der Filter wichtig. Außerdem kann die Dämpfung des Filters optimiert werden, wenn parasitäre Stör effekte minimiert werden. Eine Optimierung wurde anhand eines CM-Filters am Wechselrichterausgang durchgeführt. In der Optimierung wurde die Anordnung der Komponenten variiert, sodass die magnetischen Kopplungen minimiert werden. Die Dämpfung der verschiedenen Designs ist in Abbildung 11 gezeigt. Das Design 1 ist dabei das ursprüngliche, kompakte Design. In Design 2 wurde der Abstand der Komponenten erhöht, was auch in Design 3 umgesetzt wurde, unter zusätzlicher Verwendung eines nanokristallinen Kernmaterials bei der Drossel. Das optimierte Design 4 wurde als vierlagige Platine ausgeführt, und die Anordnung der Komponenten auf dem PCB optimiert. Dabei wurde auf die Separation der Kondensatoren geachtet, als auch auf die vertikale Aufstellung der Drossel. Mit diesem Design konnte die Dämpfung maximiert werden. Der Vergleich von Simulation und Messung zeigt eine hohe Übereinstimmung, da parasitäre Er satzschaltbildelemente und die magnetischen Kopp lungen berücksichtigt werden.

the measurements were performed on an electric traction drive system. The currents in the DE and Z bearings show a negative sign, because the current flow is in the opposite direction. In the measured system, the whole bearing current flows through the NDE bearing, closing through the other two motor shaft bearings.

Optimization of Filter

For a prediction of the electromagnetic interference emissions, an accurate modeling of the filters is important. In addition, the attenuation of the filter can be optimized if parasitic interference effects are minimized. An optimization was performed using a CM filter at the inverter output. In the optimization, the arrangement of the components was varied so that the magnetic couplings are minimized. The attenuation of the different designs is shown in Fig. 11 Design 1 is a very compact design in this case. In design 2, the spacing of the components was increased, which was also done in design 3, using a nanocrystalline core. The optimized Design 4 was made as a four-layer board, and the arrangement of the components on the PCB was optimized. The comparison of simulation and measurement shows high agreement, since parasitic equivalent circuit elements and the magnetic couplings are taken into account.

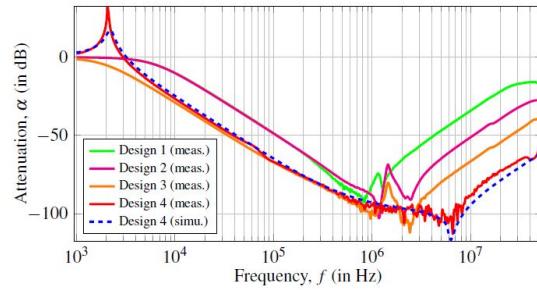


Abb. 11: Optimierung der Dämpfung von Filtern [6]
Fig. 11: Optimization of the filter attenuation [6]

- [5] Cara-Nastasia Behrendt, Jochen Dittmann, Benjamin Knebusch, and Bernd Ponick. "An Investigation Into the Trade-Off Between Full Machine and Single-Slot FEM Simulations for Electrical Machine Modeling at High Frequencies With Respect to Inter-Wire Couplings". In: *2022 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*. 2022, pp. 2242–2248.
- [6] Mohammad Ali, Friebe Jens, and Axel Mertens. "Design and Comparison of Output Filter Configurations for SiC-MOSFET-Based Automotive DC-AC Inverters". In: *2022 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. 2022, pp. 1–8.

SE²A - Sustainable and Energy-Efficient Aviation

von Janine Ebersberger, M.Sc.
und Ralf Keuter, M.Sc.

Im Rahmen des Exzellenzclusters *Sustainable and Energy-Efficient Aviation* forscht das IAL seit 2019 an Antriebssträngen für zukünftige elektrisch betriebene Verkehrsflugzeuge. 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 hoch ausgenutzter elektrischer Maschinen erarbeitet. Grundsätzlich stellt sich bei der Dimensionierung der Komponenten die Frage, ob diese hinsichtlich eines geringen Gewichts oder eines hohen Wirkungsgrads optimiert werden sollten, damit das Gesamtgewicht des Flugzeugs möglichst gering ist. Um dies zu beantworten, wurden die Komponenten zuerst einzeln und dann im System betrachtet. Für den 2MW-Antriebswechselrichter wurden verschiedene Topologien hinsichtlich ihres Wirkungsgrads und ihrer Leistungsdichte verglichen [7]. Teil der Betrachtung sind 2-Punkt-, 3-Punkt- sowie modulare Multilevel-Wechselrichter. Es konnte festgestellt werden, dass vor allem der "Active Neutral Point Clamped" (ANPC)-Wechselrichter eine gute Kombination aus Wirkungsgrad und Leistungsdichte bietet (siehe Abbildung 12). Zusätzlich hat diese Topologie auch ein gewisses Potenzial hinsichtlich des Weiterbetriebs nach einem Fehler [8]. Zur Beurteilung des

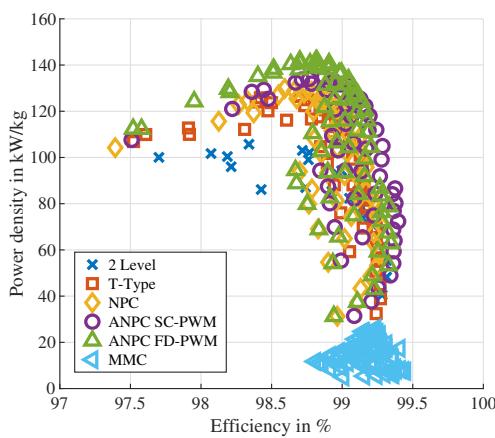


Abb. 12: Vergleich von Leistungsdichte und Wirkungsgrad verschiedener Wechselrichtertopologien. Jeder Punkt stellt einen Auslegungspunkt dar. Es wurden die Zwischenkreisspannung und die Schaltfrequenz bei konstanter Ausgangsleistung von 2.87 MW variiert. [7]
Fig. 12: Comparison of power density and efficiency for different inverter topologies. Each point represents one design point. The DC-link voltage and switching frequency are varied at a constant output power of 2.87 MW.

SE²A - Sustainable and Energy-Efficient Aviation

by Janine Ebersberger, M.Sc.,
and Ralf Keuter, M.Sc.

As part of the Cluster of Excellence *Sustainable and Energy-Efficient Aviation*, IAL has been researching drivetrains for future electrified aircraft since 2019. System aspects such as different topologies, heat dissipation, redundancy and reliability as well as fundamental research in the field of power semiconductors are being considered. In addition, methods for the sizing of highly utilized electrical machines tailored to specific requirements are developed. In general, designing the components poses the question whether they should be optimized with respect to low weight or high efficiency, in order to keep the total weight of the aircraft as low as possible. To answer this, the components were first considered individually and then in a system analysis. For the 2 MW inverter, various topologies were compared in terms of their efficiency and power density [7]. 2-level and 3-level inverters from part of the research, together with modular multilevel converters. Especially the active neutral point clamped (ANPC) inverter offers a good combination of efficiency and power density, see Fig. 12. In addition, this topology has some potential for useful post-fault performance [8]. To eval-

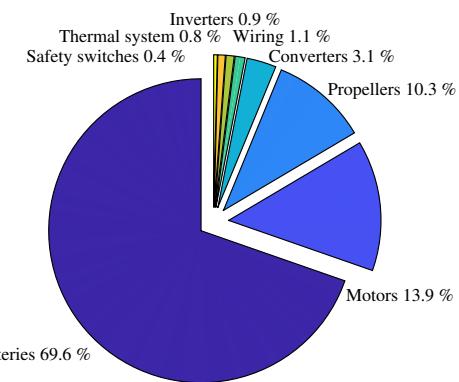


Abb. 14: Gewichtsverteilung des optimalen Entwurfs für das elektrische Energie- und Antriebssystem aus der Fallstudie zu einem Zubringerflugzeug.[9]

Fig. 14: Weight distribution of the optimized design for the electrical power and propulsion system from the case study regarding a commuter aircraft.

uate the overall system, a study was conducted using a commuter aircraft with room for two pilots and 7 - 9 passengers [9]. Here, all components of the electrical power system were considered, such as the batteries, cables, inverters, converters, motors and propellers. Fig. 14 shows the weight distribution of the optimized design. As can be seen, the batteries make up the largest share of the total weight. For the other components, this means that high effi-

Gesamtsystems wurde eine Studie mit einem Zuliefererflugzeug durchgeführt, das Platz für zwei Piloten und 7 - 9 Passagiere hat [9]. Hier wurden alle Komponenten des elektrischen Energiesystems wie zum Beispiel die Batterien, die Kabel, die Wechsel- und Gleichrichter, die Motoren und die Propeller betrachtet. In Abbildung 14 ist die Gewichtsverteilung des optimierten Entwurfs dargestellt. Wie zu sehen ist, haben die Batterien den größten Anteil am Gesamtgewicht. Das bedeutet für die übrigen Komponenten, dass bei der Auslegung ein hoher Wirkungsgrad besonders wichtig ist. Dennoch dürfen die Komponenten zugunsten eines höheren Wirkungsgrads nicht zu schwer werden.

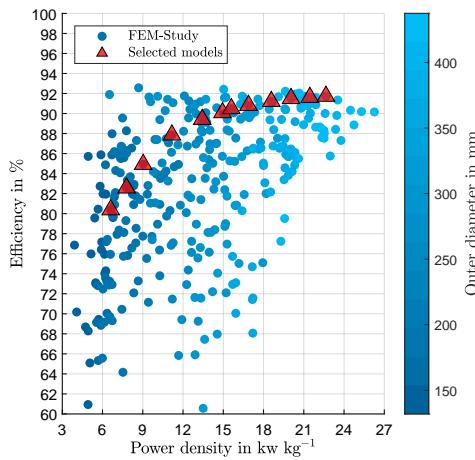


Abb. 13: Einfluss des Außendurchmessers auf die

Leistungsdichte und den Wirkungsgrad aus [10]

Fig. 13: Impact of the outer diameter of the motor on power density and efficiency shown in [10]

Die Kenntnisse über die anforderungsgerechte Dimensionierung der elektrischen Maschine sind dabei von besonderer Bedeutung. Der Bauraum für die elektrische Maschine, insbesondere der verfügbare Durchmesser hinter dem Propeller, konnte in Zusammenarbeit mit dem Institut für Flugantriebe und Strömungsmaschinen (IFAS) der TU Braunschweig definiert werden [10]. Hierbei wurde der positive Einfluss eines höheren Durchmessers auf die elektrische Maschine untersucht. Insbesondere das sogenannte Split Ratio i konnte als Parameter identifiziert werden, um sowohl Leistungsdichte als auch Wirkungsgrad zu steigern. Die Stromdichte zeigt sich als Parameter mit dem größten Einfluss sowohl auf die Leistungsdichte als auch den Wirkungsgrad. Eine Steigerung der Stromdichte erfordert jedoch intensive Kühlungsmethoden wie die direkte Leiterkühlung. Hinsichtlich dieser Kühlungsmethode wurde ein Prüfstand konstruiert, mit dem in der kommenden zweiten Phase von SE²A detaillierte Entwärmungsuntersuchungen durchgeführt werden. Zudem wird der Einfluss einer Phasen-Wechsel-Kühlung auf das Maschinenverhalten untersucht.

ciency is particularly important in the design. However, the components should not become too heavy in the pursuit of higher efficiency.

Knowledge of the requirements-based sizing of the electric motor is of major importance. The installation space, in particular the available diameter behind the propeller, could be defined in cooperation with the Institute of Aircraft Propulsion and Turbomachinery (IFAS) of TU Braunschweig [10]. In this publication, the positive influence of a higher diameter on the performance of the electric motor was investigated. In particular, the so-called split ratio i could be identified as a parameter associated with increases in both power density and efficiency. Current density is shown to be the parameter with the largest influence on both power density and efficiency. However, increasing the current density requires intensive cooling methods such as direct liquid cooling. Regarding this cooling method, a test rig has been constructed and detailed investigations will be carried out in the upcoming second phase of SE²A. In addition, the influence of phase-change cooling on motor behavior will be investigated.

- [7] Janine Ebersberger, Maximilian Hagedorn, Malte Lorenz, and Axel Mertens. "Potentials and Comparison of Inverter Topologies for Future All-Electric Aircraft Propulsion". In: *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics* 10.5 (2022), pp. 5264–5279. DOI: 10.1109/JESTPE.2022.3164804.
- [8] Yongtao Cao, Leon Fauth, Axel Mertens, and Jens Friebe. "Comparison and Analysis of Multi-State Reliability of Fault-Tolerant Inverter Topologies for the Electric Aircraft Propulsion System". In: *2021 24th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. 2021, pp. 766–771. DOI: 10.23919/ICEMS52562.2021.9634654.
- [9] Janine Ebersberger, Leon Fauth, Ralf Keuter, Yongtao Cao, Yannik Freund, Richard Hanke-Rauschenbach, Bernd Ponick, Axel Mertens, and Jens Friebe. "Power Distribution and Propulsion System for an All-Electric Short-Range Commuter Aircraft—A Case Study". In: *IEEE Access* 10 (2022), pp. 114514–114539. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3217650.
- [10] Ralf Keuter, Bastian Kirsch, Jens Friedrichs, and Bernd Ponick. "Design Decisions for a Powertrain Combination of Electric Motor and Propeller for an Electric Aircraft". In: *IEEE Access* (Submission in 2023).

Sustainable and Energy Efficient Aviation (SE²A): Höhenstrahlungseffekte bei Leistungshalbleitern

von Christian Beckemeier, M.Sc.
und Leon Fauth, M.Sc.

Die im DFG geförderten Excellence-Cluster "Sustainable and Energy Efficient Aviation" (SE²A) untersuchten Varianten der Elektrifizierung von Flugzeugen sind im großen Maße auf leistungselektronische Wandler als Schnittstelle zwischen den unterschiedlichen Spannungs- und Stromformen angewiesen. Die sehr großen Leistungen im Bereich mehrerer Megawatt können über ein Hochspannungsgleichstrom-Netz übertragen werden, um die Leitungsverluste gering zu halten. Dafür werden Gleichspannungswandler zur Anpassung der Batterie- oder Brennstoffzellen-Spannung auf die HVDC-Spannung benötigt, außerdem dreiphasige Wechselrichter für die elektrischen Maschinen. Durch die große Anzahl leistungselektronischer Wandler und die hohe Leistung ist in Summe eine sehr große Chipfläche der leistungselektronischen Bauelemente im Bereich einiger hundert Quadratzentimeter zu erwarten. Neben den klimatischen Bedingungen wie reduziertem Druck und extremen Temperaturen ist die Höhenstrahlung eine weitere Ausfallsursache von Leistungselektronik in Flugzeug-Anwendungen. Durch das Auftreffen von Neutronenstrahlung auf den Leistungshalbleiter werden sogenannte Single Event Effects (SEE) ausgelöst. Am relevantesten sind die Single Event Burnouts (SEB). Ein Neutron aus der Umgebungsstrahlung trifft auf den Leistungshalbleiter und kann durch Kern-Wechselwirkungen schwere Ionen bilden. Diese können ihre Energie dann im aktiven Bereich des Bauteils abgeben. Es bildet sich in der Folge ein Streamer aus, welcher das Bauteil kurzschießen und damit zerstören kann. Die Wahrscheinlichkeit derartiger Ausfälle ist von drei Faktoren abhängig. Zuerst ist die Anzahl der Neutronen in typischen Flughöhen deutlich höher als in Bodennähe, und damit auch die Anzahl der Ausfälle. Zweitens steigt die Anzahl der Ausfälle mit der Chipfläche, da eine größere Auftrittsfläche für die Neutronen vorhanden ist. Zuletzt sorgt eine höhere Spannung für eine stärkere Beschleunigung der schweren Ionen im Leistungshalbleiter, was einen zerstörerischen Kurzschluss wahrscheinlicher macht. Eine typische Ausfallwahrscheinlichkeit von Leistungshalbleitern in Abhängigkeit von der Spannung als FIT-Rate (1 Fehler pro 10^9 Stunden pro cm^2 Chipfläche) ist in Abb. 15 dargestellt. Diese Daten variieren zwischen verschiedenen Leistungshalbleitern und insbesondere zwischen den verwendeten Materialien. So zei-

Sustainable and Energy Efficient Aviation (SE²A): Cosmic radiation effects on power semiconductors

by Christian Beckemeier, M.Sc.,
and Leon Fauth, M.Sc.

The electrification of aircraft, which is being investigated in the DFG-funded Excellence Cluster "Sustainable and Energy Efficient Aviation" (SE²A), is largely dependent on power electronic converters as interfaces between the different voltage and current domains. The very large powers, typically in the range of several megawatts, can be distributed via a high-voltage direct current (HVDC) grid in order to reduce the conduction losses. Therefore, especially when using multiple parallel energy sources, DC/DC converters are necessary to adapt the battery or fuel cell voltage to the HVDC voltage. Additionally, three-phase inverters are necessary to drive the electric motors. Due to the large number of power electronic converters and the very high power, the power electronic components are expected to have a very large chip area of a few hundred square centimetres. Beside climatic conditions such as reduced air pressure and extreme temperatures, cosmic radiation is another cause of failure of power electronics in aircraft applications. So-called *single event effects* (SEE) can be triggered by the impact of neutron radiation on the power semiconductor. The most relevant mechanism is the *single event burnout* (SEB). A neutron from the ambient radiation hits the power semiconductor and can release heavy ions through nuclear interactions with the semiconductor lattice. These ions can then release their energy in the active area of the component. As a result, a streamer forms, which can short circuit and destroy the component. The probability of such failures depends on three factors. Firstly, the number of neutrons at typical flight altitudes is significantly higher than at sea level, and consequently a large number of failures are seen. Secondly, the number of failures increases with the chip area, since there is a larger impact area for the neutrons. Lastly, a higher voltage provides greater acceleration of the heavy ions in the power semiconductor, making a destructive short circuit more likely. A typical failure probability for power semiconductors depending on the voltage (given as the FIT rate, one failure per 10^9 hours) is shown in Fig. 15. These data vary between different power semiconductors and especially between the semiconductor materials used. For example, MOSFETs made of silicon carbide (SiC) show a significantly higher robustness than conventional silicon components. The diagram also shows that, even at medium altitudes, only a reduced range of the

gen MOSFETs aus Siliziumcarbid (SiC) eine deutlich höhere Robustheit als Silizium-Bauteile. Anhand der Darstellung ist weiterhin erkennbar, dass schon bei mittleren Flughöhen nur ein verringriger Bereich der tatsächlichen Sperrspannung des Bauteils ausgenutzt werden kann (derating). Um einen guten Kompromiss zwischen hoher Ausfallsicherheit einerseits und hoher Leistungsdichte andererseits finden zu können, müssen die FIT-Raten der Bauteile daher bekannt sein. Üblicherweise werden diese Fehlerraten in beschleunigten Messungen gewonnen. Hierbei wird mit speziellen Strahlungsquellen das natürliche Strahlungsspektrum nachgebildet und die Anzahl der Teilchen deutlich nach oben skaliert, so dass eine Messung innerhalb weniger Minuten durchgeführt werden kann. Das hat zum einen das Problem geringer Verfügbarkeit, da es nur wenige entsprechende Einrichtungen gibt. Zum anderen gilt die hier vorgenommene Skalierung zunächst nur für Anwendungen in Bodennähe, da es in Flughöhe zu Abweichungen des Strahlungsspektrums oder anderen überlagerten Einflüssen kommen kann. Am IAL wird daher zurzeit ein Langzeitversuch geplant, welcher beginnend ab 2023 durchgeführt werden soll. Es soll eine sehr große Anzahl an Bauteilen über einen Zeitraum von über einem Jahr der natürlichen Strahlung ausgesetzt werden. Durch die Durchführung auf einer alpinen Forschungsstation in 3500 m Höhe wird eine natürliche Erhöhung der Strahlung um den Faktor 12-13 erreicht. Herausfordernd hierbei ist insbesondere die autark funktionierende Mess- und Sicherheitstechnik, da ein manuelles Eingreifen in den Versuch sehr aufwendig ist. Der Versuchsaufbau ist in Abb. 16 dargestellt. Parallel dazu werden weitere beschleunigte Messungen mit den gleichen Bauteilen durchgeführt, um diese mit den Langzeitmessungen abgleichen zu können. In beiden Messungen werden zusätzlich auch neuartige Gallium-Nitrid-Transistoren (GaN) untersucht, da für diese bisher noch keine entsprechenden Daten vorhanden sind.

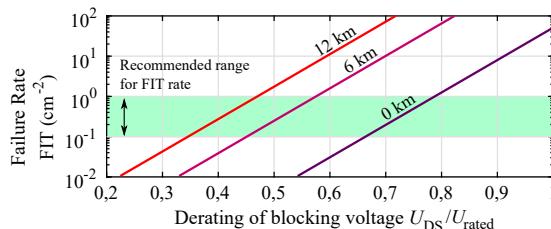


Abb. 15: Abhängigkeit der Ausfallrate von Spannung und Flughöhe für einen SiC-MOSFET.

Fig. 15: Dependence of the failure rate on voltage and flight altitude for an SiC MOSFET

actual blocking voltage of the component can be utilised (derating). In order to find a good compromise between high reliability on the one hand and high power density on the other, the FIT rates of the components must be known. Usually, these failure rates are determined in accelerated tests. These use special radiation sources to simulate the natural radiation spectrum, while the number of particles is scaled up significantly so that a measurement can be carried out within a few minutes. However, only a small number of suitable measurement facilities are in operation worldwide. Also, the scaling carried out here initially only applies to ground applications, since at flight altitude deviations in the radiation spectrum or other superimposed influences can arise. Therefore, a long-term test is currently being planned at IAL, which is to be carried out starting in 2023. A very large number of components will be exposed to natural radiation over a period of more than one year. By carrying out the experiment at an alpine research station at an altitude of 3500 m, a natural increase in radiation by a factor of 12 to 13 will be achieved. A particular challenge here is the autonomous measurement and safety technology, as manual intervention in the experiment is difficult. The experimental setup is shown in Fig. 16. Parallel to this, further accelerated measurements are to be carried out with the same components in order to compare them with the long-term measurements. In both experiments, gallium nitride transistors (GaN) are also being investigated, as no corresponding data is yet available for these.



Abb. 16: Versuchsaufbau für Langzeitmessung
Fig. 16: Measurement system for long-term tests

Modulares Antriebssystem für muskelbetriebene, kettenlose Fahrzeuge in der Mikromobilität

von Marcel Krümpelmann, M.Sc.
und Przemyslaw Lesniewski, M.Sc.

Im Rahmen des Kooperationsprojekts „ModuAnSystemos“ wird ein neuartiges, modulares Antriebssystem für die elektrische Unterstützung muskelbetriebener Fahrzeuge konzipiert und realisiert. Abbildung 17 zeigt den strukturellen Aufbau. Die-

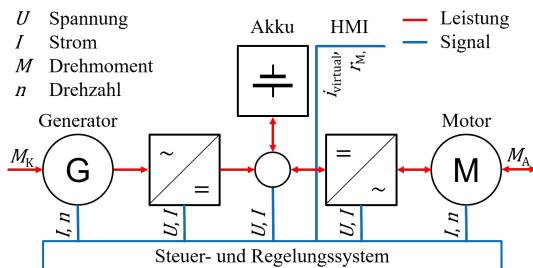


Abb. 17: Topologie des modularen Antriebssystems
Fig. 17: Topology of the modular drive system

se Topologie verzichtet auf eine mechanische Verbindung zwischen Kurbelwelle und Antriebsachse. Damit werden der mechanische Verschleiß mehrerer Komponenten (Kette, Schaltwerk etc.) vermieden und somit die Lebensdauer und die Zuverlässigkeit erhöht. Gleichzeitig können durch den Wegfall der mechanischen Verbindung völlig neue Geometrien und Fahrzeugkonzepte umgesetzt werden. Dafür wird ein innovatives Regelungskonzept entwickelt, welches dem Fahrer weiterhin das Gefühl einer festen mechanischen Kopplung zwischen Tretkurbel und Antriebsachse gibt. Das Ziel ist es, eine Proportionalität sowohl zwischen dem an der Kurbelwelle wirksamen Drehmoment M_K und dem Drehmoment an der Antriebsachse $M_A \sim M_K \cdot \frac{r_M}{i_{virtual}}$ als auch zwischen der Trittfrequenz f_K und der Fahrzeuggeschwindigkeit $v \sim f_K \cdot i_{virtual}$ zwischen der Kurbelwelle und der Antriebsachse sicherzustellen. Sowohl die virtuelle Getriebeübersetzung $i_{virtual}$ als auch das Drehmomentverhältnis r_M können frei variiert bzw. ebenfalls geregelt werden. Damit lässt sich das Fahrverhalten eines konventionellen Fahrrads ohne elektromotorische Unterstützung bis hin zu einem völlig von den Umweltbedingungen entkoppelten Fahrverhalten mit immer gleicher Trittfrequenz und konstantem Drehmoment an der Kurbelwelle realisieren. Abbildung 18 zeigt einige Größen des simulierten Gesamtsystems. Dabei wurde die virtuelle Getriebeübersetzung beliebig verstellt, um das Umschalten zwischen verschiedenen Gängen einer konventionellen Fahrradschaltung nachzuahmen.

Modular drive system for chainless muscle-powered vehicles in micromobility

by Marcel Krümpelmann, M.Sc.,
and Przemyslaw Lesniewski, M.Sc.

A novel modular drive system for electric assistance of muscle-powered vehicles is being designed and implemented as part of the cooperative project "ModuAnSystemos". Figure 17 shows the structural configuration. This topology eliminates the need for a mechanical connection between the pedals and the driven axle. This reduces the mechanical wear on several components (chain, gears, etc.) while increasing service life and reliability. At the same time, the elimination of the mechanical connection allows completely new geometries and vehicle concepts to be realised. An innovative control scheme is being developed for this purpose, which continues to give the rider the feeling of a fixed mechanical coupling between the pedals and the driven axle. The goal is to ensure proportionality between the torque M_K effective at the pedals and the torque at the driven axle $M_A \sim M_K \cdot \frac{r_M}{i_{virtual}}$ as well as between the pedal cadence f_K and the vehicle speed $v \sim f_K \cdot i_{virtual}$ determined by the driven axle. Both the virtual gear ratio $i_{virtual}$ and the torque ratio r_M can be freely varied or tightly controlled. This makes it possible to realize either the riding behaviour of a conventional bicycle without electric motor assistance or a riding behaviour completely decoupled from environmental conditions with a constant cadence and torque at the pedals. Figure 18 shows some values for the entire simulated system. The virtual gear ratio was arbitrarily adjusted to imitate shifting between different gears of a conventional bicycle. For this purpose, various machine concepts are examined with respect to their advantages and disadvantages.

Concept 1: Distributed winding in the stator with a permanently excited rotor and a V-shaped buried magnet arrangement - PMSM1 (permanently excited synchronous machine)

Concept 2: Distributed winding in the stator with an electrically excited rotor and a salient-pole design - ESM1 (electrically excited synchronous machine)

Concept 3: Tooth coil winding in the stator with one permanently excited rotor and a V-shaped buried magnet arrangement - PMSM2.

From the idea of modularity, which is an important aspect of the project, the motor and generator should use the same laminations. To determine the operating parameters, 2D FEM models have been created for concepts 1 to 3, see Fig. 19. To prove the functionality, a test bench has been set up at IAL and a test rig has also been assembled to investigate the whole drive system.

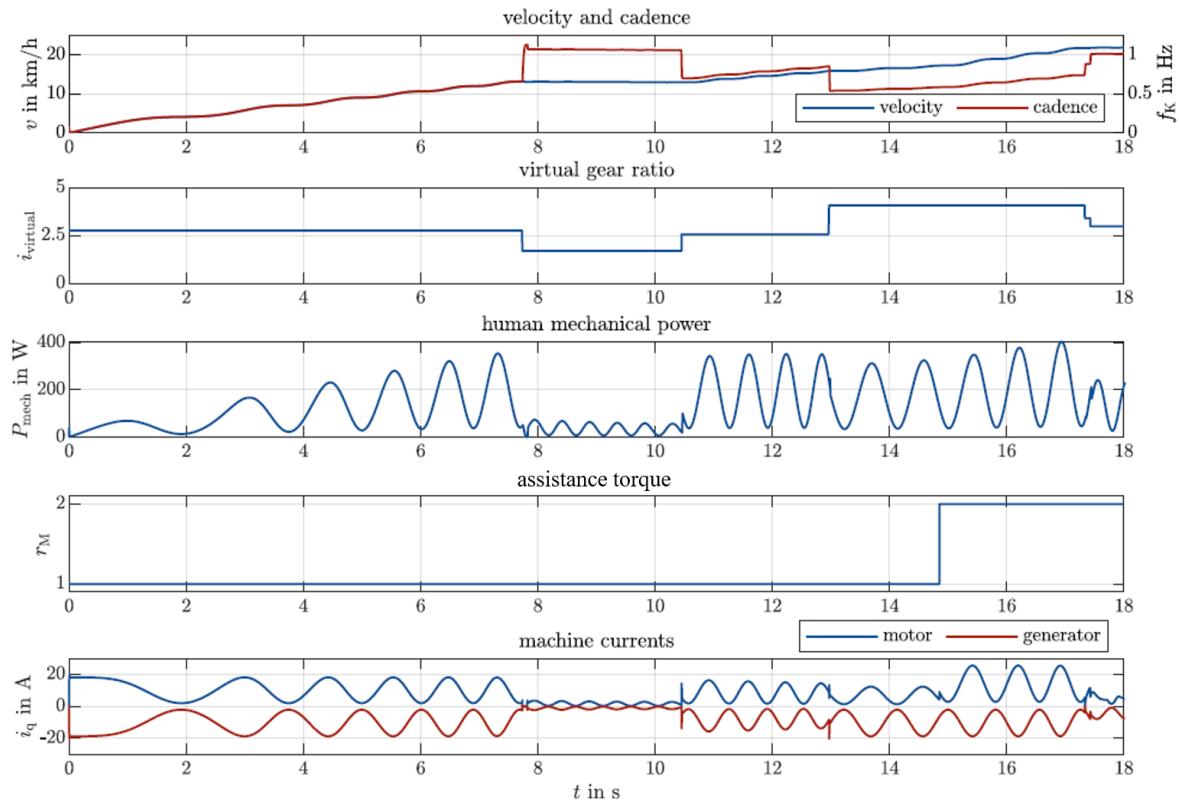


Abb. 18: Simulationsergebnisse eines durchschnittlichen Fahrradfahrers [11] auf einem Zweirad mit einer Gesamtmasse von 95 kg und einer angestrebten Trittfrequenz von 1 Hz vom Stillstand bis zu einer Fahrzeuggeschwindigkeit von $v = 22 \text{ km/h}$

Fig. 18: Simulation results for an average cyclist [11] on a 2-wheeled bicycle with a total mass of 95 kg and a desired cadence of 1 Hz from standstill to a vehicle speed of $v = 22 \text{ km/h}$

Hierzu werden verschiedene Maschinenkonzepte auf ihre Vor- und Nachteile überprüft.

Konzept 1: Verteilte Wicklung im Stator mit einem permanenterregten Rotor, V-förmig vergrabene Magnetanordnung - PMSM1 (permanenterregte Synchronmaschine)

Konzept 2: Verteilte Wicklung im Stator mit einem elektrisch erregten Rotor, Schenkelpolbauweise - ESM1 (elektrisch erregte Synchronmaschine)

Konzept 3: Zahnpulpenwicklung im Stator mit einem permanenterregten Rotor, V-förmig vergrabene Magnetanordnung - PMSM2.

Aus dem Gedanken der Modularität, die ein wichtiger Aspekt des Projekts ist, sollten Motor und Generator die gleichen Blechpakete und -schnitte besitzen. Zur Bestimmung der Betriebsparameter sind 2D-FEM-Modelle für die Konzepte 1 bis 3 erstellt worden (siehe Abbildung 19). Zum Nachweis der Funktionalität wird am IAL ein Prüfstand aufgebaut und ein Funktionsträger mit dem Antriebsystem ausgestattet.

- [11] S. D. Farahani et al. "Prediction of crank torque and pedal angle profiles during pedaling movements by biomechanical optimization". In: *Structural and Multidisciplinary Optimization* 51.1 (Jan. 2015). DOI: 10.1007/s00158-014-1135-6.

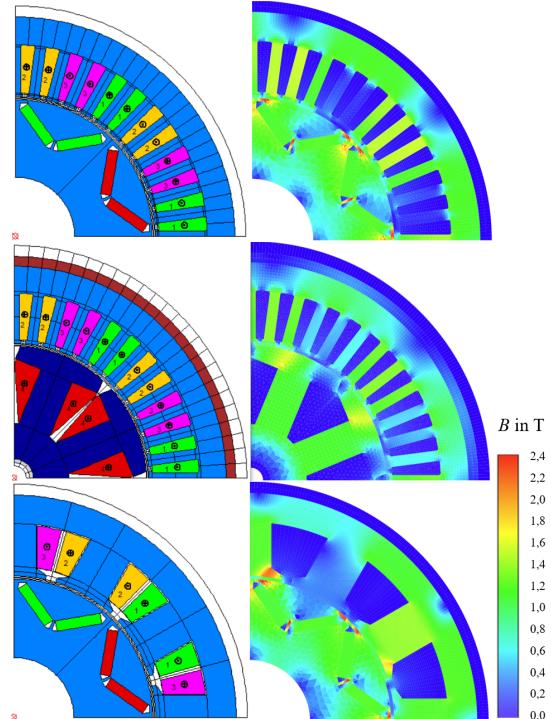


Abb. 19: FEM-Maschinenmodelle
Fig. 19: FEM machine models

Zeiteffiziente Berechnung von Ummagnetisierungsverlusten

von Anton Suchan, M.Sc.

Für die Dimensionierung und Optimierung von elektrischen Antriebssystemen ist es von großer Bedeutung die auftretenden Verluste so genau wie möglich voraus berechnen zu können. Elektrische Antriebssysteme bestehen neben der elektrischen Maschine häufig auch aus einem vorgelagerten Umrichter. Durch stetige Entwicklung im Bereich der Leistungselektronik entstehen immer neue Modulationsverfahren und Umrichtertopologien. Die overschwingungsbehafteten Ausgangsspannungen des Umrichters haben einen wesentlichen Einfluss auf die Verluste in elektrischen Maschinen. Daher werden am IAL Methoden zur Verlustberechnung entwickelt, die analytische Ansätze und das Finite-Elemente-Verfahren vereinen und die immer höhere Leistungsfähigkeit von Computern ausnutzen.

In diesem Zuge ist am IAL eine Toolkette zur zeiteffizienten Berechnung von Oberschwingungsverlusten mit besonderem Fokus auf die entstehenden Eisenverluste entstanden. Grundlage dafür bildet die Identifizierung der Maschinenparameter mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode. Dabei wird ein Kennfeld an Betriebspunkten vorausberechnet und neben Daten wie den Flussverkettungen und dem Drehmoment werden die Flussdichten in jedem finiten Element ermittelt.

Anschließend erfolgt eine semianalytische Berechnung der Strangströme basierend auf den Ausgangsspannungen des Umrichters. Dazu wird ein am IAL entwickeltes Verfahren für permanentmagnet und elektrisch erregte Synchronmaschinen verwendet. Durch eine Betrachtung in verschiedenen Frequenzbereichen und unter Verwendung der differentiellen Induktivitäten, können die umrichterbedingten Oberschwingungsströme analytisch, bei trotzdem hoher Genauigkeit, deutlich schneller als bei einer erneuten Berechnung mittels der Finite-Elemente-Methode ermittelt werden (Abb. 20 und 21).

Die zuvor ermittelten Flussdichtedaten für jedes finite Element und jeden Sättigungszustand werden als Funktion der Oberschwingungsströme betrachtet. Dadurch lassen sich mit einem Interpolationsalgorithmus die Flussdichten aller finiten Elemente bei Umrichterspeisung bestimmen. Mit dieser Information können schließlich die Eisenverluste mit Hilfe eines erweiterten Bertotti Modells [12] berechnet werden. Eine Darstellung der Berechnungsergebnisse für verschiedene Betriebspunkte findet sich in Abb. 22. Im Verlauf der Flussdichte entstehen neben der Haupthytereseschleife Subhystereseschleifen, deren Beitrag zu den Eisenverlusten berücksichtigt wird. Diese Toolkette erlaubt es, die Eisenverlus-

Time-efficient calculation of core losses

by Anton Suchan, M.Sc.

For the dimensioning and optimization of electric drive systems, it is of great importance to be able to calculate the losses occurring as accurately as possible in advance. In addition to the electrical machine, electric drive systems often include an upstream inverter. Due to continuous development in the field of power electronics, new modulation methods and inverter topologies emerge regularly. The harmonic output voltages of the inverter have a significant influence on the losses in the electrical machine. Therefore, methods for loss calculation are being developed at IAL. These combine analytical approaches with the finite-element method and exploit the ever-increasing performance of computers. In this project, a tool chain for the time-efficient calculation of harmonic losses with a special focus on the resulting iron losses has been developed at IAL. The identification of the machine parameters using the finite-element method forms the basis for this method. In this process, a map of operating points is calculated in advance and, in addition to data concerning factors like the flux linkages and the torque, the flux densities in each finite element are determined.

Subsequently, a semi-analytical calculation of the phase currents is performed based on the output voltages of the inverter. For this purpose, a method developed at IAL for permanent magnet and electrically excited synchronous machines is used. By considering different frequency ranges and using differential inductances, the harmonic currents caused by the inverter can be analytically determined significantly faster than in a subsequent calculation using the finite-element method, while still maintaining a high accuracy (Fig. 20 and 21).

The previously determined flux density data for each finite element and each saturation state are represented by a function of the harmonic currents. This allows an interpolation algorithm to determine the flux densities of all finite elements of the inverter-fed machine. With this information, the iron losses can be calculated using an extended Bertotti model [12]. Calculation results for different operating points are displayed in fig. 22. In the curve of the flux density, minor loops are formed in addition to the main hysteresis loop, and their contributions to the iron losses are taken into account. This tool chain allows the iron losses to be calculated in a time-efficient manner and in conjunction with any modulation method used by the inverter. This enables the losses of an entire drive train to be determined reliably and allows, among other things, the influence of variables such as the switching frequency or DC-link voltage

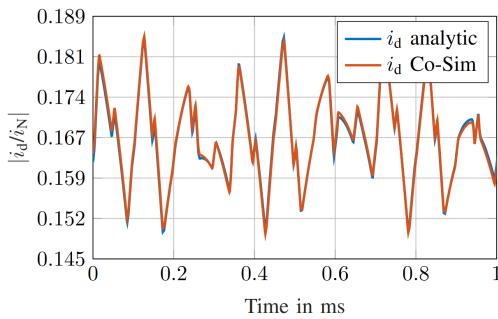


Abb. 20: Vergleich zwischen analytisch berechnetem Strom und dem Ergebnis einer transientes Co-Simulation.
Fig. 20: Comparison of the analytically calculated current and the results of a transient co-simulation.

te zeiteffizient und in Verbindung mit einem beliebigen Modulationsverfahren des Umrichters zu berechnen. Dies ermöglicht eine zuverlässige Bestimmung der Verluste eines gesamten Antriebsstrangs und erlaubt es unter anderem den Einfluss von Größen wie Schaltfrequenz oder Zwischenkreisspannung auf die Maschinenverluste zu bestimmen. Die berechneten Verluste werden mit Testmaschinen an Prüfständen validiert.

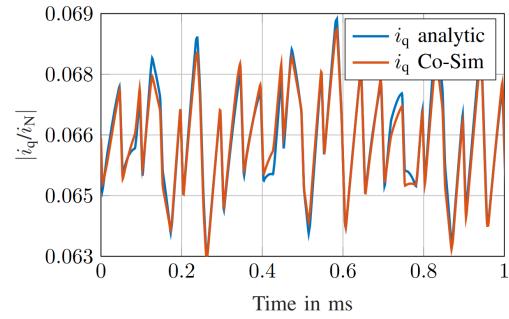


Abb. 21: Vergleich zwischen analytisch berechnetem Strom und dem Ergebnis einer transientes Co-Simulation.
Fig. 21: Comparison of the analytically calculated current and the results of a transient co-simulation.

on the machine losses to be determined. The calculated losses are validated using test machines on test benches.

- [12] Buwei Zhang. *Modellierung und hocheffiziente Berechnung der lastabhängigen Eisenverluste in permanentmagneterregten Synchronmaschinen*. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, Aug. 2019, p. 332. ISBN: 978-3-7315-0928-8. DOI: 10.5445/KSP / 1000093877.

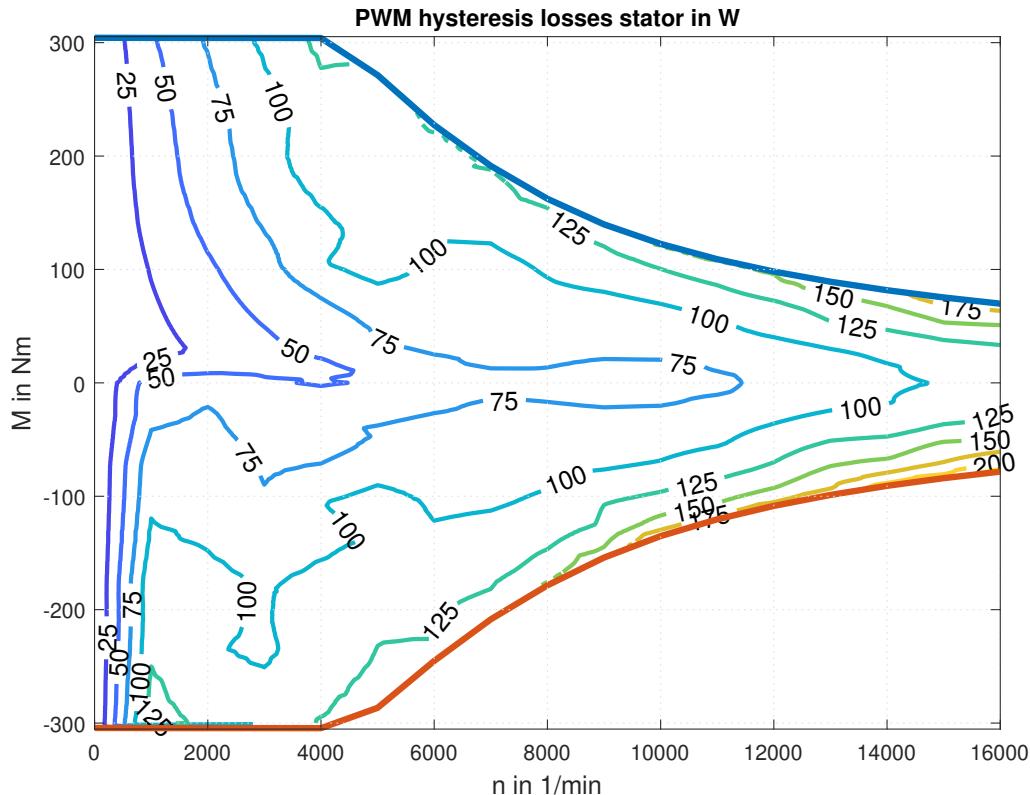


Abb. 22: Mit der Toolkette berechnete Hystereseverluste für verschiedene Betriebspunkte.
Fig. 22: Hysteresis losses for different operating points calculated with the tool chain.

Verbesserte Vorausberechnung von Wirbelstromverlusten in Permanentmagneten

von Max Hullmann, M.Sc.

Wirbelstromverluste in den Permanentmagneten (PM) von permanentmagneterregten Synchronmaschinen (PMSM) werden hauptsächlich durch vom Pulswechselrichter (PWR) herrührende Stromoberschwingungen und in luftspaltnahen PM zusätzlich durch Nutungs- und Wicklungsoberfelder verursacht. Da sich die Wärme üblicherweise schlecht aus den Rotoren von PMSM abführen lässt, kann sich schnell eine PM-Temperatur jenseits von 100°C einstellen, wenn keine entsprechenden Gegenmaßnahmen ergriffen werden. Dies senkt, insbesondere im Kurzschlussfall, die Entmagnetisierungsfestigkeit der PM, erhöht den Strombedarf der PMSM und senkt den Wirkungsgrad.

In der Berechnungspraxis erfolgt die Untersuchung der Wirbelstromverluste häufig mit aufwändigen transienten 3D-FEM-Berechnungen. Diese liefern zwar eine relativ präzise Lösung, nehmen aber insbesondere bei der Berechnung unter Berücksichtigung der Stromoberschwingungen und bei der Durchführung von Segmentierungsstudien viel Zeit in Anspruch. Darüber hinaus bindet die 3D-FEM relativ hohe Rechenkapazitäten und erfordert in der Regel kostenintensive Software-Lizenzen.

In [13] wird für rechteckige PM, die einem homogenen Wechselfeld ausgesetzt sind, ein analytisches Verfahren zur Berechnung der Wirbelstromverluste vorgestellt. Basierend auf dem Flussdichtezeitverlauf im PM, der aus einer einfachen magnetostatischen 2D-Berechnung entnommen werden kann, lassen sich mit dem Verfahren in Sekundenbruchteilen die Wirbelstromverluste berechnen. Darüber hinaus gibt das Verfahren einen allgemeinen Aufschluss darüber, wie sich die Wirbelstrompfade an den Stirnseiten des PM auf die Wirbelstromverluste auswirken. Mit der PM-Länge l , der PM-Breite w und der elektromagnetischen Eindringtiefe δ kann der Einfluss der PM-Segmentierung auf die entsprechende räumlich homogene Frequenzkomponente, die beispielsweise vom PWR verursacht wird, sehr einfach bestimmt werden (Abb. 24). Für $w/\delta < 3$ sorgt sowohl eine Axial- als auch eine Breitensegmentierung für eine Reduzierung der Wirbelstromverluste, wobei sich die Breitensegmentierung für diese Problemstellung allgemein als wirksamer herausstellt. Für $w/\delta > 3$ führt eine Axialsegmentierung zu einem Anstieg der Wirbelstromverluste, und auch bei der Breitensegmentierung sollte die Anzahl der Segmente sorgfältig gewählt werden, um eine Verlustreduzie-

Improved prediction of eddy current losses in permanent magnets

by Max Hullmann, M.Sc.

Eddy current losses in the permanent magnets (PM) of permanent magnet synchronous machines (PMSM) are mainly caused by current harmonics generated by the inverter and, in PM close to the air gap, additionally by slotting and winding harmonics. Since heat is difficult to dissipate from PMSM rotors, a PM temperature above 100°C can easily be reached if no appropriate countermeasures are taken. This lowers the demagnetisation resistance capability of the PM, especially in the case of a short circuit, increases the current requirement of the PMSM and reduces the efficiency.

In practice, the investigation of eddy current losses is often calculated with complex transient 3D FEA. Although these provide a relatively precise solution, they require a lot of time, especially when calculated taking into account the current harmonics and when carrying out segmentation studies. In addition, 3D FEA uses relatively substantial computing resources and usually requires costly software licenses.

In [13], an analytical method for the calculation of eddy current losses is presented for a rectangular PM subjected to a homogeneous alternating magnetic field. Based on the flux density in the PM, which can be taken from a simple magnetostatic 2D calculation, the method can be used to calculate the eddy current losses in just a fraction of a second. In addition, the method gives a general indication of how the eddy current paths at the endfaces of the PM affect the eddy current losses. With PM length l , the PM width w and skin depth δ , the impact of the PM segmentation on the corresponding spatially homogeneous frequency component caused, for example, by the inverter can be determined easily (Fig. 24). For $w/\delta < 3$, both axial and width segmentation provide a reduction in eddy current losses, with width segmentation generally proving more effective for this purpose. For $w/\delta > 3$, axial segmentation leads to an increase in eddy current losses, and the number of segments should also be chosen carefully for width segmentation in order to reduce losses.

As the field situation in the PM can often be very complex, due to the superposition of spatial and time harmonics, the program AMELA (Advanced Magnet Eddy-Current Analysis) has been created in cooperation with Prof. Dr.-Ing. Jens Krottsch from Aalen University / ProFEMAG AG and Dapu Zhang from IAL. The program allows the analysis of the field distribution in the PM stored with FEMAG-DC following the numerical calculation and to calculate the eddy

rung zu erzielen.

Da aufgrund der Überlagerung von räumlichen und zeitlichen Harmonischen die Feldsituation in den PM häufig sehr komplex sein kann, ist im Rahmen des Projekts in Zusammenarbeit mit Prof. Dr.-Ing. Jens Krotsch von der Hochschule Aalen bzw. von der ProFEMAG AG und mit Dapu Zhang vom IAL das Programm AMELA (Advanced Magnet Eddy-Current Analysis) erstellt worden. Das Programm erlaubt es, die mit FEMAG-DC im Anschluss an die numerische Berechnung gespeicherte Feldverteilung in den PM zu analysieren und die Wirbelstromverluste auch unter der Berücksichtigung von beliebigen Segmentierungen zu berechnen. Dazu steht zum einen das bereits erwähnte und für die Wirbelstromschleifen der höheren räumlichen Ordnungen erweiterte Verfahren und zum anderen die in [14, 15] vorgestellte Spiegelungsmethode zur Auswahl. Die Spiegelungsmethode erlaubt die Berechnung der Wirbelstromverluste unter Berücksichtigung der geometrischen Randbedingungen und ist insbesondere für die Berechnung von Feldern mit einem hohen Anteil von Ober- und Unterwellen geeignet.

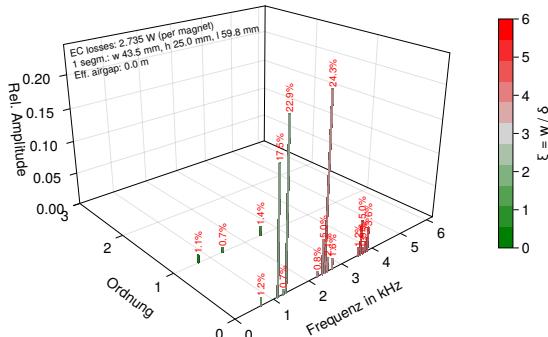


Abb. 23: Mit AMELA berechnetes Verlustspektrum.
Fig. 23: Loss spectrum calculated with AMELA.

- [13] M. Hullmann und B. Ponick. "General Analytical Description of the Effects of Segmentation on Eddy Current Losses in Rectangular Magnets". In: *2022 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*. 2022, S. 1757–1762. DOI: 10.1109/ICEM51905.2022.9910629.
- [14] L. Chen, J. Wang und S. S. Nair. "An Analytical Method for Predicting 3-D Eddy Current Loss in Permanent Magnet Machines Based on Generalized Image Theory". In: *IEEE Transactions on Magnetics*. Bd. 52. 6. 2016. DOI: 10.1109/TMAG.2015.2500878.
- [15] R. Sahu, P. Pellerey und K. Laskaris. "Eddy Current Loss Model Unifying the Effects of Reaction Field and Non-Homogeneous 3-D Magnetic Field". In: *IEEE Transactions on Magnetics*. Bd. 56. 2. 2020. DOI: 10.1109/TMAG.2019.2953110.

current losses taking into account arbitrary segmentations. For this purpose either the previously mentioned method (extended for the eddy current loops of the higher spatial orders) or the method of images presented in [14, 15] can be used. The method of images allows the calculation of the eddy current losses taking into account the geometric boundary conditions and is particularly suitable for the calculation of fields with substantial spatial components.

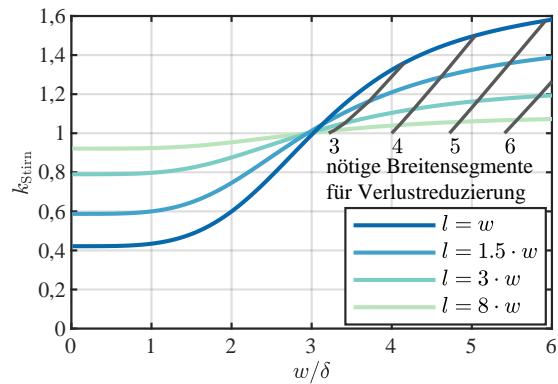


Abb. 24: Relativer Verlustbeitrag der Wirbelstrompfade an den Stirnseiten zu den Gesamtverlusten.

Fig. 24: Relative loss contribution of the eddy current paths at the end faces to the total losses.

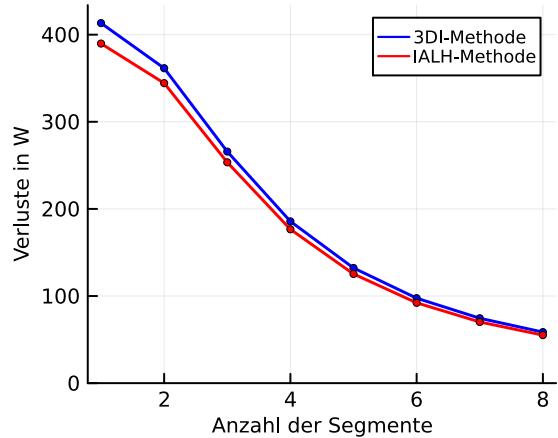


Abb. 25: Mit AMELA berechnete Wirbelstromverluste in Abhängigkeit von der Anzahl der axialen Segmente.

Fig. 25: Eddy current losses calculated with AMELA as a function of the number of axial segments.

Zeiteffiziente Schwingungsberechnung mit dem analytischen Balkenelement-Modell

von Allan de Barros, M.Sc.
und Martin Gerlach, M.Sc.

Die Berechnung des Schwingungsverhaltens ist ein wichtiger Bestandteil bei der Dimensionierung elektrischer Maschinen. Die schnelle und genaue Berechnung des mechanischen Schwingungsverhaltens, das durch die Eigenfrequenzen und Eigenformen des Ständers bestimmt wird, stellt dabei eine Herausforderung dar. In der Literatur sind verschiedene Ansätze zur Lösung dieses Problems zu finden. Jordan stellt in [1] ein vereinfachtes analytisches Berechnungsmodell vor, in dem der Ständer der Maschine als ein Kreisring beschrieben wird. Die Zähne und die Wicklung werden dabei nicht als eigene Komponenten, sondern lediglich als zusätzliche Masse des Jochs berücksichtigt. Dementsprechend kann das Berechnungsmodell die Verformungen der Wicklung, des Gehäuses und deren Geometrie nicht berücksichtigen. Der analytische Ansatz kann daher nur verwendet werden, wenn bestimmte Randbedingungen erfüllt sind. Das Verhältnis der Jochhöhe zum Außendurchmesser muss klein sein, und die Eigenfrequenzen der Zähne müssen deutlich größer sein als die Eigenfrequenzen des Jochs. Um diese Effekte zu berücksichtigen, kann die Finite-Elemente (FE) -Methode verwendet werden, bei der die Differentialgleichung (1) mit der Massenmatrix \mathbf{M} und der Steifigkeitsmatrix \mathbf{K} für den ungedämpften Fall gelöst wird.

Sowohl das analytische Berechnungsmodell als auch die FE-Methode haben Vor- und Nachteile. Die analytische Berechnung bedarf wenig Berechnungsressourcen und -zeit. Die Berechnungsgenauigkeit ist jedoch durch die oben erwähnten Annahmen begrenzt. Die FE-Methode kann hingegen komplexe Geometrien und verschiedene Komponenten berücksichtigen und weist eine gute Berechnungsgenauigkeit auf. Sie erfordert jedoch hohe Berechenressourcen und eine lange Modellierungszeit.

In dieser Arbeit wird ein neues analytisches Balkenelement-Modell (ABM) als Alternative zu den herkömmlichen analytischen Berechnungen und der FE-Methode vorgestellt [2]. Das ABM basiert auf den analytischen Gleichungen der Euler-Bernoulli- oder Timoshenko-Balkenelemente. Diese Elemente bestehen aus zwei Knotenpunkten mit jeweils drei Freiheitsgraden. Mit den Balkenelementen wird ein 2D-Modell des Blechpackets mit Joch und Zähnen erstellt. Die Wicklung und das Gehäuse werden zu-

Time-efficient vibration calculation using an analytical beam element model

by Allan de Barros, M.Sc.,
and Martin Gerlach, M.Sc.

The stator core vibration caused by electromagnetic forces is an important topic in the design of electric machines. A crucial task for the comprehensive analysis of this issue is to accurately estimate the eigenmodes and eigenfrequencies of the mechanical system. In literature, different approaches have been proposed for solving this problem. Jordan [1] introduces a simplified analytical model, which describes the machine's stator core as a circular ring. The stator teeth and winding are not considered as elastic bodies, but only as an additional mass. This model can only be used if certain boundary conditions are met. The ratio of the yoke's radial height to the outer diameter of the stator must be small and the tooth eigenfrequencies must be significantly higher than the yoke eigenfrequencies. Furthermore, the analytical approach can neither consider the impact of the elastic deformations of the winding and housing, nor the actual geometry of the teeth. To consider these effects, finite-element (FE) models can be used, in which the differential equation

$$(-\omega^2 \mathbf{M} + \mathbf{K}) \vec{x}(\omega) = \vec{0} \quad (1)$$

is solved in terms of the mass matrix \mathbf{M} and stiffness matrix \mathbf{K} for the free undamped condition.

Both the analytical and FE approaches have their own advantages and disadvantages. The analytical method needs low computational resources and time. However, its accuracy is limited by the aforementioned simplification assumptions. The FE method can consider complex geometries and different components. However, it needs high computational resources and a long modeling time.

This work presents a new analytical beam element model (ABM) as an alternative to the typical FE and classical analytical calculations [2]. The proposed method is based on the analytical equations of Euler-Bernoulli and Timoshenko beam elements. These consist of two nodes, each with three degrees of freedom. They are used to build up a 2D model of the stator core, including the stator yoke and teeth. The winding and the housing are not considered for the time being, but the model has the potential to be extended in future works. The main steps for building the model are shown in Fig. 26.

The results are compared in Table 1 to FE and analytical calculations and validated based on measure-

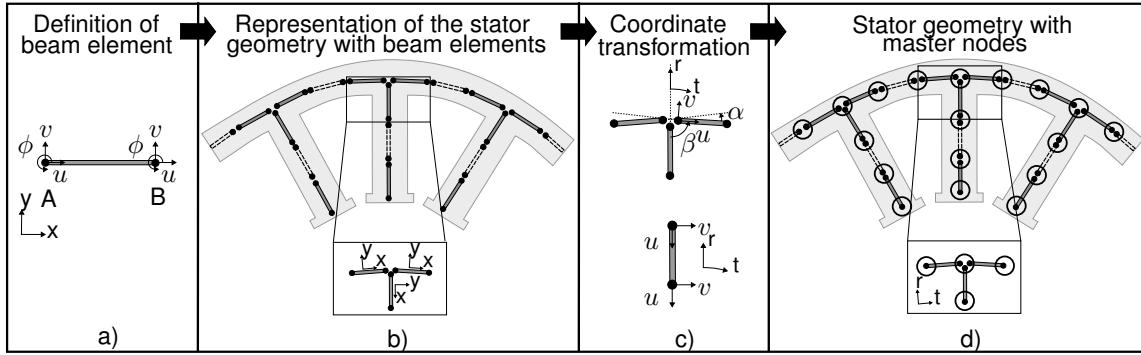


Abb. 26: Schritte zum Aufbau des analytischen Balkenelement-Modells (ABM).
Fig. 26: Steps to build up the analytical beam element model (ABM).

nächst nicht abgebildet; das Modell kann aber in zukünftigen Arbeiten erweitert werden. Das Vorgehen zum Aufbau des ABMs ist in Abb. 26 dargestellt. Die Berechnungsergebnisse des ABMs werden in Tabelle 1 mit analytischen Berechnungen, der FE-Methode und Messungen verglichen. Als Beispiel wird dafür das Blechpaket einer Hochdrehzahlmaschine für Traktionsanwendungen verwendet.

Die Hauptvorteile des ABMs sind im Vergleich zum FE-Modell die schnelle Berechnungszeit und die einfache Handhabung, da für die Berechnung nur wenige Eingabedaten anstelle eines detaillierten CAD-Modells erforderlich sind. Diese Vorteile sind vor allem während der Dimensionierung einer Maschine von Vorteil, wenn mehrere Berechnungen mit unterschiedlichen geometrischen Daten durchgeführt werden, und bei großen Maschinen. Im Vergleich zu klassischen analytischen Berechnung nach Jordan hat das ABM den Vorteil, dass der Einfluss der Zähne berücksichtigt wird. Dadurch ist es möglich, auch sogenannte Zahneigenmoden zu berücksichtigen (siehe [2]), und die Genauigkeit der Ergebnisse ist deutlich höher als die des klassischen analytischen Berechnungsansatz. Durch die Verwendung des Timoshenko-Balkens im ABM wird auch der Einfluss der Jochhöhe deutlich besser abgebildet, und die Eigenfrequenzen werden auch für relativ dicke Joche richtig berechnet.

Die Ergebnisse des ABMs können in Kombination mit den elektromagnetischen Kräften zur Abschätzung des Schwingungs- und des akustischen Verhaltens einer elektrischen Maschine verwendet werden. In zukünftigen Arbeiten kann das ABM um das Gehäuse und die Wicklung erweitert werden. Zusätzlich könnte das Berechnungsmodell in axialer Richtung erweitert werden, so dass auch axiale Eigenmoden berücksichtigt werden können.

[1] H. Jordan, *Der geräuscharme Elektromotor*. Girardet, Essen, 1950.

[2] A. de Barros, M. E. Gerlach, X. Huang, M. Langfermann, B. Ponick, and A. Ebrahimi, "Calculation of electric machines vibration using an analytical beam element model," in *2022 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*. Valencia: IEEE 2022

ments performed on the stator core of a high speed motor for a traction application. The main advantages of the ABM, when compared to the FE model, are its fast calculation time and ease of use, since only a few input data are necessary for the calculation, instead of a detailed CAD model. These advantages become especially interesting for the design optimization of a machine, when several calculations have to be performed with varying design parameters, and also for large machines. When compared to the classical analytical model, the proposed beam element model has the advantage of including the stator teeth, which improves the results' accuracy and enables the representation of tooth eigenmodes. The use of Timoshenko beams also enables the model to provide accurate results even when the stator yoke is thick relative to its outer diameter. The results obtained from this mechanical model can be used in combination with the calculated electromagnetic forces for the estimation of machine vibration during operation. Furthermore, the model has the potential to be extended to include the stator's frame and winding in future works. It could even be expanded to the axial direction, allowing it to consider axial eigenmodes.

Table 1: Eigenfrequenzen der ABM- und FE-Modelle.
Table 1: Eigenfrequencies of the ABM and FE models.

| | Eigenmodes | | | |
|---|---------------|----------------|---------------|----------------|
| | $r = 2$ | $r = 3$ | $r = 0$ | $r = 4$ |
| Meas. f_0 in Hz | 1639 | 4048 | 9571 | 10101 |
| Analytic. f_0 in Hz Δf in % | 1659 +1,22 | 4693 +15,93 | 9315 -2,67 | 8999 -10,91 |
| FE f_0 in Hz Δf in % | 1638 -0,06 | 4061 +0,32 | 9511 -0,63 | 10081 -0,20 |
| ABM f_0 in Hz Δf in % | 1568 -4,33 | 3935 -2,79 | 9568 -0,03 | 9691 -4,067 |

Telemetrie und Monitoring

von Marius Meiswinkel, M.Sc.
und Andreas Ridder, M.Sc.

Die Zunahme fluktuierender, regenerativer Energiequellen im elektrischen Netz führt zu einem erhöhten Bedarf an Pumpspeicherkraftwerken. Drehzahlvariable Antriebskonzepte haben dabei den Vorteil, die Pumpturbine bei saisonbedingten Fallhöhenunterschieden oder im Teillastbetrieb wirkungsgradoptimal betreiben zu können. Der dafür bei Synchronmaschinen notwendige statorseitige Vollumrichter führt zu zusätzlichen Oberschwingungen im Statorstrom, die sich auf das Luftspaltfeld der Maschine auswirken. Neben der zusätzlichen elektromagnetischen Einkopplung in die Dämpferwicklung ist im industriellen Umfeld außerdem eine Einkopplung von Oberschwingungen in die Erregerwicklung festgestellt worden. Der aktuelle Forschungsschwerpunkt liegt darin, die elektromagnetische Wechselwirkung zwischen den Wicklungen in Rotor und Stator zu untersuchen und messtechnisch zu erfassen. Am GeCoLab-Großmaschinenprüfstand des IAL in Marienwerder (siehe Bild.27) ist es mittels direkter Umlaufspeisung möglich, neben der Grundfrequenz zusätzliche Frequenzen im Statorstrom anzuregen. Mit Hilfe eines eigens entwickelten Telemetriemesssystems und speziell angefertigter Rogowskispulen ist es nun erstmals gelungen, Dämpferströme während des Betriebs einer Maschine aufzunehmen. In Kombination mit dem an den Schleifkontakteen gemessenen Erregerstrom konnte so eine elektromagnetische Einkopplung in beide Rotorwicklungen messtechnisch nachgewiesen werden.



Abb. 27: Generator Converter Laboratory GeCoLab
Fig. 27: Generator Converter Laboratory, GeCoLab

Neben der Messung von elektrischen Parametern ist es außerdem möglich, die Temperatur der Erregerwicklung und des Polkerns an verschiedenen Positionen mittels PT100-Sensoren in Echtzeit zu überwachen. Dafür wird wiederum das bereits erwähnte Telemetriesystem benötigt, das die Messdaten vom rotierenden Teil der Maschine an eine statische Auswerteeinheit übermittelt.

Telemetry and Monitoring

by Marius Meiswinkel, M.Sc.,
and Andreas Ridder, M.Sc.

The increase in fluctuating renewable energy sources in the electrical grid is leading to a higher demand for pumped storage power plants. Variable speed drive concepts have the advantage of being able to operate the pump turbine at optimized efficiency in the event of seasonal differences in head or in partial-load operation. The full-scale converter required for the stator winding of synchronous machines causes additional harmonics in the stator current, which has an effect on the air-gap field of the machine. Beside the additional harmonics in the damper winding, electromagnetic coupling between the exciter and stator windings has also been detected in industrial applications.

The current research focus is the investigation and measurement of the electromagnetic interaction between the windings of the rotor and stator. At the GeCoLab large machine test rig of IAL in Marienwerder (see Fig.27), it is possible to excite additional frequencies beside the fundamental frequency of the stator current by using the converter. With the help of a self-developed telemetry system and specially designed Rogowski coils, it has been possible to record damper currents during operation of a machine for the first time. In combination with the excitation current measured at the brushes, electromagnetic coupling between the stator and both rotor windings was detected by measurement.

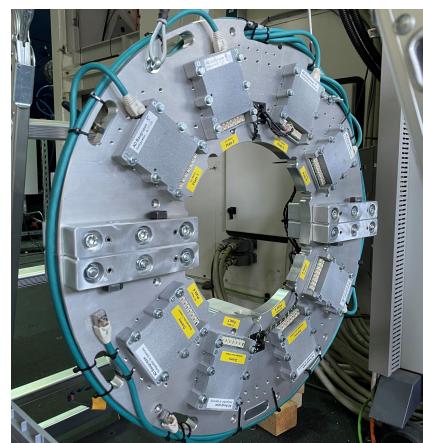


Abb. 29: Rotorseitiges Telemetriesystem mit acht AD-Modulen
Fig. 29: Rotor-side telemetry system with eight ADC modules

In addition to measuring electrical parameters, it is also possible to monitor the temperatures of the exciter winding and pole core at various points in real time using PT100 sensors. This also requires the aforementioned telemetry system which transmits the data from the rotating part of the machine to a

Für die Messung der genannten Rotorparameter existierte bereits eine Telemetrieslösung, die jedoch unzuverlässig ist und keine offene Schnittstelle für die Auswertung bietet. Daher wurde das neue modulare Telemetriesystem mit offener und einfach zu verwendender Schnittstelle zur Messung von Rotorparametern entwickelt. Ziel ist es, mit den Modulen möglichst viele Sensortypen und Parameter parallel aufzeichnen zu können. Bisher werden Spannungen bis $\pm 10\text{ V}$ mit bis zu 8 kHz Abtastfrequenz bei einer Abtasttiefe von 16 bit messbar. Mit dem neuen Telemetriesystem können bis zu 64 Messfühler und Eingänge simultan abgetastet und verarbeitet werden (vgl. Bild 28). Jeder Kanal bietet dabei eine Konstantstromquelle für den Betrieb von PT100-Messfühlern sowie eine Konstantspannungsquelle für den Betrieb von aktiven Sensoren und Messverstärkern. Auf dem Rotor wird eine Sendereinheit mit Spannungsversorgung und Datenverarbeitung untergebracht sowie acht AD-Module mit je acht Eingängen (siehe Bild 29). Der Datenaustausch, sowie die Synchronisation zwischen den Modulen des rotorseitigen Messsystems ist, wie in Bild 28 dargestellt, über eine RS-485-Schnittstelle realisiert, sodass eine resiliente Datenübertragung gewährleistet ist. Die Messdaten werden nach der Verarbeitung im Sende-Modul über eine WiFi-Verbindung mit UDP-Paketen an ein Empfangs-Modul gesendet, das wiederum an einen Computer angeschlossen ist. Das verwendete Übertragungsprotokoll ist hierbei so konstruiert, dass es eine sofortige und einfache Verarbeitung der Daten zulässt. Zukünftig soll eine weiterentwickelte Version des Telemetriesystems in Wasserkraftwerken und Windkraftanlagen eingesetzt werden, um auch über einen langen Zeitraum eine Früherkennung von Ausfällen und Abweichungen im Betriebsverhalten der Maschinen zu ermöglichen.

static processing unit.

A telemetry system for measuring rotor parameters already existed on the test rig, but this was unreliable and required a licence for the interface and evaluation of the measurement results. Therefore a new modular telemetry system was developed to measure the parameters with an licence-free and easy-to-use interface. The system will be further developed with the aim of supporting the parallel acquisition from as many different sensor types and parameters as possible. In the current state, it supports measuring input-voltages up to $\pm 10\text{ V}$ with a sampling frequency of up to 8 kHz at a resolution of 16 bits through every port. With the new telemetry system, it is possible to acquire the measurements from up to 64 sensors and inputs (ref. 28). Every channel has a constant current source for the operation of Pt-100 sensors and a constant voltage source for the operation of active sensors, such as operational amplifiers. The rotor-side system consists of a transmitter module with an integrated voltage source and data processing together with eight ADC modules with eight inputs each. The data transfer and the synchronisation of the modules on the rotating part are performed using the RS-485 bus for resilient communication. The measured values are transferred from the transmitter to the receiver module after processing using a WiFi-link and UDP-packages to the receiver module, which is connected to a computer for further processing and storage. The protocol used is designed for ease of use and fast data handling. Future versions of the telemetry system will be used in wind energy and hydroelectric power plants to detect long term changes in parameters and so predict failure and deviations in operational behavior.

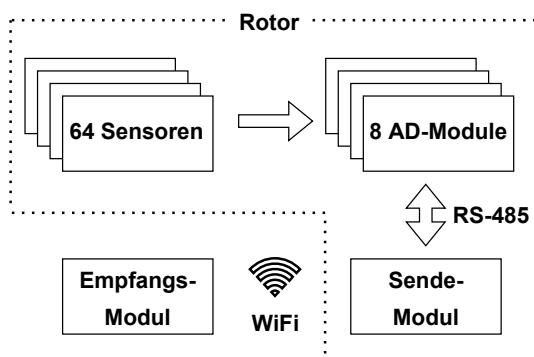


Abb. 28: Schematischer Aufbau des Telemetriesystems
Fig. 28: Schematic of the telemetry system

Entwurf von Haarnadelwicklungen unter Berücksichtigung der transienten Potentialverteilung

von Jochen Dittmann, M.Sc.,
Marc England, M.Sc. und
Leander Eschenmann, M.Sc.

Mit dem zunehmenden Einsatz von neuen Halbleitertechnologien wie SiC und GaN bei umrichtergetriebenen elektrischen Maschinen können die Schaltverluste der Leistungselektronik reduziert werden. Dies führt jedoch zu größeren Spannungsgradienten, woraus sich eine stark nichtlineare transiente Potentialverteilung entlang der Wicklung der elektrischen Maschine ergibt. Resultierend wird das Isoliersystem – insbesondere die Windungsisolierung – einer zusätzlichen Beanspruchung ausgesetzt. Um eine gezielte Dimensionierung des Isoliersystems vornehmen zu können, ist es demnach erforderlich, die transiente Potentialverteilung bereits beim Wicklungsentwurf vorauszuberechnen. Mit Hilfe eines verteilten Netzwerks, welches die elektrischen Eigenschaften jeder Windung der Maschine bis in den MHz-Bereich durch Ersatzparameter abbildet, ist eine Vorausberechnung der Potentialverteilung möglich [16].

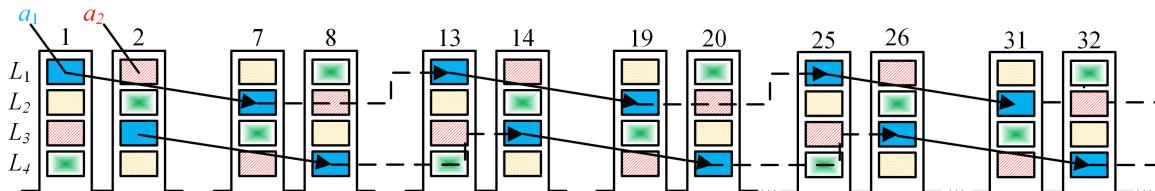


Abb. 30: Ausschnitt aus einem ungeschifteten Wicklungsplan mit $Q = 48$, $p = 4$, $q = 4$, $n_L = 4$, $a = 4$; die verschiedenen parallelen Zweige sind durch unterschiedliche Farben abgebildet.

Fig. 30: Excerpt of a unshifted winding design with $Q = 48$, $p = 4$, $q = 4$, $n_L = 4$, $a = 4$; different parallel branches are differentiated by color.

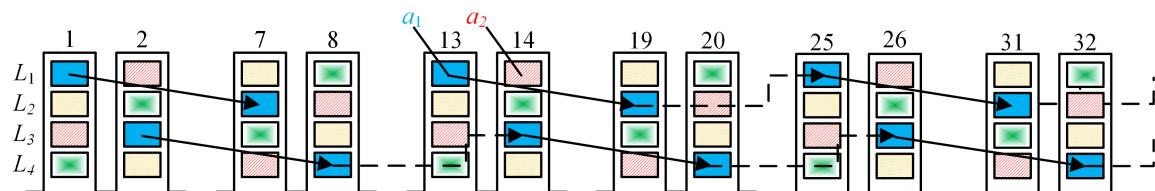


Abb. 31: Ausschnitt aus einem $n_{shift} = 1$ geshifteten Wicklungsplan mit $Q = 48$, $p = 4$, $q = 4$, $n_L = 4$, $a = 4$; die verschiedenen parallelen Zweige sind durch unterschiedliche Farben abgebildet.

Fig. 31: Excerpt from a $n_{shift} = 1$ shifted winding design with $Q = 48$, $p = 4$, $q = 4$, $n_L = 4$, $a = 4$; different parallel branches are differentiated by colour.

Des Weiteren kann im Entwurfsprozess einer Haarnadelwicklung durch sogenanntes „Shifting“ die räumliche Lage der Stator-Eingangsklemmen inner-

Design of Hairpin Windings Considering the Transient Potential Distribution

by Jochen Dittmann, M.Sc.,
Marc England, M.Sc., and
Leander Eschenmann, M.Sc.

With the increasing use of novel semiconductor technologies such as SiC and GaN in inverter-fed electrical machines, the switching losses of the power electronics can be reduced. However, this leads to steeper voltage gradients, resulting in a strongly nonlinear transient potential distribution along the winding of the electrical machine. As a result, the insulation system – especially the turn-to-turn insulation – is subjected to additional voltage stress. To carry out targeted dimensioning of the insulation system, it is necessary to calculate the transient potential distribution in advance. By using a multi-conductor transmission line model to represent the high frequency behaviour of each individual conductor of the stator winding up to the MHz range, it is possible to calculate the transient potential distribution [16].

In the design of a hairpin winding, it is possible to change the spatial location of the stator winding input terminals by employing so-called "shifting". Fig.

halb des Wicklungsplans variiert werden. Wie in den Abb. 30 und 31 für einen Beispielplan zu erkennen ist, verändern sich dadurch auch die Positionen der folgenden Leiter [17]. Die parasitären elektrischen Eigenschaften sind jedoch fest an die geometrische Lage innerhalb der Statornut gebunden. Eine Verschiebung der Leiter innerhalb des Wicklungsplans führt demnach zu einer Veränderung der Reihenfolge der verschiedenen parasitären elektrischen Eigenschaften der räumlich verteilten Wicklung. Wie die Abb. 32 zeigt, kann damit Einfluss auf die transiente Potentialverteilung und die maximal auftretende Potentialdifferenz genommen werden [17]. Hierbei werden sowohl die transienten Potentialdifferenzen zwischen den Leitern innerhalb einer Statornut als auch zwischen den Leitern verschiedener Stränge im Wicklungskopf der Maschine berücksichtigt. Außerdem wird das Potential zwischen den Leitern und dem Blechpaket identifiziert.

Mit Hilfe der vorgestellten Methode ist es möglich, die maximal auftretende transiente Potentialdifferenz innerhalb der Statorwicklung um bis zu 45 % zu reduzieren. Damit kann auf Basis der Vorausberechnung der Potentialverteilung sowie des vorgestellten Variationsverfahrens („Shifting“) das gesamte Antriebssystem, bestehend aus Frequenzumrichter, Zuleitung und elektrischer Maschine, aufeinander abgestimmt und auf diese Weise der Material-einsatz für das Isoliersystem reduziert und die Entwärmung der Wicklung verbessert werden.

30 and 31 show an excerpt of an example winding plan. With the change in the spatial location of the input terminals, a change of the spatial conductor distribution also occurs. However, the parasitic electrical properties are strictly linked to the geometric position within the stator slot. A shift of the conductors within the winding plan thus leads to a change in the order of the various parasitic electrical properties of the spatially distributed winding. As Fig. 32 shows, it is possible to influence the transient potential distribution and the maximum potential difference that occurs [17]. On this basis, a targeted design of a winding plan with hairpins can be achieved. Here, both, the transient potential differences between the conductors within a slot of the stator core and the potential differences between the conductors of different phases in the end winding region of the machine, are considered.

With the help of the method presented, it is possible to reduce the maximum transient potential difference occurring within the stator winding by up to 45 %. Thus, based on the pre-calculation of the potential distribution as well as using the variation method presented ("shifting"), the components of the entire drive system, consisting of the frequency converter, supply cable and electrical machine, can be matched to each other and in this way, the material used for the insulation system can be reduced and the heat dissipation of the winding can be improved.

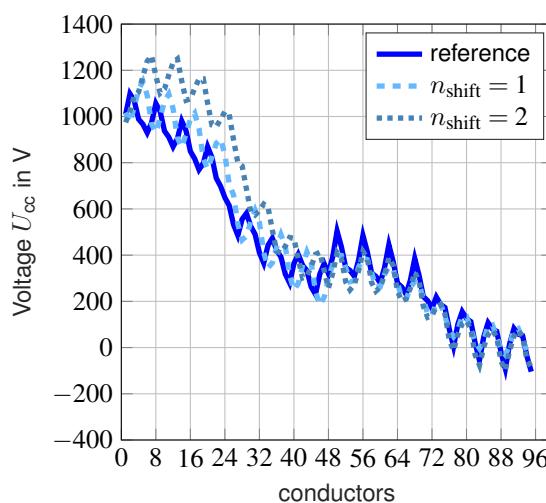


Abb. 32: Vergleich der räumlichen Potentialverteilung der Leiter-Leiter-Spannung U_{cc} eines ungeshifteten, eines mit $n_{shift} = 1$ sowie eines mit $n_{shift} = 2$ geshifteten Wicklungsplans zum gleichen Zeitpunkt.

Fig. 32: Comparison from the spatial potential distributions of the unshifted $n_{shift} = 1$ and a $n_{shift} = 2$ shifted phase 1 at the same point in time.

- [16] Jochen Dittmann, Cara-Nastasja Behrendt, and Bernd Ponick. "Prediction of the Voltage Distribution in a Inverter-Fed Hairpin Stator Winding". In: *2022 25th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. 2022, pp. 1–6.
- [17] Jochen Dittmann, Marc England, and Bernd Ponick. "Design of Hairpin Windings Considering the Transient Potential Distribution". In: (). to be published at *02.2023 e + i Elektrotechnik und Informationstechnik*.

Geräusch- und Schwingungsreduktion durch vorteilhafte PMSM-Rotorblechschnitte

von Marc England, M.Sc.

Beim Entwurf elektrischer Maschinen für Traktionsanwendungen wird ein starker Fokus auf geringe Magnetgeräusche gelegt, um das Fahrerlebnis des Kunden zu verbessern. Parasitäre Effekte wie Drehmomentpulsationen und Vibratonen werden bei permanentmagneterregten Synchronmaschinen (PMSM) in der Regel durch segmentweise Staffelung des Rotors reduziert. Dieser Ansatz führt jedoch zu einem geringeren Drehmoment aufgrund der Verringerung der Hauptflussverkettung zwischen dem Rotorfeld und der Statorwicklung. So mit müsste mehr Magnetmaterial eingesetzt werden, um das Drehmoment einer ungestaffelten Maschine zu erreichen. Darüber hinaus werden die Kosten der Maschine durch den komplexeren und zeitaufwändigeren Herstellungsprozess erhöht.

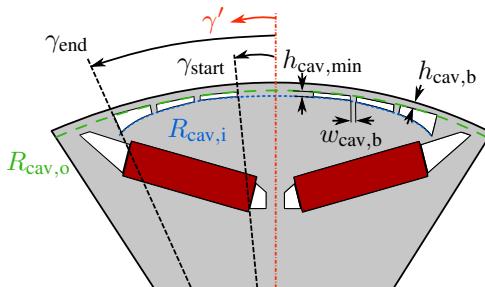


Abb. 33: Skizze eines Rotors mit sinusförmigen Kavitäten [18].

Fig. 33: Sketch of a rotor with sinusoidal cavities [18].

Daher werden Rotormodifikationen untersucht, die die Flussdichteverteilung im Luftspalt und damit die Amplituden der Oberwellen beeinflussen. Da die Drehmomentpulsationen und die Radialkräfte direkt mit dem Luftspaltfeld korrelieren, wird auch das akustische Verhalten beeinträchtigt. Zum einen wird eine Maschine mit in das Rotorblech integrierten sinusförmigen Kavitäten wie in Abb. 33 betrachtet [19]. Dieser Ansatz erzeugt die Wirkung einer Sinuspolekontur (typischerweise eingesetzt in Schenkelpolläufern) mit zusätzlichen vergrabenen Flusssperren, wobei der Rotor eine zylindrische Außenkontur behält. Zum anderen wird eine Pol-zu-Pol-Variation der Magnetwinkel (sog. Rotorpolweitenmodulation, RPWM), wie in Abb. 35 dargestellt, untersucht [18]. Dies führt zum Bruch der Rotorpolsymmetrie, was zu einer zusätzlichen Anregung von geradzahligen Harmonischen im Rotorfeld führt.

Beide Rotormodifikationen stellen kosteneffiziente Ansätze dar, die zu einer Steigerung der Hauptfeldwelle bei gleichzeitiger Reduktion von Drehmomentpulsationen im Vergleich zur Referenzmaschine füh-

Noise and vibration reduction by advantageous PMSM rotor design

by Marc England, M.Sc.

In the design process of electrical machines for traction applications, a strong focus is placed on low noise, vibration and harshness (NVH) with the aim of improving the customer's driving experience. Parasitic effects like torque pulsations and acoustic noise emissions in permanent magnet synchronous machines (PMSM) are usually reduced by step-skewing of the rotor. However, this approach results in a lower output torque due to the reduction in the fundamental harmonic flux linkage between the rotor field and the stator winding. Hence, more magnet material would have to be used to generate the torque of an unskewed machine. Additionally, the more complex and time-consuming manufacturing process increases the cost of the machine.

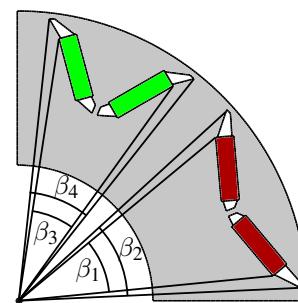


Abb. 35: Skizze eines Rotors mit RPWM [19].

Fig. 35: Sketch of a rotor with rotor pole width modulation [19].

Therefore, rotor modifications which influence the flux density distribution in the air gap and thus the amplitudes of the spatial harmonics are investigated. Since torque pulsations and radial forces directly correlate to the air-gap field, the acoustic behaviour will be affected. Firstly, a machine with sinusoidal cavities integrated into the rotor lamination as depicted in Fig. 33 is considered [19]. This approach aims at reaching the benefits of a sinusoidal pole contour (typically applied on salient pole rotors) by means of additional buried flux barriers thus maintaining a cylindrical outer contour of the rotor. Secondly, a pole-to-pole variation of the magnet angles called rotor pole width modulation (RPWM) as shown in Fig. 35 is examined [18]. This leads to a break of the rotor pole symmetry, which results in an additional excitation of even harmonics in the rotor field. Both modifications represent cost-efficient measures resulting in an increase of the fundamental field harmonic with a simultaneous reduction of torque pulsations compared to the reference machine. As shown in fig. 34, especially torque pulsations

ren. Wie in Abb. 34 dargestellt ist, werden vor allem Pendelmomente mit der Frequenz $f = 12f_1$ reduziert. Mit den Sinuskavitäten kann die Amplitude der Drehmomentpulsation halbiert werden, während mit der RPWM sogar eine Reduktion um den Faktor fünf im betrachteten Arbeitspunkt möglich ist.

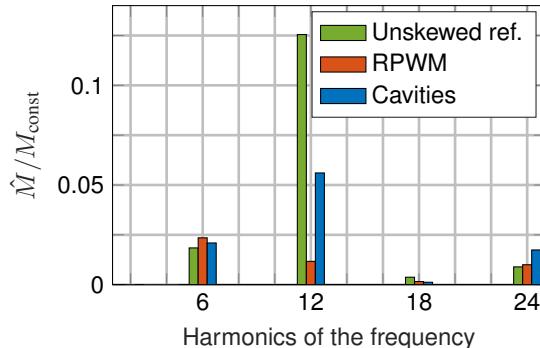


Abb. 34: Bezogene Amplituden der Harmonischen des Drehmoments im Eckpunkt.

Fig. 34: Normalized amplitudes of the harmonics of the torque at maximum torque.

Hinsichtlich der Geräuschemission führt der asymmetrische Aufbau der Maschine mit RPWM jedoch zur Anregung zusätzlicher Eigenfrequenzen mit der radialen Ordnung $r = 4$ und der axialen Ordnung $q = 0$, was zu einem Anstieg des Gesamtschalldruckpegels in Abb. 36 führt. Die Maschine mit sinusförmigen Kavitäten im Rotor weist ein leiseres Betriebsverhalten in einem weiten Drehzahlbereich auf und führt zu einer Reduktion des Schalldruckpegels um bis zu 10dB gegenüber der ungestaffelten Referenzmaschine. Dies entspricht einer Halbierung der Lautstärke.

tions with the frequency $f = 12f_1$ are reduced. With the sinusoidal cavities, the amplitude of these torque harmonics can be halved, while, with the RPWM, even a reduction by a factor of five is possible at this operating point.

However, concerning the noise emission, the asymmetric design of the machine using RPWM results in the excitation of additional eigenfrequencies with radial order $r = 4$ and axial order $q = 0$, leading to an increase in the total sound pressure level in Fig. 36. The machine with sinusoidal cavities in the rotor operates more quietly over a wide speed range and leads to a reduction in the sound pressure level of up to 10dB compared to the unskewed reference design, which is equivalent to half the volume.

- [18] M. England and B. Ponick. "Einfluss der Rotorgeometrie auf Schwingungs- und Geräuschemissionen elektrischer Fahrzeugantriebe". In: *Elektrotechnik & Informationstechnik (e&i)* 138.2 (2021), pp. 159–167.

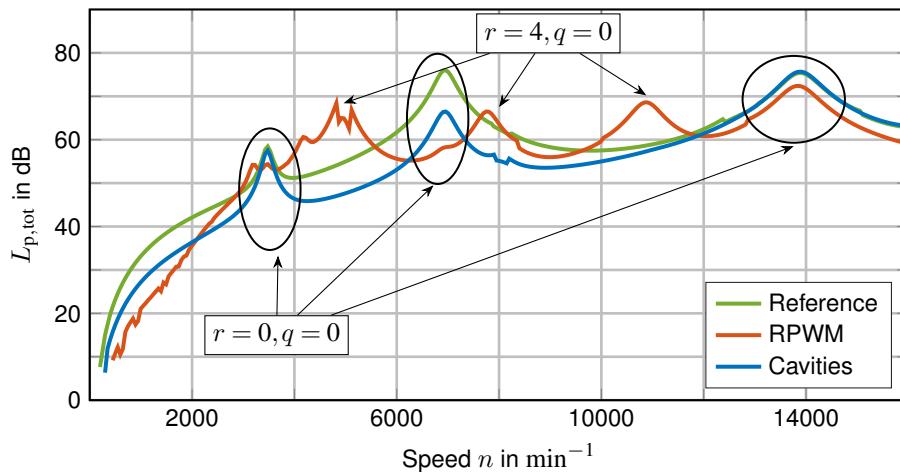


Abb. 36: Vergleich der Gesamtschalldruckpegel im Hochlauf mit konstanter Bestromung.

Fig. 36: Comparison of the total sound pressure level in a run-up with a constant current.

Ansätze zur Früherkennung klimatischer Einflüsse auf Leistungshalbleiter

von Benedikt Kostka, M.Sc.,
Johannes Wenzel, M.Sc.
und Sören Fröhling, M.Sc.

Leistungselektronische Komponenten sind oftmals rauen klimatischen Umgebungsbedingungen und starken Temperatur- und Feuchtigkeitsschwankungen ausgesetzt. Dennoch wird eine hohe Lebensdauer der einzelnen Komponenten erwartet, die bis zu mehreren Jahrzehnten betragen soll. Die konventionellen und inzwischen umfassend erforschten thermomechanischen Degradationsmechanismen sind heutzutage nicht der lebensdauerbestimmende Faktor. Unerwartet kurze Lebensdauern sind vor allem durch feuchteinduzierte Mechanismen zu begründen [20]. Hauptumrichter haben dabei einen signifikanten Anteil an der Ausfallrate.

Leistungsmodule sind häufig mit Silikon vergossen und nicht hermetisch abgedichtet, weshalb Feuchtigkeit von der Umgebung bis hin zum Chip diffundieren kann. Zusammen mit der im Betrieb angelegten Spannung entstehen elektrochemische Korrosionsprozesse. Eine reduzierte Sperrfähigkeit der Leistungshalbleiter in Form erhöhter Leckströme oder reduzierter Durchbruchspannungen sind die Folge [21].

Am IAL wird innerhalb des Projektes ReCoWind zum einen an der Entwicklung von Messtechnik gearbeitet, die eine frühzeitige Erkennung von feuchtebedingter Degradation während des Betriebs des Umrichters ermöglicht. Zum anderen wird ein Simulationstool entwickelt, welches das Mikroklima im Inneren des Leistungsmodul vorausberechnet. Beide Ansätze zielen darauf ab, frühzeitig kritische Betriebspunkte des Umrichters zu identifizieren und somit eine zuverlässige Betriebsführung zu gewährleisten.

Für die Identifikation von kritischen Isolations- und Kriechstrecken an Umrichterkomponenten gegenüber klimatischen Einflüssen wurde zudem eine entsprechende Messtechnik (s. Abb. 38) zur beschleunigten Alterung und Charakterisierung von Leistungsmodulen, Gate-Units und der Zwischenkreisverschaltung entwickelt. Die Basis ist dabei der HV-H³TRB-Test, welcher eine Leckstrommessung bei einer Spannung von bis zu 1500 V erfordert.

Im Zuge des Projektes konnten validierende Messungen an instrumentierten Leistungsmodulen vorgenommen werden. Auf dem Halbleiterprüfstand des IAL war es möglich, im kontinuierlichen PWM-Betrieb Messdaten von den im Silikon vergossenen Temperatur- und Feuchtesensoren aufzuzeichnen (s. Abb. 39).

Approaches for Early Detection of Climatic Impacts on Power Semiconductors

by Benedikt Kostka, M.Sc.,
Johannes Wenzel, M.Sc.,
and Sören Fröhling, M.Sc.

Power electronic components are often exposed to harsh climatic conditions and strong fluctuations in temperature and humidity. Nevertheless, a long service life for the individual components is required, which should be in the range of decades. The conventional and now extensively researched thermomechanical degradation mechanisms are not the limiting factors today. Unexpectedly short lifetimes can be attributed mainly to moisture-induced mechanisms [20]. Main converters make up a significant contribution to the failure rate. Power modules are often encapsulated in silicone and not hermetically sealed, which is why moisture can diffuse from the environment onto the chip. Together with the voltage applied during operation, this causes electrochemical corrosion processes to occur. A reduced blocking capability of the power semiconductors in the form of increased leakage currents or reduced breakdown voltages is the result [21].

Within the ReCoWind project, IAL is working on the development of measurement systems that allow early detection of moisture-related degradation during operation of the converter. A simulation tool is also being developed to predict the microclimate inside the power module. Both approaches aim to identify critical operating points of the converter at an early stage and thus ensure reliable operation management.

In addition, for the identification of critical insulation thicknesses and creepage distances of inverter components with respect to climatic influences, a corresponding measurement technique (see Fig. 38) was developed for the accelerated ageing and characterisation of power modules, gate units and the DC-link wiring. The basis for this is the HV-H³TRB test, which involves a leakage current measurement at a voltage of up to 1500 V.



Abb. 38: Messplatine des HV-H³TRB-Tests

Fig. 38: Measuring board for the HV-H³TRB test

In the course of the project, validating measurements were carried out on instrumented power modules. On the semiconductor test bench at IAL, it was possible to record measurement data from the tem-

Weiterhin wurde ein Messkonzept entwickelt, mit dem eine Detektion der Sperrfähigkeit der Leistungshalbleiter direkt im Umrichter ermöglicht wird (s. Abb. 37). Durch die beiden Stromquellen I_{q1} und I_{q2} wird der Messstrom I_M in einen Phasenanschluss eingeprägt. Durch diesen Strom ändert sich die Spannung V_M über den Lowside-Schaltern gemäß der Sperrkennlinien der Halbleiter. Da für die Messung lediglich DC-Größen benötigt werden, kann die angeschlossene Lastmaschine als Kurzschluss aufgefasst werden. Dadurch werden immer alle drei Phasen zusammen überwacht.

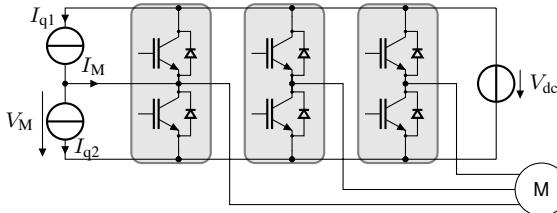


Abb. 37: Messkonzept zur Überwachung der Sperrfähigkeit von Halbleitern im Umrichter

Fig. 37: Measurement concept for monitoring the blocking capability of semiconductors in the inverter

Abb. 40 skizziert die zu erwartenden I_M - V_M -Kennlinie für verschiedene degradierte Halbleiter. Die Alterung der Highside- sowie der Lowside-Schalter wurden als symmetrisch angenommen. Das Messkonzept konnte bereits erfolgreich unter Labor- und Systembedingungen in Betrieb genommen werden [22]. Die ebenfalls in ReCoWind entstandenen Feuchte-Simulationsmodelle sind in der Lage, auf Basis der Fick'schen Diffusionsgleichungen kritische Szenarien durch eine Kombination aus Lastprofilen und Umgebungsklimadaten aufzuzeigen. Wichtige Parameter wie der Diffusionskoeffizient oder die Löslichkeit der Kunststoffe konnten bereits z.B. durch gravimetrische Messungen unter kontrollierten klimatischen Bedingungen bestimmt werden. Darüber hinaus ist aufgrund der großen Anzahl verschiedener Komponenten, die in einem Umrichtersystem verwendet werden, eine Abstraktion des Gesamtsystems erforderlich. Das Silikongel spielt wegen seines physikalischen Kontakts mit dem Leistungshalbleiter eine Schlüsselrolle in den sogenannten hygrothermischen Simulationen. Weitere Untersuchungen, die das Taupunktverhalten von Wasser in Silikon beschreiben, sind ebenfalls Gegenstand des Forschungsvorhabens ReCoWind.

- [20] K. Fischer et al. "Investigation of converter failure in wind turbines". In: *Elforsk report 12.58* (2012).
- [21] C. Zorn und N. Kaminski. "Acceleration of temperature humidity bias (THB) testing on IGBT modules by high bias levels". In: *IEEE 27th ISPSD*. IEEE. 2015, S. 385–388.
- [22] B. Kostka und A. Mertens. "Practical Implementation of a Concept for In-Situ Detection of Humidity-Related Degradation of IGBT Modules". In: *24th EPE ECCE Europe*. 2022.

perature and humidity sensors encapsulated in silicone during continuous PWM (see Fig. 39).

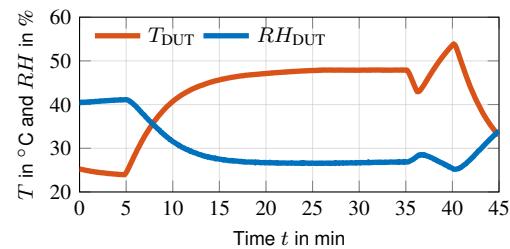


Abb. 39: Temperatur- und Feuchtigkeitsverläufe in Abhängigkeit der angefahrenen Lastzustände

Fig. 39: Temperature and humidity curves as functions of the applied load conditions

Furthermore, a measurement concept was developed to enable detection of the blocking capability of the power semiconductors directly in the inverter (see Fig. 37). Using the two current sources I_{q1} and I_{q2} , the measuring current I_M is imposed via a phase connection. This current causes the voltage V_M across the low-side switches to change according to the blocking characteristics of the semiconductors. Since only DC quantities are required for the measurement, a connected load machine can be considered as a short circuit. Thus, the three phases are always monitored together.

Fig. 40 illustrates the expected I_M - V_M characteristic for differently degraded semiconductors. The ageing of the high-side and low-side switches is assumed to be symmetrical. The measurement concept has already been successfully put into operation under both laboratory and system conditions.

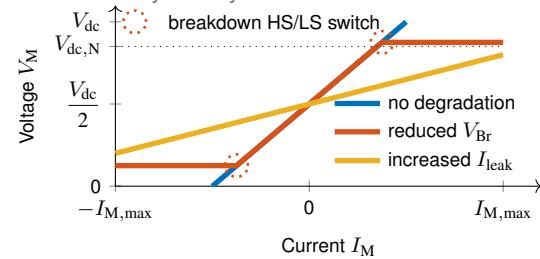


Abb. 40: I_M - V_M -Kennlinie bei verschiedenen Degradationserscheinungen

Fig. 40: I_M - V_M characteristic under the influence of different degradation phenomena

The humidity simulation models, which were created in ReCoWind, are able to identify critical scenarios on the basis of Fick's diffusion equations by using a combination of load profiles and ambient climate data. Important parameters such as the diffusion coefficient and the solubility of water in plastics could already be determined, for example, by gravimetric measurements under controlled climatic conditions. Furthermore, due to the large number of different components used in a converter system, an abstraction of the overall system is necessary. The silicone gel plays a key role in the so-called hygrothermal simulations because of its physical contact with the power semiconductor. Further investigations describing the dew point behaviour of water in silicone also form a subject of research in ReCoWind.

Optimale Nutzung der Regelungsfreiheitsgrade des Modularen Multilevel-Matrixumrichters bei variablen Systemfrequenzen

von Rebecca Himker, M.Sc.

Zur Speisung von drehzahlvariablen Antrieben im Mittelspannungsbereich werden neben netzgeführten Umrichtern und selbstgeführten Drehstrombrückenschaltungen zunehmend auch Modulare Multilevel Umrichter (kurz: MMC) verwendet. Der Vorteil dieser Technologie ist der modulare Aufbau der Umrichterzweige, wodurch eine Skalierbarkeit bis zu sehr hohen Systemspannungen eingestellt werden kann. Bei einer dreiphasigen Versorgungsspannung besteht zudem die Möglichkeit, den Mittelspannungsantrieb über einen Modularen Multilevel-Matrixumrichter (kurz: M3C) zu versorgen, welcher in Abb. 41 dargestellt wird. Ein weiteres mögliches Anwendungsgebiet des M3C ist die AC-Hochspannungsübertragung bei niedriger Frequenz von etwa 10 Hz (engl.: „Low-Frequency HVAC“, kurz: LF-HVAC) z.B. für Offshore-Windparks. Bei einer LF-HVAC kann im Gegensatz zu einer konventionellen HVDC-Übertragung der gesamte Umrichter auf dem Festland stationiert werden, auf See wird nur eine LF-Transformatorplattform benötigt. Das System X stellt bei dem Anwendungsfall der LF-HVAC das 50-Hz-Netz und das System Y ein frequenzvariables Netz dar.

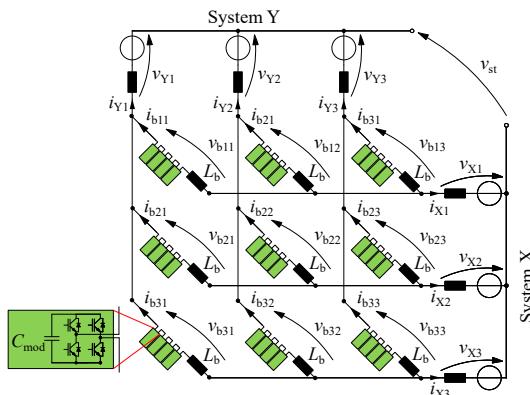


Abb. 41: Modularer Multilevel-Matrixumrichter
Fig. 41: Modular multilevel matrix converter

Das aktuelle Forschungsvorhaben befasst sich mit der optimalen Nutzung der Regelungsfreiheitsgrade des M3C bei unterschiedlichen Systemfrequenzen. Die Regelungsfreiheitsgrade, welche sich größtenteils aus Kreisströmen zusammensetzen, werden auf Grundlage der Spannungs- und Lastcharakteristik des Umrichters berechnet. Bei den folgen-

Optimal use of the control degrees of freedom of the modular multilevel matrix converter at variable system frequencies

by Rebecca Himker, M.Sc.

Beside line-commutated converters and self-commutated three-phase bridge circuits, modular multilevel converters (short form: MMC) are increasingly being used to supply variable-speed drives in the medium-voltage range. The advantage of this technology is the modular design of the converter branches, which allows scalability up to very high system voltages. With a three-phase supply voltage, it is also possible to supply the medium-voltage drive via a modular multilevel matrix converter (short form: M3C), as is shown in Fig. 41. Another possible application of the M3C is AC high-voltage transmission at lower frequency at around 10 Hz (Low-Frequency HVAC, short form: LF-HVAC), e.g., for offshore wind farms. In contrast to conventional HVDC transmission, with LF-HVAC the entire converter can be located onshore, and only an LF transformer platform is required offshore. For the LF-HVAC application, system X represents the 50 Hz grid and system Y represents a variable frequency grid.

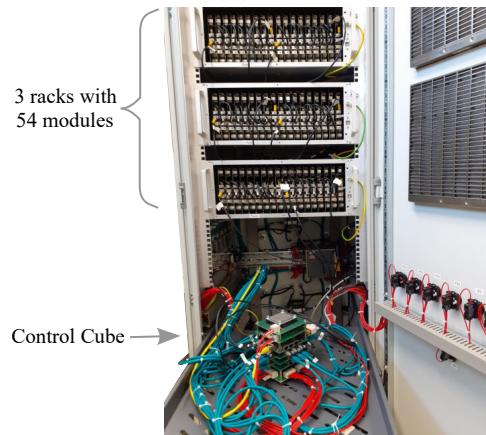


Abb. 43: Niederspannungsprüfstand des M3C
Fig. 43: Low-voltage test bench of the M3C

This research project deals with the optimal use of the control degrees of freedom of the M3C at different system frequencies. The control degrees of freedom, which are mostly composed of circulating currents, are calculated based on the voltage and load characteristics of the converter. In the following investigations, it is assumed, as in the application case of LF-HVAC, that the system voltages remain constant across the full frequency range. The

den Untersuchungen wird, wie im Anwendungsfall der LF-HVAC, davon ausgegangen, dass die Systemspannungen über den gesamten Frequenzbereich konstant bleiben. Als Indikator für die Größe der Modulkapazität werden die dazu proportionalen Zweigenergieschwankungen Δe_b und als Indikator für die Zweigverluste die Zweigstromeffektivwerte I_b gewählt. Um mit den Freiheitsgraden auf die Indikatoren Einfluss zu nehmen, werden in der Regelungsstruktur zusätzliche Kreisströme eingeprägt, sodass die Zweigenergieschwankungen oder der Zweigstromeffektivwert des Umrichters reduziert wird. Dabei entsteht jedoch ein Zielkonflikt zwischen der Größe der Modulkapazität und den Umrichterverlusten. Aus dem Grund werden die zusätzlichen Kreisstromparameter mithilfe eines Optimierungsalgorithmus dahingend ausgewählt, dass ein optimaler Trade-Off zwischen diesen Indikatoren eingestellt wird. Im ersten Schritt werden die Ergebnisse des neuen Betriebsmodus, welcher als Control W (kurz: CtrW) bezeichnet wird, einem analytischen Modell des M3C vorgegeben und mit bisher vorhandenen Betriebsmodi verglichen. In Abb. 42 werden die Ergebnisse davon dargestellt. Es zeigt sich, dass gegenüber bekannten Betriebsmodi wie bspw. dem Normal Mode (kurz: NM), dem Instantaneous Power Mode (kurz: IPM) und dem Control III (kurz: Ctr3) ein günstiger Kompromiss zwischen Zweigenergieschwankung und Effektivwert des Zweigstroms erreicht werden kann.

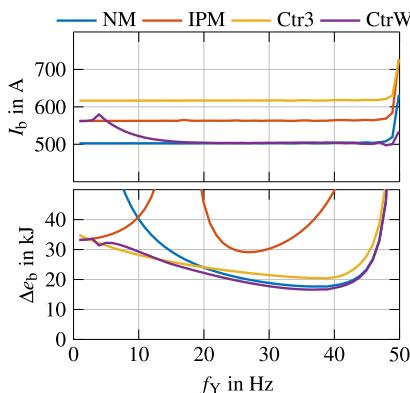


Abb. 42: Vergleich der Betriebsmodi hinsichtlich der Zweigenergieschwankung und dem Effektivwert des Zweigstroms bei unterschiedlichen Frequenzen f_Y [23].
Fig. 42: Comparison of the operation modes regarding the branch energy variation and the branch current RMS value at different frequencies of f_Y [23].

Mithilfe des Niederspannungsprüfstands des M3C aus Abb. 43 ist es möglich, die Regelung inklusive des Betriebsmodus CtrW messtechnisch zu validieren. Ein Vergleich der stationären Zeitverläufe von Zweigstrom und Zweigenergie zwischen analytischem Modell und experimentellen Ergebnissen ist in Abb. 44 dargestellt.

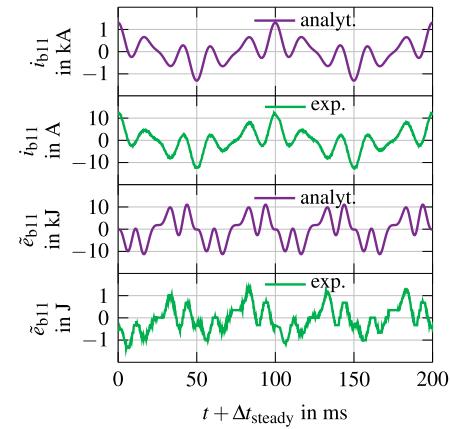


Abb. 44: Vergleich der berechneten (analyt.) und gemessenen (exp.) Zeitverläufe des Zweigstroms und der Zweigenergie für den CtrW bei $f_Y = 10$ Hz [23]. Faktor 100 zwischen analyt. und exp. Zeitverläufen von Strom und Spannung.
Fig. 44: Comparison of the calculated (analyt.) and measured waveforms (exp.) of the branch current and branch energy of the CtrW at $f_Y = 10$ Hz [23]. Factor 100 between analyt. and exp. waveforms of current and voltage.

branch energy variation Δe_b is chosen as an indicator for the size of the module capacitances, which are proportional to it, and the branch current RMS value I_b as an indicator for the branch losses. In order to influence these indicators using the control degrees of freedom, additional circulating currents are injected into the control structure so that the branch energy variation or the branch current RMS value of the converter is reduced. However, this results in a target conflict between the size of the module capacitance and the converter losses. For this reason, the additional circulating current parameters are calculated using an optimisation algorithm to set an optimal trade-off between the indicators. In the first step, the results of the novel operating mode, which is called Control W (short form: CtrW), are used in an analytical model of the M3C and compared with previously existing operating modes. In Fig. 42, it is shown that, in contrast to the known operating modes Normal Mode (short form: NM), Instantaneous Power Mode (short form: IPM) and the Control III (short form: Ctr3), a preferable compromise between branch energy variation and RMS branch current can be achieved. By using the low-voltage test bench of the M3C from Fig. 43, it is possible to validate the control, including the operating mode CtrW, by experiment. A comparison of the steady-state waveforms of branch current and branch energy of the analytical model and experimental results is shown in Fig. 44.

- [23] Rebecca Dierks and Axel Mertens. "Novel Operation Mode of the Modular Multilevel Matrix Converter based on a Dimensioning Algorithm". In: *EPE'22 ECCE Europe*. IEEE. 2022, pp. 1–10.

RuBICon: Regelbasierte Initialisierung von umrichterdominierten Netzen

von Mina Mirzadeh, M.Sc.
und Robin Strunk, M.Sc.

Die Schwarzstartfähigkeit ist eine der Herausforderungen für zukünftige Netze, die von dezentralen Wechselrichtern dominiert werden. Konventionell wird die Spannung von der Übertragungsnetzebene wiederhergestellt. Für aktive Verteilnetze und zellulare Energiesysteme ist es vorteilhaft, wenn die Spannung auch von der Niederspannungsebene her wieder aufgebaut werden kann. Bestehende Ansätze dazu hängen hauptsächlich von einer zentralen Steuereinheit und umfangreichen Kommunikationssignalen ab, die jedoch während eines Stromausfalls möglicherweise nicht verfügbar sind. In diesem Projekt wird daher ein neuartiger Ansatz für den Schwarzstart im Niederspannungsnetz vorgeschlagen, der weder Kommunikation noch eine zentrale Steuerung benötigt. Das Verfahren beruht auf netzbildenden Umrichtern, deren Regelung auf Statiken basiert und die als Master bezeichnet werden. Nach einem Stromausfall beginnt einer der Master die Netzspannung wieder hochzufahren. Die anderen Master synchronisieren sich darauf und tragen daraufhin gleichberechtigt zur Netzbildung bei [24]. Das Gleichgewicht zwischen verfügbarer Leistung und Bedarf im neu gebildeten Inselnetz wird mit Hilfe der Fähigkeiten zukünftiger intelligenter Zähler (Smart Meters, SM) zum Management innerer Lasten sichergestellt. Abb. 45 zeigt schematisch die netzbildende Regelung, bei der die Wirkleistung P und die Blindleistung Q gemessen werden, um die Sollwerte der Frequenz, ω^* und der Amplitude \hat{V}^* der Spannung anzupassen. Mit einer kaskadierten Spannungs- und Stromregelung und Pulsdauermodulation werden die Schaltsignale der Wechselrichter erzeugt. Die $P\text{-}\omega^*$ Statik der Master ermöglicht eine indirekte Bestimmung des Netzzustands durch Messung der Frequenz an jedem beliebigen Punkt des Netzes. Intelligente Zähler erkennen einen Versorgungsmangel an einem Frequenzabfall unter eine vordefinierte Schwelle, woraufhin Lasten abgeworfen werden. Die Lastaufteilung zwischen netzbildenden Umrichtern und die hohen Einschaltströme bei einem Kaltstart werden in einem Power Hardware-in-the-Loop (PHIL) Aufbau gemäß Abb. 46 unter Verwendung detaillierter Lastmodelle aus [25] untersucht. Die Ergebnisse in Abb. 47 demonstrieren die Bildung eines Inselnetzes im Labormaßstab durch zwei netzbildende Umrichter (MS und MF). Ein automatisches Lastmanagement, das nur auf lokalen Messungen beruht, wird von intelligenten Zählern gesteuert [26].

RuBICon: Rule-based Initialisation of Converter-dominated Grids

by Mina Mirzadeh, M.Sc.,
and Robin Strunk, M.Sc.

Black start capability is one of the challenges in the future grid, to be dominated by distributed power electronic inverters. Recent developments in active distribution networks and cellular power systems highlight bottom-up restoration plans in addition to conventional top-down approaches. Existing bottom-up restoration plans mainly depend on a central control unit and extensive communication signals, but these might not be available at the time of a power supply shortage. In this project, therefore, a novel bottom-up black start approach in the low-voltage grid is proposed that does not need conventional communication or an overlaid central control. The principle of the operation lies under the droop-based grid-forming control of inverters, referred to as Masters. in case of a general black-out, one Master leads a voltage ramp-up in a multi-master approach. Other Masters synchronize to the newly built-up voltage and further contribute to grid formation [24]. The demand-supply balance in the newly formed islanded grid will be ensured using the capabilities of future smart meters (intelligent meters) to manage internal loads.

Fig. 45 schematically shows the applied grid-forming control, where measured active power P and reactive power Q are used to provide set-points for frequency, ω^* and voltage magnitude \hat{V}^* . The corresponding vector is sent through dual voltage and current control loops to produce equivalent pulse-width-modulation signals. The active power-frequency droop of Masters enables an indirect communication of the grid status through measuring frequency at any point in the grid, including smart meters in residential units. According to predefined rules, a frequency drop below a certain threshold is perceived as a lack of supply, to which smart meters respond by switching off loads.

With a focus on the cold load pick-up response, the power-sharing among two grid-forming inverters in the presence of high inrush currents is investigated in a Power Hardware-in-the-Loop (PHIL) set up according to Fig. 46 using detailed load models from [25]. The results, as shown in Fig. 47, confirm the formation of a laboratory-scale islanded Microgrid through grid-forming inverters (Master Seed: MS and Master Fellow: MF). An autonomous dynamic partial loading only based on local measurements is then governed by smart meters (SM) [26].

- [24] Mirzadeh, M. et al. "A Rule-based Concept for a Bottom-up Multi-Master Black Start of an Inverter-Dominated Low-Voltage Cell". In: *2022 IEEE 13th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*. 2022.
- [25] Mina Mirzadeh und Axel Mertens. "Measurement-based Component-level Load Modeling for Evaluation of a Current-suppressing Loading Scenario for Microgrid Black Start Events". In: *2022 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*. 2022.
- [26] Mirzadeh, M. et al. "Power Hardware-in-the-Loop Verification of a Cold Load Pickup Scenario for a Bottom-up Black Start of an Inverter-dominated Microgrid". In: *EPE'22 ECCE Europe*. 2022.

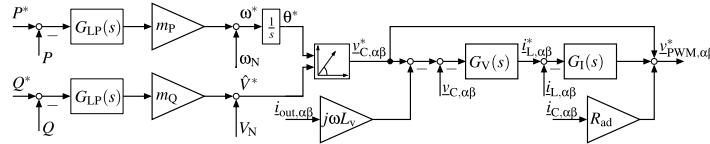


Abb. 45: Netzbildende Regelung von Wechselrichtern mit Statiken und kaskadierter Spannungs- und Stromregelung
Fig. 45: Droop-based Grid-forming control of inverters with dual-loop voltage and current control

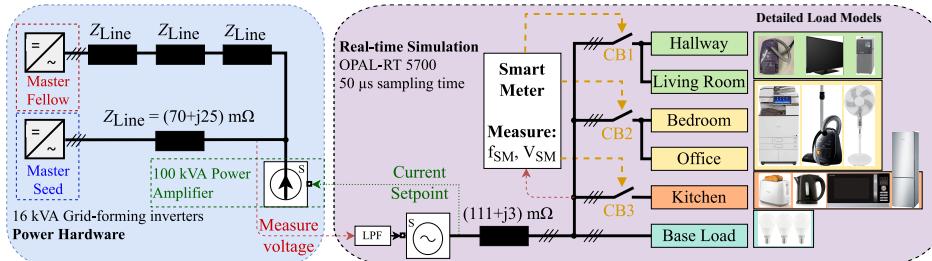


Abb. 46: Power Hardware-in-the-Loop-Aufbau bestehend aus 2 netzbildenden Umrichtern, einem Leistungsverstärker, Niederspannungskabelmodellen und auf Echtzeitsimulationen basierenden aggregierten Lastmodellen mehrerer Haushaltsgeräte in einem symmetrischen Betrieb
Fig. 46: Power Hardware-in-the-Loop setup consisting of 2 Grid-forming inverters, a power amplifier, low-voltage cable boxes, and Real-time Simulation-based aggregated load models of multiple residential appliances in a symmetric operation

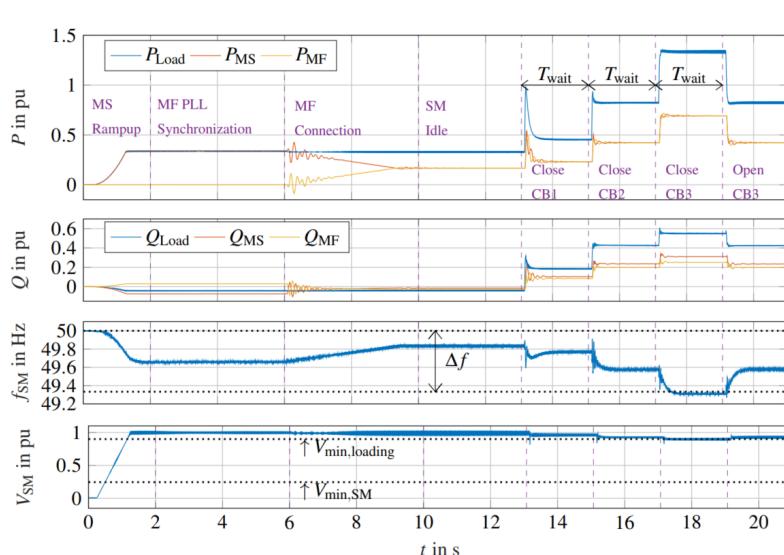


Abb. 47: PHL-Messungen der Umrichter und des intelligenten Messgeräts während des vorgeschlagenen Schwarzstarts. Die Basiswerte des pu Systems sind die Nennleistung jedes netzbildenden Umrichters und die Netznennspannung
Fig. 47: PHL measurements of the inverters and the smart meter during the proposed black start sequence. The base values of the per-unit system are the rated power of each Grid-forming inverter and the nominal grid voltage

Aktive Gatetreiber für SiC-Umrichter in Elektrofahrzeugen

von Julius Wiesemann, M.Eng.

In Antriebssystemen mit Umrichtern auf Basis von schnell schaltenden Leistungshalbleitern wie SiC MOSFETs können durch die steilen Schaltflanken neben erhöhten EMV-Emissionen auch Schäden an den elektrischen Maschinen durch Lagerströme oder Teilentladung in den Windungen entstehen. Klassische Abhilfemaßnahmen dagegen sind die Reduktion der Schaltgeschwindigkeit durch erhöhte Gatewiderstände oder die Verwendung von Ausgangsfiltern. Beide Varianten verringern jedoch den Wirkungsgrad des Umrichters. Filter sorgen zusätzlich für ein erhöhtes Umrichtervolumen und Gewicht. Eine weitere Option stellen aktive Gatetreiber dar, die das Schaltverhalten eines MOSFET beeinflussen können.

Das am IAL verwendete Konzept für einen aktiven Gatetreiber sieht vier Gatewiderstände für das Einschalten und vier Gatewiderstände für das Ausschalten vor. Über einen Kleinsignal-MOSFET können die Gatewiderstände in Zeitschritten von 2 ns separat ein- und ausgeschaltet werden. Dadurch können die Spannungs- und Stromänderungsrate eines SiC MOSFETs unabhängig voneinander gesteuert werden. So lässt sich beispielsweise das dv/dt einstellen, während die Schaltverluste durch eine schnelle Stromflanke gering gehalten werden. Auch eine Verringerung der Überspannung beim Abschalten kann durch eine Verlangsamung der Stromänderungsrate im letzten Teil der Stromflanke erreicht werden.

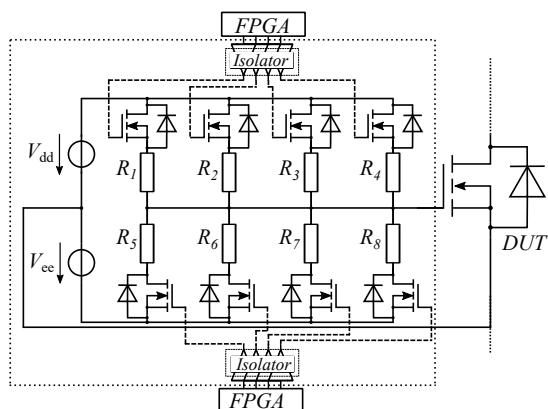


Abb. 48: Schaltbild des aktiven Gatetreibers
Fig. 48: Schematic of the active gate driver [27]

In Doppelpulsmessungen kann der Vorteil des aktiven Gatetreibers gegenüber einem herkömmlichen Gatetreiber gezeigt werden. Kombiniert man Doppelpulsversuche bei Strömen, wie sie in einem Umrichter mit sinusförmigem Ausgangsstrom auftreten würden, zeigt sich, dass der aktive Gatetreiber das

Active Gate Drivers for SiC Inverters in Electric Vehicles

by Julius Wiesemann, M.Eng.

In drive systems with converters based on fast-switching power semiconductors such as SiC MOSFETs, the fast switching transients can cause not only increased EMC emissions, but also damage to the electrical machines due to bearing currents or partial discharges in the windings. Classical remedies to this are reducing the switching speed by increasing the gate resistances or the use of output filters. However, both variants reduce the efficiency of the converter. Filters also increase the converter volume and weight. Active gate drivers, which can influence the switching behavior of a MOSFET, are another option.

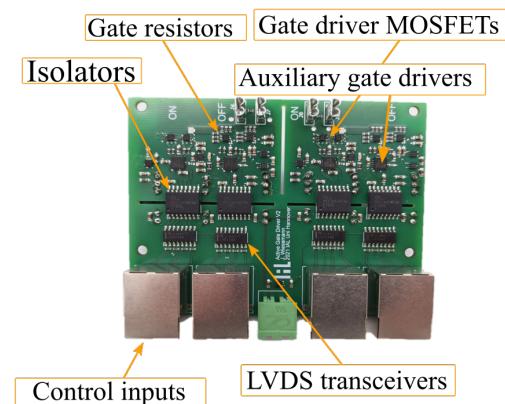


Abb. 49: Foto des aktiven Gatetreibers [27, 28]
Fig. 49: Photograph of the active gate driver [27, 28]

The concept for an active gate driver used at IAL provides four gate resistors for the turn-on and four gate resistors for the turn-off. Via a small-signal MOSFET, the gate resistors can be switched on and off separately in time steps of 2 ns. This allows the rates of voltage and current change of a SiC MOSFET to be controlled independently. For example, dv/dt can be adjusted while switching losses are kept low by a fast current transient. Also, a reduction in the overvoltage at turn-off can be achieved by slowing down the rate of current change in the last part of the current transient.

In double pulse measurements, the advantage of the active gate driver over a conventional gate driver can be shown. Combining several double-pulse tests carried out at currents that would occur in an inverter with a sinusoidal output current shows that the active gate driver can keep dv/dt constant, while the conventional gate driver (CGD) exhibits the typical variation of the switching speed with the load current. At the same time, switching losses are reduced compared to those of the conventional gate driver, especially at high currents.

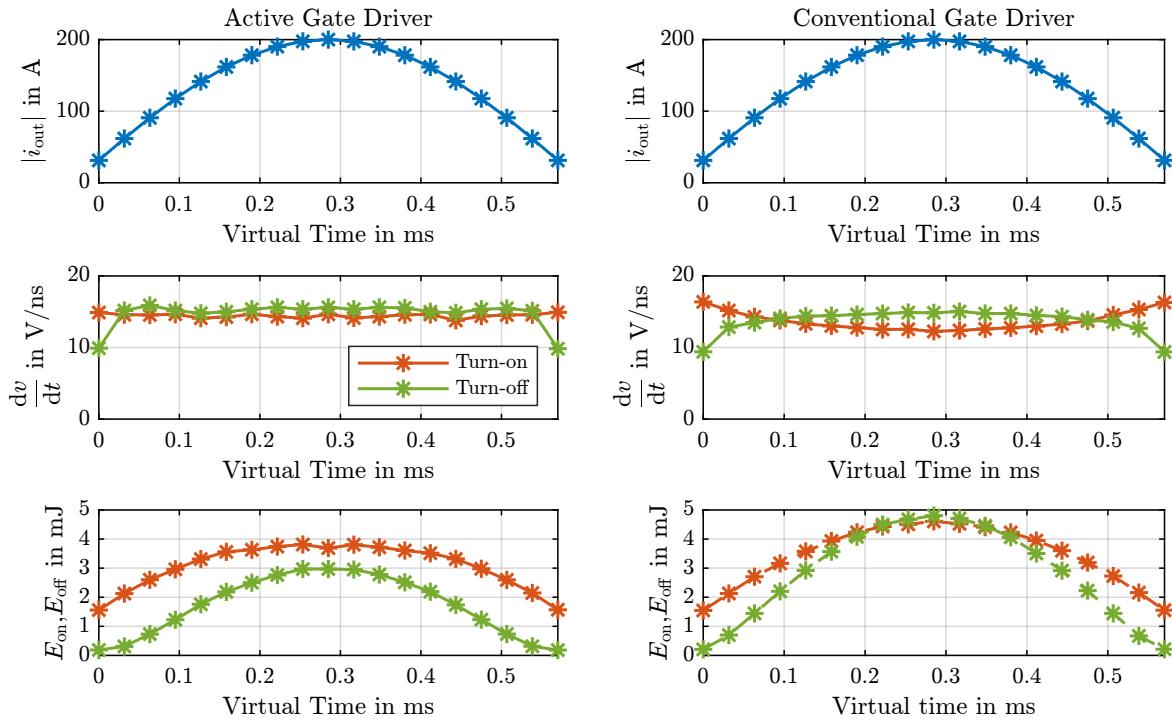


Abb. 50: Doppelpulsmessungen zur Nachbildung eines sinusförmigen Stromverlaufs [26]
Fig. 50: Double-pulse measurements to simulate a sinusoidal output current [29]

du/dt konstant halten kann, während der herkömmliche Gatetreiber (CGD) die typische Variation der Schaltgeschwindigkeit mit dem Laststrom aufweist. Gleichzeitig werden die Schaltverluste insbesondere bei hohen Strömen im Vergleich zum herkömmlichen Gatetreiber verringert.

Neben der Abhängigkeit vom Laststrom besteht eine Abhängigkeit des du/dt von der Zwischenkreisspannung des Umrichters. Diese unterliegt insbesondere bei Elektrofahrzeugen größeren Schwankungen. Der aktive Gatetreiber kann jedoch so angesteuert werden, dass er unabhängig von der Zwischenkreisspannung konstante Schaltzeiten der MOSFETs erreicht.

Dadurch, dass die Ansteuerung des Gatetreibers mehr Freiheitsgrade aufweist als jene für einen herkömmlicher Gatetreiber, müssen Verfahren zur Bestimmung der optimalen Ansteuerparameter eingesetzt werden. Das am IAL verwendete Verfahren beruht auf einem künstlichen neuronalen Netz, das in Abhängigkeit von Zwischenkreisspannung, Laststrom und Halbleitertemperatur die optimalen Einstellungen des Treibers vorausberechnet. Dadurch sind für den Betrieb des Treibers keine weiteren Mess- und Regelglieder notwendig, was die Komplexität verringert und die Robustheit erhöht.

In addition to the dependence on the load current, there is a dependence of dv/dt on the DC-link voltage of the inverter. The DC-link voltage is subject to fluctuations, especially in electric vehicles. However, the active gate driver can be controlled in such a way that it achieves constant switching times independent of the DC-link voltage.

Since the control of the gate driver has more degrees of freedom than that of a conventional gate driver, it is necessary to use methods that can determine the optimum control parameters. The method used at IAL is based on an artificial neural network, which calculates the optimum driver settings as a function of DC-link voltage, load current and semiconductor temperature. This means that no further measurement and control elements are required for the operation of the driver, which reduces complexity and increases robustness.

- [27] Wiesemann, J. and Mertens, A. "An Isolated Variable-Resistance Active Gate Driver for Use in SiC-Driven Inverters". In: *IECON 2021 – 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. 2021, pp. 1–6.
- [28] Wiesemann, J. and Mertens, A. "Experimental Comparison of an Active Gate Driver and a dv/dt Filter to Reduce the Output dv/dt of a SiC EV Drive Inverter". In: *IECON 2022*. 2022, pp. 1–6.
- [29] Wiesemann, J. et al. "Control of an Active Gate Driver for an Electric Vehicle Traction Inverter Using Artificial Neural Networks". In: *EPE'22 ECCE Europe*. 2022, pp. 1–10.

Vollintegrierte und system-optimierte Elektroniklösung am Solarmodul

von Tobias Manthey, M.Sc.
und Tobias Brinker, M.Sc.

Solaranlagen auf Dächern oder an Fassaden stellen ein bislang weitgehend ungenutztes Flächenpotenzial dar, da kleinteilige Gebäudehüllen die Kosten erhöhen, individuelle Montagelösungen benötigen und zudem den Wirkungsgrad bei nicht optimal ausgerichteten Modulen verringern. Im Rahmen des Projekts Voyager-PV werden diese Problematiken adressiert. Die Grundidee dabei ist, Wechselrichter und digitale Technik in das Solarmodul zu integrieren (AC-Solarmodule) und dadurch Vorteile bei Kosten, Netzdienlichkeit aber auch Zuverlässigkeit und Sicherheit zu erreichen.

Abb. 51 illustriert die dreistufige Wechselrichtertopologie und das Regelungsschema. Bei diesem Ansatz wird das *maximum power point tracking* (MPPT) auf einem Mikrocontroller (μC) implementiert, welcher die Berechnung der Ausgangsleistung durch die messtechnisch ausgewerteten Netzgrößen durchführt und den gewünschten Arbeitspunkt einstellt. Der Vorteil des vorgestellten Regelungsschemas liegt in der reduzierten Anzahl an Sensoren und einer geringeren Komplexität.

Für die auf Galliumnitrid (GaN) Transistoren basierende einphasige Wechselrichterstufe (Inverter) konnten zwei hybrid unipolare Modulationsverfahren abgeleitet werden, die unabhängig vom Leistungsfaktor zu einer Harmonisierung der Gleichtaktspannung führen und damit Leckströmen durch die Modularleitkapazität vorgeben.

Fully Integrated and System-Optimized Electronics Solution on a Solar Module

by Tobias Manthey, M.Sc.,
and Tobias Brinker, M.Sc.

Solar systems on roofs or facades represent a poorly utilized area, since small building facades increase cost, require special mounting solutions and also reduce efficiency if the modules are not optimally oriented. The Voyager-PV project addresses these problems. The basic idea is to integrate inverters and digital technology into the solar module (AC solar module) and thus achieve advantages in terms not only of cost and grid utilization but also of reliability and safety.

Fig. 51 illustrates the three-level inverter topology and control scheme. In this approach, the maximum power point tracking (MPPT) is implemented on a microcontroller (μC), which performs the calculation of the output power using the measured grid parameters and sets the desired operating point. The advantages of the control scheme presented are a reduced number of sensors and a lower complexity. For the single-phase inverter stage based on gallium nitride (GaN) transistors, two hybrid unipolar modulation schemes could be derived which lead to harmonization of the common-mode voltage independent of the power factor, thus eliminating leakage currents through the module leakage capacitance.

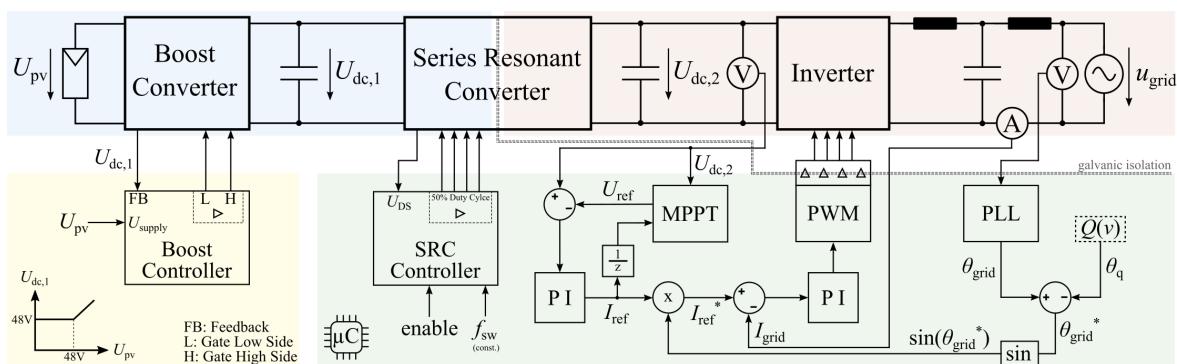


Abb. 51: Regelungsschema des dreistufigen Systems (PI - Proportional Integral, PLL - Phase-Locked Loop, PWM - Pulse Width Modulation, $Q(v)$ - Reactive power control input). Zur einfacheren Veranschaulichung ist der Ausgangsfilter schematisch und die Relais nicht dargestellt.

Fig. 51: Control schematic of the three-stage system (PI – Proportional Integral, PLL – Phase-Locked Loop, PWM – Pulse Width Modulation, $Q(v)$ – Reactive power control input). For a simpler illustration, the output filter is shown schematically and relays are removed.

Die Integration von Wechselrichtern mit hoher Leistungsdichte ist eine komplexe Problemstellung. Insbesondere unter dem Gesichtspunkt der Entwärmung können Leistungshalbleiter und passive Komponenten zwischen den PV-Modulen und der Dachfläche hohen Umgebungstemperaturen ausgesetzt sein. Der Ansatz eines Spritzgussgehäuses mit verbesselter Wärmeleitfähigkeit vereint die Anforderungen an die UV-Beständigkeit und die haftenden Eigenschaften zur Fixierung der Modulelektronik am Solarmodul unter Umwelteinflüssen.

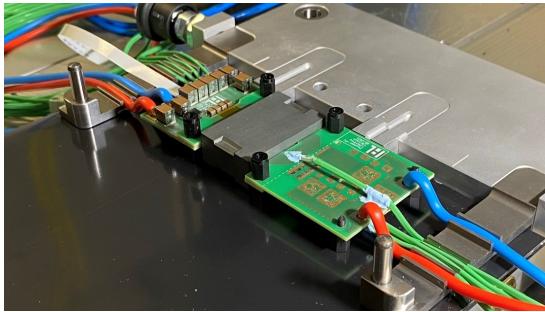


Abb. 52: Die Platine wird in eine Haltevorrichtung eingespannt und für den Vergussprozess vorbereitet. Darunter befindet sich das Solarmodul.
Fig. 52: The PCB is clamped in a holding mechanism of the molding tool and prepared for the molding process. The solar module is located underneath.

Unter dem Aspekt der industriell-fertigbaren Verbindung zu den Querverbindern und um die thermische Belastung der Solarzellen zu minimieren, wird die Leiterplatte in der Mitte des Moduls platziert. Eine Besonderheit ist die direkte Kontaktierung der Querverbinder mit der Leiterplatte, die durch Schlitze in der Leiterplatte gesteckt und verlötet werden, wie in Abb. 54 (rechts) dargestellt. Dies ermöglicht die Platzierung von Bypass-Dioden oder anderen Varianten wie aktiven Schaltern oder Sub-String-Spannungsmessungen direkt auf der Leiterplatte, um das Problem der partiellen Verschattung zu lösen.

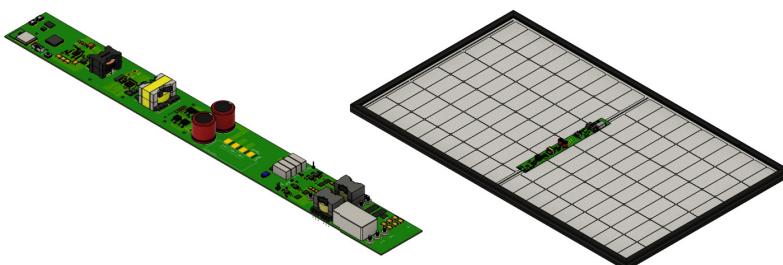


Abb. 54: 3-D Modell des Hardware-Prototypen. Links: PCB mit den leistungselektronischen Komponenten. Mitte: Solarmodul und Platzierung der Elektronik auf der Rückseite des Moduls. Rechts: Verbindung zwischen Solarmodul und PCB via Querverbindern, die aus dem Modul rausgeführt und auf der PCB verlötet werden.
Fig. 54: 3-D model of the hardware prototype. Left: PCB with the power electronic components. Center: Solar module and placement of the electronics on the back of the module. Right: Connection between solar module and PCB via cross conductors, which are routed out of the module and soldered onto the PCB.

Integrating high power density inverters is challenging. Especially from a cooling point of view, power semiconductors and passive components can be exposed to a high ambient temperature between the PV modules and the roof surface. The approach of using molded package with improved thermal conductivity combines the requirements for UV resistance and adhesive compatibility for fixing the hardware to the solar module despite environmental influences.

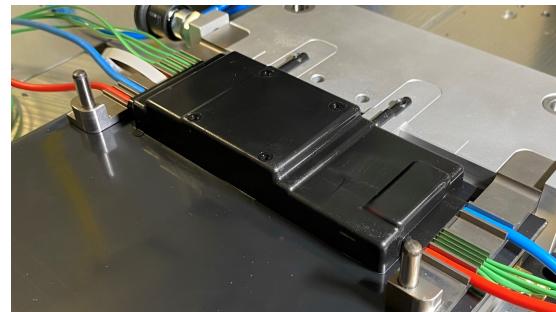
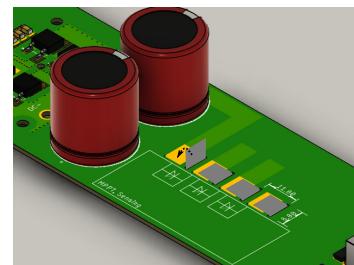


Abb. 53: Für erste Untersuchungen wurde ein Teil der Elektronik vergossen und auf der Rückseite des Solarmoduls verklebt.
Fig. 53: For initial investigations, part of the electronics was encapsulated and adhesively mounted on the back of the solar module.

Due to the need to design a manufacturable connection to the cross conductors and also to keep the thermal stress in the solar cells as low as possible, the PCB is mounted in the center of the module. A particular feature is the direct connection of the cross conductors to the PCB, which are inserted through slots in the PCB and soldered, as shown in Fig. 54 (right). This allows the placement of bypass diodes or other solutions such as active switches or sub-string voltage measurements to address the problem of partial shading directly on the PCB.



Besondere Aktivitäten | Special Activities

EPE'22 ECCE Europe

von Prof. Dr.-Ing. Axel Mertens

Das Jahr 2022 war für das *IAL* ein besonderes Jahr. Die *EPE ECCE Europe*, die größte internationale Konferenz in Europa im Bereich der Leistungselektronik und deren Anwendungen, wurde erstmals in Hannover ausgetragen. Dazu kamen vom 5. bis zum 9. September 2022 mehr als 800 Teilnehmende aus Industrie und Forschung in Niedersachsens Landeshauptstadt, um sich über die neusten Entwicklungen auf diesem Gebiet auszutauschen und sich nach zwei Jahren virtueller Tagungen zum ersten Mal persönlich wiederzusehen. Die unerwartet hohe Teilnehmerzahl, 650 eingereichte Beiträge, ein hochgelobtes technisch-wissenschaftliches Rahmenprogramm, die rekordträchtige Zahl an Sponsoren und Ausstellern aus der Industrie und nicht zuletzt die gesellschaftlichen Programmfpunkte ließen das Großereignis zu einem vollen Erfolg und damit zu einem Aushängeschild für das *IAL* und die *Leibniz Universität Hannover* werden.



Abb. 55: EPE'22 ECCE Europe-Banner über dem Eingang des Welfenschlosses

Fig. 55: EPE'22 ECCE Europe banner over the Welfenschloss entrance

Der Vorschlag zur Austragung der *EPE* in Hannover wurde von Prof. Mertens bereits 2018 bei den Entscheidungsgremien eingereicht, der endgültige Zuschlag folgte 2019. Die Tagungsleitung lag bei Prof. Mertens als Chairperson, Prof. Ponick und Jun.-Prof. Friebe als Co-Chairs sowie dem *Local Scientific Committee (LSC)* mit den fachnahen norddeutschen Professor:innen. Von Anfang an war die Unterstützung durch *Kenzler Conference Management (kcm)* ein Erfolgsfaktor, wodurch auch die Belastung des *IAL* durch die Vorbereitung und Durchführung der Tagung im Rahmen gehalten werden konnte. Als Veranstaltungsort kam nur das *Hannover Congress Centrum (HCC)* in Frage, dort konnten die Vorträge, Poster Sessions, Ausstellung und Podiumsdiskussionen in verschiedenen passenden Räumen durchgeführt werden und die große Anzahl von Teilnehmenden auch bestens verpflegt werden. Andere Tei-

EPE'22 ECCE Europe

by Prof. Dr.-Ing. Axel Mertens

The year 2022 was a special year for the *IAL*. The *EPE ECCE Europe*, the largest international conference in Europe in the field of power electronics and its applications, was held in Hannover for the first time. To this end, more than 800 participants from industry and research came to Lower Saxony's state capital from 5 to 9 September 2022 to exchange information on the latest developments in this field and to meet in person for the first time after two years of virtual conferences. The unexpectedly high number of participants, 650 submitted contributions, a highly praised technical-scientific supporting programme, the record-breaking number of sponsors and exhibitors from industry and, last but not least, the social programme made the major event a complete success and thus a flagship for the *IAL* and *Leibniz University Hannover*.



Abb. 61: Wiedersehen bekannter Personen der Leistungselektronik im Lichthof der LUH

Fig. 61: Reunion of well-known people from the field of power electronics in the LUH atrium

The proposal to hold the *EPE* in Hannover was submitted by Prof. Mertens to the decision-making bodies as early as 2018, with the final award following in 2019. The conference was managed by Prof. Mertens as Chairperson, Prof. Ponick and Jun.-Prof. Friebe as Co-Chairs as well as the *Local Scientific Committee (LSC)* consisting of the North German professors close to the subject. From the beginning, the support of *Kenzler Conference Management (kcm)* was a success factor, which also kept the workload of the *IAL* resulting from the preparation and implementation of the conference within reasonable limits. The only possible venue was the *Hannover Congress Centrum (HCC)*, where the lectures, poster sessions, exhibition and panel discussions could be held in various suitable rooms and the large number of participants could also be well catered for. Other parts of the conference, such as tutorials and a reception, took place in the imposing rooms of the *LUH* around the atrium.

le der Tagung, wie Tutorien und ein Empfang, fanden in den repräsentativen Räumen der *LUH* rund um den Lichthof statt.



Abb. 56: Kontaktaufnahme mit der Industrie: Zahlreiche Stände in der Eilenriedehalle

Fig. 56: Networking with the industry: Numerous booths in the Eilenriedehalle

Nachdem die Vorüberlegungen zum Konzept der Tagung incl. des technischen Rahmenprogramms bereits Teil des Vorschlags waren, begann die konkrete Arbeit im Herbst 2020. Vor allem mussten Sponsoren gewonnen werden, um auch finanziell erfolgreich zu sein. So entstand mit 13 Firmen eine rekordverdächtige Liste, angeführt von *Infineon Technologies AG*, *Volkswagen AG*, *BLOCK Transformatoren-Elektronik GmbH*, *Cariad SE*, *dSpace*, *Mitsubishi Electric Europe B.V.*, *Nexperia*, *SMA Solar Technology AG* u.v.m. Hinzu kam eine Anzahl von Ausstellern, so dass die Eilenriedehalle im *HCC* mit mehr als 35 Ständen gut gefüllt werden konnte. Die hervorragende Vernetzung des *IAL*, aber auch der Kollegen des *LSC* mit der Industrie haben das ermöglicht.



Abb. 57: Rückfragen zu Vorträgen aus dem Publikum

Fig. 57: Questions on presentations from the audience

Fachliches Programm

Eine wichtige Grundlage für den großen Erfolg war ein neues, stringentes Konzept für das technisch-wissenschaftliche Rahmenprogramm. Es gruppieren sich um sechs unterschiedliche *Focus Topics*, die bereits zwei Jahre vor der Tagung im *LSC* ausgewählt wurden. Drei von ihnen befassten sich mit Technologietreibern für künftige Innovationen in der Leistungselektronik (**New Power Electronic Devices**, **Integration and Adverse Effects of WBG Devices** und **Batteries in Power Electronics**). Drei weitere *Focus Topics* behandelten wichtige Anwendungstrends, die großen Einfluss auf künftige Märkte und Anforderungen an leistungselektronische



Abb. 62: Eindrücke der Konferenz: Gute Stimmung bei den Teilnehmenden

Fig. 62: Impressions of the conference: Great atmosphere among the participants

As the preliminary considerations concerning the concept of the conference including the technical framework programme were already part of the proposal, the actual work began in autumn 2020. Above all, sponsors had to be acquired in order to also be financially successful. This resulted in a record-breaking list of 13 companies, headed by *Infineon Technologies AG*, *Volkswagen AG*, *BLOCK Transformatoren-Elektronik GmbH*, *Cariad SE*, *dSpace*, *Mitsubishi Electric Europe B.V.*, *Nexperia*, *SMA Solar Technology AG* and many more. In addition, there were a number of exhibitors, so that the Eilenriedehalle in the *HCC* was filled with more than 35 stands. The excellent networking of the *IAL*, and also of the colleagues of the *LSC* with the industry, made this possible.



Abb. 63: Angenehme Atmosphäre im Blauen Saal des *HCC*

Fig. 63: Pleasant atmosphere in the Blue Hall of the *HCC*

Technical Programme

An important basis for the great success was a new, streamlined concept for the technical-scientific framework programme. It was grouped around six different *Focus Topics*, which were already selected two years before the conference in the *LSC*. Three of these dealt with technology drivers for future innovations in power electronics (**New Power Electronic Devices**, **Integration and Adverse Effects of WBG Devices** and **Batteries in Power Electronics**). Three further *Focus Topics* dealt with important application trends that will have a major influence on future markets and requirements for power electronic systems (**Electrification of Aircraft**, **Electrification of On- and Off-Road Vehicles** and **Electricity and Hydrogen-based Energy Systems**). These six *Focus Topics* were each structured with a keynote, a session with

Systeme haben werden (*Electrification of Aircraft*, *Electrification of On- and Off-Road Vehicles* und *Electricity and Hydrogen based Energy Systems*). Diese sechs *Focus Topics* wurden ausgestaltet mit je einer Keynote, einer Session mit eingeladenen Vorträgen und einer Podiumsdiskussion am späten Nachmittag, sowie mit Tutorials (am 5.9. in der LUH) und mit Exkursionen zu Standorten in der Umgebung (am 9.9.) abgerundet. Beispiel macht Schule: Das Konzept der *Focus Topics* mit den diversen Formaten wird bei mehreren zukünftigen Tagungen Nachahmer haben.



Abb. 58: Gut besuchte Säle in den verschiedenen Veranstaltungen

Fig. 58: Well-attended rooms in the various event venues

Die Hauptveranstaltungstage der *EPE'22 ECCE Europe* trugen sich von Dienstag bis Donnerstag im HCC zu. Neu war hier die Aufteilung des Tages in einen Block mit Vorträgen (u.a. Keynote) am Morgen, den Poster Sessions um die Mittagszeit (in der Eilenriedehalle, so dass auch die Möglichkeit zu Gesprächen mit den Ausstellern bestand) und einem weiteren Block mit Vorträgen am Nachmittag, gefolgt von den sehr gut besuchten und interaktiven Podiumsdiskussionen.



Abb. 59: Lecture Session in der Niedersachsenhalle

Fig. 59: Impressions of the conference: Lecture Session in the Niedersachsenhalle

Soziale Events

Neben dem fachlichen Konferenzprogramm wurde ein besonderes Augenmerk auf die Planung einer Vielzahl von sozialen Events gelegt — besonders wichtig für die Pflege der Netzwerke nach der langen Zeit ohne Gelegenheiten zu persönlichen Treffen. So wurde beispielsweise ein Empfang für die *IEEE PELS Young Professionals* organisiert — eine gute Gelegenheit für ein informelles und angenehmes Kennenlernen und Networking im Lichthof der LUH. Weiterhin wurde am Dienstag eine Veranstal-

invited lectures and a panel discussion in the late afternoon, as well as tutorials (on 5. September in the LUH) and rounded off with excursions to sites in the surrounding area (on 9. September). This example sets a benchmark: the concept of the *Focus Topics* with their diverse formats will have imitators at several future conferences.



Abb. 64: Diverse Future Leadership, mitorganisiert von Rebecca Himker (rechts)

Fig. 64: Diverse Future Leadership, co-hosted by Rebecca Himker (right)

The main event days of the *EPE'22 ECCE Europe* took place from Tuesday to Thursday at the HCC. What was new here was the division of the day into a block of presentations (including keynote) in the morning, the poster sessions around lunchtime (in the Eilenriedehalle, so that there was also the opportunity to talk to the exhibitors) and another block of presentations in the afternoon, followed by the very well-attended and interactive panel discussions.



Abb. 65: Eindrücke der Konferenz: Fachdiskussionen während der Poster Sessions

Fig. 65: Impressions of the conference: technical discussions during the Poster Sessions

Social Events

In addition to the technical conference programme, special attention was paid to planning a variety of social events, which are especially important for maintaining networks after the long period without opportunities for face-to-face meetings. For example, a reception was organised for the *IEEE PELS Young Professionals* – a good opportunity for an informal and pleasant get-together and networking in the atrium of the LUH. Furthermore, the event *Diverse Future Leadership* by *IEEE Women in Engineering* was included on Tuesday. Here, successful female and male managers reported on their career paths in business and science in an interactive panel discussion. This side event was held in this

tung *Diverse Future Leadership* von *IEEE Women in Engineering* einbezogen. Hier berichteten erfolgreiche Managerinnen und Manager in einer interaktiven Podiumsdiskussion über ihre Karrierewege in Wirtschaft und Wissenschaft. Diese Nebenveranstaltung wurde zum ersten Mal in diesem Format durchgeführt und erwies sich direkt als voller Erfolg. Am Mittwochabend wurde das traditionelle Gala-Dinner im Kuppelsaal des HCCs veranstaltet. Die Stimmung war festlich und die Teilnehmenden konnten die Konferenz und hannoversche Traditionen fernab der fachlichen Inhalte genießen. Am Donnerstagabend stand das Brauhaus-Event auf dem Programm, ein geselliges Beisammensein in ungezwungener Atmosphäre mit typisch hannoverschem Flair.



Abb. 60: Traditionelles Konferenz-Dinner am Mittwochabend im Kuppelsaal des HCC

Fig. 60: Traditional Conference Dinner on Wednesday evening in the Kuppelsaal of the HCC

Über den Freitag verteilt fanden schlussendlich die *Technical Visits* statt, die passend zu den *Focus Topics* ausgewählt wurden. Verschiedene Firmen in der Umgebung des Austragungsortes boten den Teilnehmenden die Möglichkeit, Einblicke in deren Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu erhalten. Besucht wurden unter anderem die *Block Transformatoren GmbH* in Verden, die *Volkswagen Battery System Factory* sowie das *Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) Research Airport* in Braunschweig und selbstverständlich auch das *IAL*.

An dieser Stelle sei noch einmal ein herzliches Dankeschön an alle helfenden Hände ausgesprochen, die es ermöglicht haben, dass die *EPE'22 ECCE Europe* ein derart großer Erfolg wurde. Ohne das Engagement und die Unterstützung aller Organisierenden, Sponsoren und Helfenden wäre diese Konferenz nicht möglich gewesen.

Die Community der Leistungselektronik trifft sich vom 4. bis 8. September 2023 erneut bei der *EPE'23 ECCE Europe* – dieses Mal bei unseren Freund:innen und Kolleg:innen in Aalborg, Dänemark.

Weitere Eindrücke, Informationen und Fotos der Konferenz sind weiterhin auf der offiziellen Website epe2022.com zu finden.

format for the first time and immediately proved to be a complete success.

On Wednesday evening, the traditional gala dinner was held in the Kuppelsaal of the HCC. The atmosphere was festive and the participants were able to enjoy the conference and Hanoverian traditions away from the professional content. On Thursday evening, the programme included the Brauhaus event, a social gathering in an informal atmosphere with typical Hanoverian flair.



Abb. 66: Geselliges Beisammensein beim Brauhaus-Event bei Meiers Lebenslust

Fig. 66: Social get-together at the Brauhaus Event at Meiers Lebenslust

The *Technical Visits*, which were selected to match the *Focus Topics*, took place on Friday and offered participants the opportunity to gain an insight into the research and development work of various companies in the region of the venue. Among others, *Block Transformatoren GmbH* in Verden, the *Volkswagen Battery System Factory* as well as the *German Aerospace Centre (DLR) Research Airport* in Braunschweig and, of course, the *IAL* were visited.

We would like to take this opportunity to thank all the helping hands who made the *EPE'22 ECCE Europe* such a great success. Without the commitment and support of all the organisers, sponsors and helpers, this conference would not have been possible.



Abb. 67: Prof. Ponick, Silke Kenzler (kcm) und Prof. Mertens (v.l.) beim Gala-Dinner im Kuppelsaal des HCC

Fig. 67: Prof. Ponick, Silke Kenzler (kcm) and Prof. Mertens (from left to right) at the Gala Dinner in the Kuppelsaal of the HCC

The power electronics community will meet again from 4 to 8 September 2023 at the *EPE'23 ECCE Europe* – this time with our friends and colleagues in Aalborg, Denmark.

More impressions, information and photos of the conference can still be found on the official website epe2022.com.

Neues in und von FEMAG

von Dr.-Ing. Jörn Steinbrink

In dieser Periode gibt es zu FEMAG neben den inhaltlichen Arbeiten weitreichende organisatorische Neuigkeiten mit der Übernahme der Rechte an der Software durch die Gamma Technologies LLC, welche auf dem Anwendertreffen 2022 bekannt gegeben wurde.

Die Vorträge des Anwendertreffens 2021 in Aalen, welche glücklicherweise in Präsenz durchgeführt werden konnten, hatten als thematischen Schwerpunkte die Berechnung von Verlusten und die Bestimmung von Maschinenparametern. Vorgestellt wurden zudem die kontinuierlich fortgeführte Arbeit an den FEMAG-Modulen DC, AC, ME, TH und TS sowie FEMAGtools. Für das Postprocessing hat das analytische Programm AMELA während der letzten zwei Jahre erheblich an Funktionsumfang gewonnen, es wurde umfangreich validiert und wird bei einigen Anwendern praktisch eingesetzt, so dass hierzu beim Anwendertreffen 2022 in Kassel ein größerer Raum eingeräumt wurde, denn die Bestimmung von Verlusten in Permanentmagneten und gezielte Maßnahmen zur Verringerung ist eines der brennenden Themen. Es wurde deutlich aufgezeigt, dass nur bei genauer Kenntnis der Feldverhältnisse verlässliche Aussagen zu verlustreduzierenden Maßnahmen durch Segmentierung getroffen werden können, und dies ohne aufwändige numerische Parameterstudien, sondern mit wenigen gezielten FE-Rechnungen und nachgelagerter analytischer Betrachtung. Weitere Themenblöcke beider Anwendertreffen waren die numerische Berechnung bzw. die numerisch unterstützte Berechnung von Induktionsmaschinen, die Parameteridentifikation, Entwicklungstrends bei Permanentmagneten und die Berechnung von Parasitäreffekten in elektrischen Maschinen wie Lagerströme.

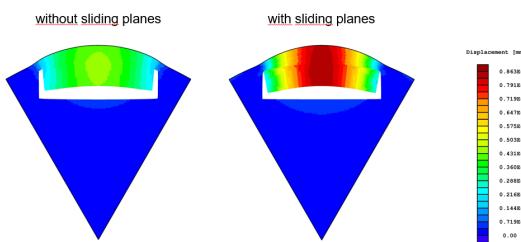


Abb. 68: Einführung von Gleitschichten in ME
Fig. 68: Introduction of sliding plane in ME

Novelties around FEMAG

by Dr.-Ing. Jörn Steinbrink

In this period, in addition to the work on the content, there are important organisational changes to FEMAG with the takeover of the rights to the software by Gamma Technologies LLC, which was announced at the 2022 Users' Meeting.

The presentations of the user meeting 2021 in Aalen, which fortunately could be held in presence, focused on the calculation of losses and the determination of machine parameters. In addition, the continuing work on the FEMAG modules DC, AC, ME, TH and TS as well as FEMAGtools were presented. For post-processing, the analytical programme AMELA has become considerably more functional during the last two years, it has been extensively validated and is being used in practice by some users, so that more space was given to this at the user meeting 2022 in Kassel, because the determination of losses in permanent magnets and targeted measures to reduce them is one of the burning issues. It was clearly shown that only with exact knowledge of the field conditions can reliable statements be made on loss-reducing measures through segmentation, and this without extensive numerical parameter studies, but with a few targeted FE calculations and following analytical analysis. Further topics of both user meetings were the numerical calculation or the numerically supported calculation of induction machines, the parameter identification, development trends for permanent magnets and the calculation of parasitic effects in electrical machines such as bearing currents.



Abb. 70: Auditorium des Anwendertreffens 2021 in Aalen
Fig. 70: Auditorium of User Meeting 2021 in Aalen

Sicherlich eine Überraschung für Viele war beim Anwendertreffen 2022 die Bekanntgabe des Wechsels von FEMAG in ein neues Zuhause. Aus dem Partner Gamma Technologies LLC wurde der neue Inhaber der Softwarerechte an den FEMAG-Modulen. Die Entwickler von FEMAG haben lange die Vor- und Nachteile eines solchen Schrittes abgewogen und sind zum Schluss gekommen, dass dieser Schritt einerseits inhaltlich einen deutlichen Schub in der Entwicklung ermöglicht und andererseits die Besonderheit von FEMAG mit einer engen Zusammenarbeit mit allen Anwendern erhalten bleiben kann. Die Geschäftsstrategie von Gamma ist der von ProFEMAG sehr ähnlich, indem fokussiert auf die Technik und die Anwenderbedürfnisse individuell auf die Nutzer eingegangen wird. Mit der Eingliederung der FEMAG-Module wird bei Gamma der Bereich der elektrischen Maschinen erstmalig abgedeckt und somit ist eine forcierte Entwicklung von FEMAG durch die erheblich erweiterten Ressourcen zu erwarten. Wichtig ist uns ein weiter vertrauensvolles Verhältnis zwischen Entwicklern und Anwendern, gepaart mit dem tiefen technischen Verständnis der erweiterten Entwicklungsmannschaft um die elektrischen Maschinen mit Sitz in Europa, in Basel.

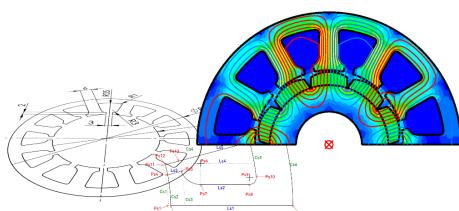


Abb. 69: Parametergestützte Modellierung und Berechnung mit FEMAG

Fig. 69: Parameter-based modelling and calculation with FEMAG

Wir bedanken uns bei den Anwendern wie in den Vorjahren für die vielen kreativen Anregungen. In der neuen Konstellation werden wir viele gesammelte Ideen und Impulse zur Weiterentwicklung realisieren können und so die Besonderheit der FEMAG-Anwender sicher in die Zukunft tragen. FEMAG bleibt spannend.

Certainly a surprise for many at the 2022 User Meeting was the announcement of FEMAG's move to a new home. The partner Gamma Technologies LLC became the new owner of the software rights to the FEMAG modules. The developers of FEMAG have long weighed up the advantages and disadvantages of such a step and have come to the conclusion that this step will on the one hand enable a significant boost in development in terms of content and on the other hand the special nature of FEMAG can be maintained with close cooperation with all users. Gamma's business strategy is very similar to that of ProFEMAG, in that it focuses on technology and user needs individually. With the integration of the FEMAG modules, the field of electrical machines is covered for the first time at Gamma and thus a forced development of FEMAG can be expected due to the considerably expanded resources. It is important for us to maintain a trusting relationship between developers and users, coupled with the deep technical understanding of the expanded development team for electrical machines based in Europe, in Basel.



Abb. 71: Anwendertreffens 2022 in Kassel

Fig. 71: User Meeting 2022 in Kassel

As in previous years, we would like to thank the users for their many creative suggestions. In the new constellation we will be able to realise many collected ideas and impulses for further development and thus carry the special feature of the FEMAG users safely into the future. FEMAG remains exciting.

Contact:

Dr.-Ing. Jörn Steinbrink
+49 511 / 762 28 64

steinbrink@ial.uni-hannover.de

Lehre am IAL | Teaching at IAL

Lehrveranstaltungen

Die Lehre war in den Jahren 2021 und 2022 erneut stark durch die Auswirkungen der Corona-Pandemie geprägt. Nachdem im Sommersemester 2021 wie schon im Vorjahr ausschließlich Online-Lehrformate möglich waren, entschied die Leibniz-Universität als eine der ersten deutschen Hochschulen, im Wintersemester 2021/22 wieder zur Präsenzlehre (wohlgerne bei voll belegten Hörsälen) als Regelformat zurückzukehren, was vor allem von den Studierenden mit großer Erleichterung aufgenommen wurde. Zur Begrenzung des Infektionsrisikos wurden Zugangskontrollen in allen Universitätsgebäuden eingerichtet; eingelassen wurden nur Geimpfte oder frisch Getestete. Dieses System hat tatsächlich, von sehr wenigen Ausnahmen abgesehen, Ansteckungen im Lehrbetrieb zuverlässig verhindert.

Das IAL musste jedoch parallel noch ein zweites Hindernis bewältigen: Durch die Kernsanierung des Trakts H, verbunden mit der kompletten Räumung aller Büros und des Kellerlabors, wurde der Laborbetrieb deutlich erschwert. In den Laborräumen im Erdgeschoss drängten sich nun neben den studentischen Laboren auch zahlreiche Versuchsaufbauten für Forschungsvorhaben. Dies hatte zudem zur Folge, dass die ohnehin wenigen studentischen Rechnerarbeitsplätze wegfallen mussten. Dem großen Einsatz und dem Improvisationstalent der Laborleiter, der Laborbetreuer und nicht zuletzt der Werkstatt ist es zu verdanken, dass dessen ungeachtet praktisch alle vorlesungsbegleitenden Laborversuche wieder in Präsenz durchgeführt werden konnten.

Das breite Angebot an Lehrveranstaltungen blieb in den Jahren 2021 und 2022 bis auf zwei erfreuliche Ausnahmen unverändert: Im Wintersemester 2021/22 wurde als neuer Lehrauftrag die Vorlesung *Netzanschlusstechnik erneuerbarer Energien* von Dr. Kampen angeboten. Und wie bereits im letzten Institutsbericht angekündigt, wurde die Vorlesung über *Elektrische Bahnen und Fahrzeugantriebe* seit dem Sommersemester 2021 von Dr. Germishuizen übernommen; sie erfreut sich weiterhin eines stabilen Interesses bei den Studierenden.

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

Lectures

In 2021 and 2022, teaching was again heavily influenced by the effects of the Covid pandemic. After teaching was conducted exclusively online in the summer semester of 2021, as in the previous year, Leibniz University was one of the first German universities to decide to return to face-to-face teaching (note that the lecture theatres were fully occupied) as the regular format in the winter semester of 2021/22, which was received with great relief, especially by the students. To limit the risk of infection, access controls were set up in all university buildings; only those vaccinated or freshly tested were allowed in. With very few exceptions, this system has reliably prevented infections in teaching.

However, the IAL had to overcome a second obstacle in parallel: the core renovation of Tract H, combined with the complete vacating of all offices and the basement laboratory, made laboratory work much more difficult. In addition to the student laboratories, the laboratory rooms on the ground floor were now crowded with numerous experimental set-ups for research projects. This also resulted in the loss of the already small number of student computer workstations. Thanks to the great dedication and improvisational talent of the laboratory leaders, the laboratory supervisors and, last but not least, the workshop staff, practically all of the laboratory experiments accompanying the lectures could once again be carried out in the presence of the students.

The wide range of courses on offer remained unchanged in 2021 and 2022, with two pleasing exceptions: in the winter semester of 2021/22, the lecture *Grid connection technology for renewable energies* by Dr. Kampen was offered as a new teaching assignment. And, as already announced in the last institute report, the lecture *Electric Trains and Vehicle Drives* has been taken over by Dr. Germishuizen since the summer semester 2021; it continues to attract consistent interest among students.

Our sincere thanks go to all those who have contributed to being able to offer students an attractive range of courses under conditions that continue to be difficult.

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: Permanentmagnetregister 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 Felderregerkurve und des Koeffizienten der doppeltverketteten Streuung. Parametrische Felder aufgrund von Leitwertschwankungen (z.B. Sättigungs-, Exzentrizitäts- und Nutungsfelder). Theorie der Stromverdrängung in Käfigen; Felddämpfung durch Käfig- und Schleifringläufer; Felddämpfung durch parallele Wicklungszweige der Ständerwicklung.

Tangential gerichtete mechanische Kräfte (allgemeines Bildungsgesetz, asynchrone und synchrone Oberwellendrehmomente); radial gerichtete mechanische Kräfte (Erzeugung des magnetisch erregten Lärms und mechanischer Schwingungen, einseitig magnetischer Zug und sein Einfluss auf die biegekritische Drehzahl der Welle).

Verlustarten; zusätzliche Verluste durch Oberwellen.

Theory of Electrical Machines

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

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-, Widerstandshilfstrang-, Spaltpolmotor), Betriebsverhalten (verallgemeinerte Symmetrische Komponenten, Leitwertortskurve), Drehzahlstellung.

Wechselstrom-Synchronmaschinen: Aufbau (Ständer mit Nuten, ausgeprägten bzw. Klauen-Polen), Motoren mit Magnet-, Hysteresis- 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 Hybridaufger), 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, Drehstrohm Induktionsmaschine und Vollpolsynchrongenerator

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 Synchrongmotoren: 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 Schwingen, Betrachtungen zur mechanischen Dämpfung), Berücksichtigung der transienten Stromverdrängung; Diskussion der wichtigsten Ausgleichsvorgänge in Induktions- und Synchrongmaschinen (Einschalten, symmetrische und unsymmetrische Klemmenkurzschlüsse, Spannungs-Wiederkehr, Netztumschaltung bzw. Fehlsynchronisation); Reaktanzen und Zeitkonstanten von Synchrongmaschinen.

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

Seminar: 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 und ethische Dilemmata, denen Ingenieure in ihrem Berufsleben begegnen können. 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

Seminar: 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 and ethical dilemmas that engineers may encounter in their professional careers 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 Leistungs-halbleitern darlegen,
- aktive und passive Bauelemente für die jewei-lige Anwendung passend auswählen und di-mensionieren,
- netzgeführte Stromrichter und ihr Betriebs-verhalten sowie ihre Netzrückwirkungen cha-rakterisieren und berechnen,
- einfache selbstgeführte Stromrichter (Gleich-stromsteller) konfigurieren und berechnen,
- dreiphasige Wechselrichter erläutern und für den jeweiligen Einsatzfall berechnen,
- einfache Systeme aus mehreren Stromrich-tern konfigurieren.

Stoffplan:

Leistungselektronik (LE) zur Energieumformung mit hohem Wirkungsgrad, Anwendungsfelder der LE, Bauelemente der LE, netzgeführte Gleich-richter, Netzrückwirkungen, Gleichstromsteller, Wechselrichter mit eingeprägter Spannung, zusam-mengesetzte Stromrichter und Umrichter.

Vorkenntnisse:

Grundlagen der Elektrotechnik (notwendig), Grund-lagen 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 com-pONENTS appropriately for the respective appli-cation,
- characterise and calculate line-commutated power converters and their operating be-haviour 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 sev-eral power converters.

Contents:

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

Previous Knowledge:

Fundamentals of electrical engineering (required), fundamentals of semiconductor engineering (rec-ommended).

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, Nichtideale 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 Betriebeigenschaften vom inneren Aufbau sowie von der äußereren 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; Sperrsichtkapazität
- 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 geberlosen 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 Electromechanical Power Conversion (Electrical Engineering) or Electrical Drives (Mechatronics). Recommended: Power Electronics I

Netzanschlusstechnik erneuerbarer Energien

Vorlesung: Dr.-Ing. D. Kampen

Inhalt:

Das Modul vermittelt grundlegende Kenntnisse der Energieerzeugung durch regenerative Energien und der hierbei beteiligten Komponenten. Insbesondere die Netzpulsstromrichter regenerativer Erzeuger als Kernkomponente bei der Einbindung regenerativer Energien stehen im Fokus des Moduls und werden hinsichtlich Netzregelung, Power Quality und EMV beschrieben.

Nach erfolgreichem Abschluss der LV können die Studierenden:

- Power Quality und EMV und die in diesem Zusammenhang relevanten Effekte und Normen nennen sowie geeignete Filtermaßnahmen bestimmen.
- Netzpulsstromrichtertopologien charakterisieren und ihr Betriebsverhalten sowie ihre Netzerückwirkungen nennen und LCL-Filter auslegen. Außerdem die konventionelle netzfolgende, stromeinprägende Regelung von Netzpulsstromrichtern sowie eine PLL beschreiben.
- Die Anforderungen an die Regelung von Netzpulsstromrichtern bei Netzen mit hohem Anteil regenerativer Energien erklären und eine netzbildende, spannungseinprägende Regelung skizzieren.

Grid connection technology for renewable energies

Lecture: Dr.-Ing. D. Kampen

Contents:

The module provides basic knowledge of power generation using renewable energies and the components involved. In particular, the grid pulse power converters of regenerative generators as a core component in the integration of regenerative energies are the focus of the module and are described with regard to grid control, power quality and EMC.

After successful completion of the course, students are able to:

- Name power quality and EMC and the relevant effects and standards in this context and determine suitable filter measures.
- Characterise mains pulse power converter topologies and name their operating behaviour as well as their mains feedback effects and design LCL filters. In addition, describe the conventional mains-following, current-influencing control of mains pulse power converters and a PLL.
- Explain the requirements for the control of mains pulse power converters in grids with a high proportion of renewable energies and outline a grid-following, voltage-imprinting control.

Elektrische Bahnen und Fahrzeugantriebe

(6. bzw. 8. Semester), V2, S2
Vorlesung: Ph.D Eng J. Germishuizen

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 Tractionssystems kennen
- den Einfluss technologischer Neuerungen auf die Auswahl der optimalen Systemlösung erkennen
- die in den Grundlagenvorlesungen erworbenen Kenntnisse auf die Tractionssysteme 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: Ph.D Eng J. Germishuizen

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 Speicherdiode 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 (leitungsbunden)
- 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 Nutzungseffekt, 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, Blechpaket-Schwingungen, Verformung des Ständerblechpaket, 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, biomechanische 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 electromechanical 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 2021/22

Students' Theses 2021/22

Studienarbeiten

Short Theses

2021

Abdallah, Yazan:

Einfluss von gealtertem Isolationsmaterial auf die Gleichtaktimpedanz von elektrischen Maschinen
Influence of Aged Insulation Material on the Common-Mode Impedance of Electrical Machines

Ataya, Mahmoud:

Aufbau eines SiC-Umrichters zur Erprobung aktiver Gatetreibere
Design of a SiC-Converter for the Evaluation of Active Gate Drivers

Ben Kahla, Hamza:

Auswirkungen des Modelldetaillierungsgrads auf die transiente FE-Simulation von Induktionsmaschinen bei
großem Schlupf
Effects of Model Detail Level on Transient FE Simulation of Induction Machines at Large Slip

Bleicher, Maximilian:

Numerische Berechnung der parasitären Kapazitäten in elektrischen Maschinen
Numerical Determination of Parasitic Capacitances in Electrical Machines

Dubinin, Artjom:

Aufbau und Regelung eines aktiven Leistungsfilters zur Reduzierung der Zwischenkreiskapazität eines ein-
phasigen Wechselrichters
Design and Control of an Active Power Filter to Reduce the DC-Link Capacitance of a Single-Phase Inverter

Dumtzlaff, Jacob:

Untersuchungen zur Betriebsstrategie von aktiven Gatetreibern in SiC-Antriebsumrichtern
Investigations into the Operating Strategy of Active Gate Drivers in SiC Drive Inverters

Krümpelmann, Marcel:

Modellierung und Beobachtung des hochfrequenten Verhaltens einer Induktionsmaschine
Modelling and Observation on the High-Frequency Behaviour of an Induction Machine

Laumann, Jan Niclas:

Untersuchungen zum Einsatz von aktiven Gatetreibern in Elektrofahrzeugen
Investigations into the Use of Active Gate Drivers in Electric Vehicles

Li, Jie:

Vergleich von Modalanalysen mit verschiedenen FE-Programmen
Comparison of Modal Analysis with Different FE-Software

Ma, Zhenlong:

Untersuchen des Einflusses von asymmetrischen und gekippten Läufernuten auf das Betriebsverhalten von
Induktionsmaschinen mit Käfigläufer
Investigating the Effect of Asymmetrical and Tilted Rotor Slots on the Performance of Squirrel-Cage Induction
Machines

Pranav Sree Rajhen, Santhana Gopalan:

Implementierung des EtherCAT Kommunikationsprotokolls zur Nutzung in der Regelung und Betriebsführung
eines Leistungswandlers
Implementation of the EtherCAT Communication Protocol for the Utilization in the Control and Operation of a
Power Converter

Sawang, Francis:

Erprobung des Regelungskonzepts für eine leistungselektronische Schaltung zur photovoltaischen Energieversorgung von Nanosatelliten

Evaluation of the Control Concept for a Power Electronic Circuit for Photovoltaic Power Supply of Nanosatellites

Sellami, Assil:

Validierung verschiedener Aspekte einer Druckplattenverlustberechnung mithilfe von 3-D-Finite-Elemente-Methoden und anhand von Messungen

Validation of Aspects of a Clamping Plate Loss Calculation Approach Using 3D Finite Element Analysis and Measurements

Weber, Simon:

Der Einfluss der Wicklung auf das Schwingungsverhalten einer elektrischen Maschine mit Formleitern

The Influence of the Winding on the Vibration Behaviour of an Electric Machine with Shaped Conductors

Wu, Di:

Untersuchung des Einflusses von Größe und Angriffspunkt der Kräfte auf die Magnetgeräusche

Investigation of the Influence of the Magnitude and Point of Impact of the Forces on the Magnetic Noises

2022

Alhaj Khouder, Walid:

Modellierung eines Pedelec-Antriebsstranges mit mehreren elektrischen Maschinen

Modeling of a Pedelec-Drivetrain with Several Electric Machines

Hassoumi, Eya:

Anpassung der Magnetisierungskurve eines Elektroblechs zur Berücksichtigung von Fertigungseinflüssen und deren Einfluss auf Berechnungsergebnisse

Adaptation of the Magnetization Curve of an Electrical Steel to take into Account Manufacturing Influences and their Influence on Calculation Results

Krause, Florian:

Entwicklung einer Wechselrichter-Software zur Regelung von Traktionsmaschinen

Development of an Inverter Software for the Control of Traction Machines

Langner, Paul Arik:

Implementierung und Evaluierung eines Langzeitmesssystems zur Bestimmung der Ausfallrate von Leistungshalbleitern durch kosmische Strahlung

Implementation and Evaluation of a Long-Term Measurement System to Determine the Failure Rate of Power Semiconductors due Cosmic Radiation

Sun, Jiaqi:

Recherche und Vergleich von Möglichkeiten zum 3D Druck von Wicklungen magnetischer Bauelemente

Research and Comparison of Options for 3D Printing of Windings of Magnetic Components

Bachelorarbeiten Bachelor Theses

2021

Al Mashwet, Ehab:

Untersuchung von permanenterregten Synchronmaschinen für den Antriebsstrang von Flugwindkraftanlagen
Examination of Permanent Magnet Synchronous Machines for the Powertrain of Airborne Wind Power Systems

Alms, Norman Frederik:

Untersuchung und Implementierung von Modulationsverfahren für 3-Level ANPCs mit FPGA-basiertem Ansteuerungssystem
Investigation and Implementation on Modulation Methods for 3-Level ANPCs with a FPGA-Based Control System

Andikaputra, Joshua:

Konzeptionierung und Aufbau eines Prüfstandes zur Charakterisierung eines GaN-Wechselrichters für BLDC Motoren
Design and Set-Up of a Dynamometer for the Characterization of a GaN Inverter for BLDC Motors

Behling, Malte:

Vergleich verschiedener 3D-Finite-Elemente-Programme im Hinblick auf die Druckplattenverluste in Hydrogeneratoren
Comparison of 3D Finite Element Software with Regard to Clamping Plate Losses in Hydro Generators

Cena, Fiona:

Einfluss der Leistungsdichte auf das Betriebsverhalten von Flugzeugen
Impact of Power Density on the Aircraft Flight Performance

Cengiz, Bessim:

Aufbau einer Toolkette zur Dimensionierung und FEM-Simulation eines additiv gefertigten Synchron-Reluktanzrotors
Setup of a Tool Chain for Dimensioning and FEM Simulation of an Additively Manufactured Synchronous Reluctance Rotor

Dinh, Gia Bao:

Identification of Blackout Detection Methods and Requirements for a Successive Multi-Master Black Start in Distribution Network

Galai, Ahmed:

Mechanical Modal Analysis of Hydrogenerators

Hanemann, Marie:

Aufbau und Untersuchung eines DC/AC Wandlers mit universalem Ausgang für einen Photovoltaik Modulwechselrichter
Design and Characterization of a DC /AC Converter with Universal Output for a Photovoltaic Module Inverter

Hoppe, Torben:

Bewertung eines Direktantriebs für einen Hochdrehzahlverdichter für den Hochauftrieb von Flugzeugen
Evaluation of a Direct Drive for a High-Speed Compressor Concept for High-Lift of Aircraft

Karakilic, Emin:

Untersuchung des Einflusses der Geometrie von Permanentmagneten auf ihre Wirbelstromverluste in elektrischen Antrieben von Elektrofahrzeugen
Investigation of the Influence of the Geometry of Permanent Magnets on their Eddy Current Losses in Electric Drives of Electric Vehicles

Khader, Meriem:

Entwicklung eines galvanisch trennenden Serienresonanzwandlers zum Einsatz in einem PV-Modulwechselrichter
Development of a Galvanically Isolating Series Resonant Converter for Use in a PV Micro-Inverter

Khadhraoui, Ghassen:

Auswirkungen verschiedener Lastkennlinien eines Mittelspannungsantriebs auf die Dimensionierung des Modularen Multilevel-Umrichters

Effects of Different Load Characteristics of a Medium Voltage Drive on the Dimensioning of the Modular Multi-level Converter

Köster, Tim:

Untersuchung der Liquid Pin Technologie als hoch effizientes Kühlkonzept für leistungselektronische Aerospace-Umrichter

Investigation of Liquid Pin Technology as a Highly Efficient Cooling Concept for Power Electronic Aerospace Converters

Langanke, Max:

Praktische Untersuchung eines Hydrogenerators mit statischer Exzentrizität

Practical Analysis of a Hydrogenerator with Static Eccentricity

Liebchen, Georg:

Entwicklung eines Start- und Synchronisierungsprozesses für einen spannungsgeregelten Wechselrichter

Development of a Start and Synchronization Process for a Voltage Controlled Inverter

Nciri, Mohamed Raafat:

Überwachung der Netzimpedanz mittels sprunghafter Leistungsänderungen von Solarwechselrichtern

Monitoring of the Grid Impedance by Stepwise Power Changes of Solar Inverters

Nessa, Albert:

Planning, Development and Commissioning of a Test Set-Up for Accelerating Moisture-Induced Degradation on IGBT Modules

Ottolin, Jonas:

Dimensionierung und Konstruktion eines SiC-Wechselrichters für elektrisch betriebene Rennfahrzeuge

Conception and Design of a Wide-Bandgap-Semiconductor Based Inverter for Electric Powered Race Vehicles

Reinhardt, Nick:

Erstellung einer Toolkette für die Berechnung einer permanentmagneterregten Synchronmaschine

Preparation of a Tool Chain for the Calculation of a Permanent Magnet Excited Synchronous Machine

Reinprecht, Christian:

Entwurf und Implementierung eines Verfahrens zur automatisierten experimentellen Untersuchung eines geberlos geregelten Antriebssystems

Design and Implementation of a Procedure for the Automated Experimental Investigation of a Sensorless Controlled Drive System

Robertus, Artjom:

Untersuchung von Stromregelverfahren für den Einsatz zur aktiven Schwingungsreduktion in elektrischen Antriebsssträngen

Development of Current Control Methods for the Use in Active Vibration Reduction in Electric Powertrains

Röttig, Leon:

Modellierung eines übersetzten Antriebsstrangs für eine Flugwindkraftanlage

Modeling of a Geared Drive Train for an Airborne Wind Power System

Sander, Jan:

Modellierung und Simulation eines SiC-Wechselrichters auf Basis der Geometrie unter Berücksichtigung parasitärer Elemente

Modeling and Simulation of a SiC-Inverter Based on Geometry Considering Parasitic Elements

Sarikaya, Nihat:

Automatisierte Generierung von einsträngigen und dreisträngigen Ersatznetzwerken anhand von Messungen der Gleich- und Gegentaktimpedanz einer elektrischen Maschine

Automated Generation of Single-Phase and Three-Phase Equivalent Circuits for Electric Machines Based on Common-Mode and Differential-Mode Impedance Measurements

Schreiber, Jan Heinrich:

Auslegung, Aufbau und Inbetriebnahme der Sensorik für einen SiC-Antriebsumrichter

Design, Construction and Commissioning of the Sensor System for a SiC Drive Inverter

Sindram, Jannis:

Untersuchung von direkt-angetriebenen Induktionsmaschinen für den Antriebsstrang von Flugwindkraftanlagen
Investigation on Directly-Driven Induction Machines for the Powertrain of Airborne Wind Power Systems

Stünkel, Nicolas:

Erstellen einer Berechnungsmethodik für die elektrische Belastung von Getrieben in umrichtergespeisten Traktionsantrieben

Calculation Methodology for the Electroerosion of Gearboxes in Inverter-Fed Traction Drives

Teichert, Tilo:

Untersuchung und Umsetzung geeigneter Regelungskonzepte für die Verwendung kostengünstiger Mikrocontroller in einphasigen PV-Modulwechselrichter

Investigation of Suitable Control Concepts for Low-Cost Microcontrollers in Single-Phase Module Integrated PV Inverters

Tekaya, Abdelaziz:

Entwurf und Entwicklung einer Software zur Steuerung und Überwachung einer Langzeitmessung zur Bewertung der Robustheit von GaN-HEMTs gegen Höhenstrahlung

Design and Development of a Python-Based Software for Controlling a Long-Term Test Setup for Evaluating the Cosmic Ray Ruggedness of GaN HEMTs

Töllner, Tobias:

Aufbau und Untersuchung eines aktiven Gleichrichters für einen Serienresonanzwandler

Design and Characterization of an Active Rectifier for a Series Resonant Converter

2022

Adli, Chouaieb:

Untersuchung des Ausgangsspannungsspektrums von modularen Multilevel-Umrichtern im Quasi-Zwei-Level Betrieb für verschiedene Spannungsflanken

Investigation of the Output Voltage Spectrum of the Quasi-Two-Level Operation Mode for Modular Multilevel Inverters with Different Edge-Shaped Transitions

Ahmadzai, Abdul Karim:

Modellierung und Parametrierung von sechsphasigen elektrisch erregten Synchronmaschinen unter Berücksichtigung von Stromharmonischen

Modeling and Parameterization of Six-Phase Electrically Excited Synchronous Machine Considering Current Harmonics

Al-Ghushami, Abdulkareem:

Untersuchung von Stromverdrängungseffekten bei unterschiedlichen Leiteranordnungen in elektrischen Maschinen

Investigation in Current Displacement Effects with Different Winding Designs in Electrical Machines

AI-Soufi, Ezzaddin:

Untersuchung des Ausgangsspannungsspektrums von modularen Multilevel-Umrichtern im Quasi-Zwei-Level Betrieb für verschiedene Spannungsflanken

Investigation of the Output Voltage Spectrum on the Quasi-Two-Level Operation Mode for Modular Multilevel Inverters with Different Edge-Shaped Transitions

Allani, Oussema:

Analytical Calculation of the Modal Matrix for the Prediction of the Magnetic Noise in Electrical Machines

Ayed, Sofiene:

Berechnungstool zur Bestimmung der Spulentemperatur bei hochausgenutzten Maschinen mit direkter Leiterkühlung

Calculation Tool for Determining the Coil Temperature in Highly Utilised Machines with Direct Liquid Cooling

Baroudi, Wissem:

Analytische Berechnung von Stromwärmeverlusten in der Dämpferwicklung von Schenkelpolsynchronmaschinen

Analytical Calculation of Current Heat Losses in the Damper Winding of Salient Pole Synchronous Machines

Bouguerra, Amina:

Geometriebasierte Modellierung und messtechnische Validierung frequenzunabhängiger parasitärer Induktivitäten

Geometry-Based Modeling and Metrological Validation of Frequency Dependent Parasitic Inductances

Burmester, Jonah:

Thermische Modellierung einer fremderregten Synchronmaschine für einen Traktionsantrieb

Thermal Modeling of an Electrically Excited Synchronous Machine for a Traction Application

Fallah, Pantea:

Verfahren zur Neutralpunkt-Balancierung von 3-Punkt ANPC-Wechselrichtern

Neutral Point Balancing Methods for 3-Level ANPC-Inverters

Ferjani, Anis:

Konzeptionierung eines Versuchsaufbaus zur Messung von Endbereichsverlusten in großen Schenkelpolmaschinen

Design of an Experimental Set-Up for Measuring End Region Losses in Large Salient Pole Synchronous Machines

Ghazouani, Ghassen:

Beeinflussung des Betriebsverhaltens von permanentmagneterregten Synchronmaschinen mit Hilfe innovativer Magnettopologien

Influence of Innovative Magnetic Topologies on the Operating Behaviour of Permanent Magnet Synchronous Machines

Gronau, Adrian:

Analytische Berechnung des Schwingungsverhaltens elektrischer Maschinen anhand eines Mehrmassenschwingers mit Balkenelementen

Analytic Calculation of the Vibration Behaviour of Electric Machines Using a Multimass Oscillator with Beam Elements

Hillmann-Apmann, Jonas:

Untersuchung von Methoden zur aktiven Dämpfung bei spannungsgeregelten Wechselrichtern mit LC Filter

Investigation of Methods for Active Damping in Voltage-Controlled Inverters with LC Filter

Hosseinpanah, Negin:

Nutzung transienter Simulationen zur Untersuchung von Entmagnetisierungseffekten einer permanentmagnet-erregten Synchronmaschine für einen Schiffsantrieb

Utilization of Transient Simulations to Investigate Demagnetization Effects of a Permanent Magnet Synchronous Machine for a Ship Propulsion System

Jian, Yushu:

Simulation und Implementierung der Regelung von mehrsträngigen Synchronmaschinen zum Einprägen von Oberschwingungsströmen

Simulation and Implementation of Current Control Strategies of Multi-Phase Synchronous Machines for Injecting Harmonic Currents

Lee, Jihun:

Untersuchung des Einflusses der Leiterverteilung einer Haarnadelwicklung auf die parasitären Motorkapazitäten

Investigation of the Influence of the Conductor Position of a Hairpin Winding within a Slot on the Parasitic Motor Capacitances

Mezghani, Mohamed Aziz:

Auslegung der Regelung von netzbildenden Umrichtern in Inselnetzen mit synchronisierten Spannungsphasoren als Sollwerten

Control Design for Grid Forming Inverters in Island Grids with Synchronized Voltage Phasors as Reference Values

Najm, Rasha:

Gestaltung des axialen Endbereichs additiv gefertigter Rotoren von permanentmagneterregten Synchronmaschinen

Design of the Axial End Region of Additively Manufactured Rotors of Permanent Magnet Synchronous Machines

Ostuwar, Ludmila:

Charakterisierung des Streufelds für Kerngeometrien von Mittelfrequenz-Transformatoren

Characterization of the Leakage Field for Core Geometries of Medium Frequency Transformers

Romdhani, Hichem:

Modellierung eines industriellen, hybriden AC/DC Netzes

Modeling of an Industrial, Hybrid AC/DC Grid

Salataj, Kevin:

Thermische Berechnung einer permanentmagneterregten Synchronmaschine

Thermal Calculation of a Permanent Magnet Excited Synchronous Machine

Steppe, Milan:

Einfluss von Sinuskavitäten im Rotor von permanentmagneterregten Synchronmaschinen auf die mechanische Festigkeit

Influence of Sine-Shaped Cavities in the Rotor of Permanent Magnet Synchronous Machines on Mechanical Strength

Syafira, Nurmala:

Investigation into Synchronization Challenges of Grid-Forming Inverters for a Bottom-up Black Start Scenario in Microgrids

Toppel, Timon:

Vergleich zwischen Ausgangsfiltern und aktiven Gate-Treibern im Hinblick auf die Reduktion unerwünschter Hochfrequenzeffekte in Elektrofahrzeugen

Comparison of Output Filters and Active Gate Drivers with Regard to the Reduction of Unwanted High-Frequency Effects in Electric Vehicles

Wassouf, Omar:

Untersuchung des thermodynamischen Konvektionsverhaltens in Umrichtersystemen mittels CFD-Simulationen
Investigation of Thermodynamic Convection Characteristics in Converter Systems based on CFD Simulations

Yangui, Ahmed:

Parameterstudie und Grobdimensionierung eines Stators für hochausgenutzte e-Maschinen mit direkter Leiterkühlung für den Einsatz als Flugzeugantrieb

Parameter Study and Initial Design of a Stator for Highly Utilized E-Machines with Direct Liquid Cooled Winding for an Aircraft Propulsion Application

de Vries, Timo:

Optimierung des Aktuators eines Robotik-Kickers

Optimization of the Actuator of a Robotic Kicker

Projektarbeiten

Project Theses

2022

Biju, Anjali:

Estimating the Induced Voltage in Multi-Phase Electrical Machines

Nwiwu, Uzoma:

Analysis of the Effect of Parasitic Capacitances of Transformers on Switching Waveforms of DC/DC Converters

Masterarbeiten

Master Theses

2021

Akkaya, Sercan:

Erstellung eines Dimensionierungstools zur Antriebsstrangoptimierung hinsichtlich Leistungsdichte und Redundanz für vollelektrische Flugzeuge

Development of a Dimensioning Tool for a Powertrain Optimization regarding Power Density and Redundancy for All-Electric Aircraft

Al Duwaji, Hassan:

Auswirkungen einer unsymmetrischen Last auf die Regelung für Modulare Multilevel-Umrichter

Effects on an Asymmetrical Load on the Control for Modular Multilevel Converters

Asgari, Arsham:

Vergleich zwischen magnetostatischen und transienten FEM-Berechnungen zur Berechnung der Wirbelstromverluste in Permanentmagneten

Comparison between Magnetostatic and Transient FEM Analysis for the Calculation of Eddy Current Losses in Permanent Magnets

Badenhop, Niklas:

Analytical Modelling of LLC Converter

Basilios, Rami:

Investigation of a Suitable Wide Input Voltage Range DC/DC Converter Topology of a Parallel Drive Concept for Pumping Cycle Airborne Wind Energy Generators

Beckemeier, Christian:

Optimierung und Inbetriebnahme eines neuartigen Active-Neutral-Point-Clamped-Umrichters basierend auf der Kombination von Si-IGBTs und GaN-HEMTs

Optimization and Commissioning of a Novel Active-Neutral-Point-Clamped-Converter Based on Si-IGBTs and GaN-HEMTs

Behrendt, Cara-Nastasia:

Modellierung elektrischer Maschinen im Hochfrequenzbereich mittels modifiziertem Knotenpunkt-Potential-Verfahren

Modified Nodal Analysis for High Frequency Modelling of Electrical Machines

Bender, Tim Niklas:

Einfluss der Runddrahtwicklung auf das Schwingungsverhalten einer elektrischen Maschine

Vibration Behaviour of an Electric Machine with a Round Wire Winding

Bleicher, Maximilian:

Dimensionierung einer elektrischen Traktionsmaschine auf Basis von Rundenzeitsimulationen

Conception and Design of an Electrical Traction Motor Based on Lap Time Simulations

Bziwech, Radhouen:

Aktive Reduktion von Vibrationen in Getrieben durch Regelung des Antriebsmoments

Active Reduction of Gearbox Vibrations by Drive Torque Controlling

Chen, Jieyang:

Untersuchung und Bewertung der Zuverlässigkeit eines fehlertoleranten Cascaded-H-Bridge Multilevel-Wechselrichters für Elektroflugzeuge

Investigation and Evaluation of the Reliability of a Fault-Tolerant Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter for Electric Aircraft

Dong, Yaoqi:

Development of a Robust Control for a Voltage-Controlled Inverter with LC Filter

Ehrenberger, Robin:

Modellierung und Untersuchung eines HVAC-Systems mit Modularen Multilevel-Umrichter zur Anbindung von Offshore-Windparks

Modelling and Investigation of an HVAC System with Modular Multilevel Converters for Connecting Offshore Wind Farms

Eschenmann, Leander:

Berechnung der Wicklungskopfstreuinduktivität von elektrischen Maschinen mit Mehrschicht-Haarnadelwicklung

Calculation of the End-Winding Leakage Inductance of Electrical Machines with Multilayer Hairpin Windings

Farrokhi, Ali:

Investigation on the Impact of Different Vertical and Horizontal Resolutions on the Applicability of Linear Hybrid Inverter

Gao, Siming:

Erweiterung einer Messschaltung zur Erfassung von höhenstrahlungsbedingten Ausfällen von Gallium-Nitrid-Halbleitern

Extension of a Measuring-Circuit for the Acquisition of Cosmic Radiation Induced Failures of Gallium Nitride Semiconductors

Gräber, Hendrik:

Untersuchung eines blindleistungsfähigen DC/AC-Wandlers zum Einsatz in einem einphasigen PV-Modulwechselrichter

Analysis of a DC/AC Converter for Use in a Single-Phase PV Module Inverter with Reactive Power Capability

Gu, Pengcheng:

Vergleich von numerisch und analytisch berechneten Magnetverlusten unter Berücksichtigung von axialer Segmentation

Comparison of Numerically and Analytically Calculated Magnet Losses under Consideration of Axial Segmentation

Guo, Weiqiang:

Adaptation and Modeling of Control Approaches of PV Grid-Forming Inverters for a Black Start Scenario

Guo, Yang:

Analyse von Regelungsstrukturen zum Einprägen von Oberschwingungsströmen in mehrsträngige elektrisch erregte Synchronmaschinen

Analysis of Control Structures for Injection of Harmonic Currents into Multi-Phase Electrically Excited Synchronous Machines

Hagedorn, Maximilian:

Moduldesign für ein Cascaded H-Bridge Umrichter mit hoher Leistungsdichte zur dezentralen Anbindung von Batterien für vollelektrische Flugzeuge

Module Design for a Cascaded H-Bridge Converter with High Power Density for Decentralized Connection of Batteries for all Electric Aircraft

Holtkamp, Lukas:

Anwendung der Spiegelungs- und Ersatzladungsmethode zur Bestimmung der parasitären Kapazitäten in elektrischen Maschinen

Application of the Image Charges Method and Charge Simulation Method for the Determination of Parasitic Capacitances in Electrical Machines

Huang, Xudong:

Analytical Calculation of Electrical Machines Vibration Using a Beam Element Model

Jia, Shiyang:

Small-Signal Analysis of Control Loops in a Double Grid-Forming Converter Configuration

Jin, Shuo:

Control of a Traction Drive Taking into Account the Maximum Permissible Direct Current of the Battery

Kim, Denis:

Optimierung von Sinuskavitäten im Rotor permanentmagnetenerregter Synchronmaschinen zur Reduktion der Drehmomentwelligkeit sowie der Geräuschabstrahlung

Optimization of Sinusoidal Rotor Cavities for Permanent-Magnet Synchronous Machines to Reduce Torque Ripple and Magnetic Noise

Kriaa, Skander:

Untersuchung des transienten Verhaltens von doppelt gespeisten Induktionsmaschinen bei verschiedener Modellierungstiefe

Investigation of the Transient Behavior of Doubly-Fed Induction Machines Considering Different and Multiple Parasitic Effects

Krümpelmann, Marcel:

Beobachter für das hochfrequente Verhalten einer Induktionsmaschine

Observer for the High-Frequency Behaviour of an Induction Machine

Li, Dengrui:

Implementierung eines erweiterten Kalman-Filters zur Bestimmung der Netzimpedanz aus Messungen eines Wechselrichters

Implementation of an Extended Kalman Filter for Estimation of the Grid Impedance Based on Inverter Measurements

Li, Zhan:

Aktive Reduktion von Vibrationen in Getrieben durch Regelung des Antriebsmoments

Active Reduction of Gearbox Vibrations by Drive Torque Controlling

Liu, Xin:

Einfluss der maximalen Drehzahl auf den Wirkungsgrad einer elektrischen Traktionsmaschine für Automobilanwendungen

Influence of the Maximum Speed on the Efficiency of an Electric Traction Drive

Manthey, Tobias:

Entwicklung eines galvanisch trennenden DC-DC Wandlers zum Einsatz in einem PV-Modulwechselrichter

Design of a Galvanically Isolated DC-DC Converter for a PV Module Inverter

Mehrens, Florian:

Modulation der Streuschlitzte von permanentmagneterregten Synchronmaschinen zur Reduktion der Drehmomentwelligkeit sowie der Geräuschabstrahlung

Reduction of Ripple Torque and Acoustic Noise Emission by Modulation of Slot Openings of Permanent Magnet Synchronous Machines

Meyer, Simon:

Untersuchung der Konformität eines Pumpzyklus-Flugwindkraftwerks mit den Netzanschlussbedingungen hinsichtlich FRT und der Frequenz- bzw. Spannungsstabilität

Investigating the Compatibility of Pumping-Cycle Airborne Wind Energy Systems with FRT and Voltage/Frequency Stability Requirements of the Grid Codes

Pickert, Phil Leon:

Biot-Savart-Berechnung im Schwarz-Christoffel-abgebildeten Raum zur Lösung von Feldproblemen in elektrischen Maschinen

Combining Biot-Savart Law With Schwarz-Christoffel Mappings to Solve Field Problems in Electrical Machines

Ridder, Andreas:

Berechnung des Betriebsverhaltens einer doppelt gespeisten Asynchronmaschine unter Berücksichtigung von Sättigungseffekten

Calculation of the Operating Characteristics of a Doubly-Fed Induction Machine Considering Saturation Effects

Soudi, Chama:

Beschreibung der Ausbreitung des elektrischen Potentials in Drehstromwicklungen mittels partieller Differentialgleichungen

Prediction of the Propagation of the Electrical Potential in Three-Phase Windings with Partial Differential Equations

Sudheer, Govind:

Investigation of the Input Stage of a Single- and Three-Phase Solar Inverter

Wang, Ming:

Generalisierte Kernmaterialauswahl für 50kW bis 1MW Mittelfrequenztransformatoren

Generalized Core Material Selection for 50kW to 1MW Medium Frequency Transformers

Wang, Xinlan:

Synchronisation mehrerer Pump-Zyklus Flugwindkraftwerk Anlagen in einem Windpark-Szenario mit Unterstützung von Energiespeichereinheiten

Synchronization of Several Pumping-Cycle Airborne Wind Energy Generators in a Windpark Scenario with the Support of Energy Storage Units

Willich, Viktor:

Untersuchung und Implementierung einer geberlosen Regelung von PMSM basierend auf der Auswertung der EMK

Investigation and Implementation of a Sensorless Control for PMSM Based on the Evaluation of the Back-EMF

Wu, Heng:

Dimensionierung von Filtern zum Schutz von elektrischen Maschinen vor besonders steilen Spannungsflanken
Dimensioning of Filters to Protect Electrical Machines against Steep Voltage Pulses

Xiao, Yeyinlang:

Untersuchung der Unterschiede zwischen Model Predictive Control und Feldorientierter Regelung einer Induktionsmaschine

Investigation of the Differences between Model Predictive Control and Field-Oriented Control of an Induction Machine

Xun, Geng:

Reinforcement Learning Based Control of Power Electronic Inverters in Grid Applications

Ye, Fang:

Impact of the Inverter Supply on the Eddy Current Losses in the Permanent Magnets of PM Synchronous Machines in Electric Vehicles

Zhao, Zhen:

Charakterisierung des Schaltverhaltens von SiC-MOSFETs bei der Ansteuerung durch einen aktiven Gate-treiber

Characterization of the Switching Behavior of a SiC MOSFET Driven by an Active Gate Driver

Zhuo, Shengyue:

Entwicklung eines Tools zum Design der fehlertoleranten leistungselektronischen Topologien für ein Elektroflugzeug
Development of a Tool for the Design of Fault-Tolerant Power Electronic Topologies of an Electric Aircraft

2022

Bai, Mingrui:

Investigation of Different Control Strategies for the Modular Multilevel Matrix Converter in Branch Fault Cases

Chen, Jielin:

Untersuchung von zusätzlichen Verlusten durch Wechselrichterspeisung und einen nicht-idealnen Erregerstrom auf dem Rotor einer elektrisch erregten Synchronmaschine

Investigation of Additional Losses Due to Inverter Supply and a Non-Ideal Field Current on the Rotor of an Electrically Excited Synchronous Machine

Dubinin, Artjom:

Erarbeitung und Umsetzung eines Remote-Control-Konzepts für PV-Wechselrichter

Development and Implementation of a Remote Control Concept for PV Inverter

Dumtzlaff, Jacob:

Untersuchungen zur Ansteuerung aktiver Gate-Treiber für SiC-MOSFETs

Investigations into the Control of Active Gate Drivers for SiC MOSFETs

He, Ziheng:

Einfluss der Grundfrequenz auf die Leistungsdichte von permanentmagneterregten e-Maschinen für Flugzeugantriebe

Impact of the Fundamental Frequency on the Power Density of Permanent Magnet Excited e-Machines for Aircraft Propulsion Systems

Krüger, Eike Christian:

Validierung eines transienten Modells für elektrisch erregte Synchronmaschinen mit verschiedenen Methoden der Parameteridentifikation

Validation of a Transient Model for Electrically Excited Synchronous Machines with Different Methods of Parameter Identification

Laumann, Jan Niclas:

Entwicklung eines Drei-Level-Umrichters für einen Antrieb ohne Sinusfilter

Development of a Three-Level Inverter for a Motor without Sine Filter

Li, Tiancheng:

Calculation of a Magnetic Circuit with Gyrator-Capacitor Model

Ma, Zhenlong:

Investigation and Evaluation of the Reliability-Oriented Designs for Multilevel Inverters in Electric Aircrafts

Mand, Philipp:

Preparation, Implementation and Evaluation of Radiation Tests of Power Semiconductor Devices for Aerospace Applications

Mastropaoletti, Filippo:

Requirement-Based Implementation and Simulation of a Test Bench for the Investigation of Liquid-Cooled Coils

Meiswinkel, Marius Wenzel:

Aufbau eines Messsystems mit kabelloser Datenübertragung zur Erfassung von Rotorparametern einer elektrischen Maschine

Design of a Measuring System with Wireless Data Transmission for Reading the Rotor Parameters of an Electrical Machine

Nguyen, Thi Thuy An:

Zeiteffiziente Berechnung der Ringinduktivität von Induktionsmaschinen mit Käfigläufer

Time-Efficient Calculation of the Ring Inductance of Induction Machines with Squirrel Cage Rotors

Pallutt, Torben:

Untersuchung eines Auto-Commissioning Verfahrens zur geberlosen Regelung von permanentmagneterregten Synchronmaschinen

Investigation of an Auto-Commissioning Method for Self-Sensing Control of Permanent Magnet Synchronous Machines

Peter, Emma:

Untersuchung der Magnetgeräusche einer Permanentmagnet-Synchronmaschine mit Außenrotor in einer Flugwindkraftanlage

Investigation of the Magnetic Noise of a Permanent Magnet Synchronous Machine with External Rotor in an Airborne Wind Energy System

Scriba, Patrick:

Untersuchung der initialen Online-Identifikation von Parametern einer Induktionsmaschine

Investigation of the Initial Online Identification for Parameters of an Induction Machine

Shen, Runyang:

Einfluss von asymmetrischen Sinuskavitäten im Rotor permanentmagneterregter Synchronmaschinen auf die Geräuschabstrahlung

Influence of Asymmetric Sine-Shaped Cavities in Permanent Magnet Rotors on Noise Emission

Stender, Johannes:

Simulation der geberlosen Regelung einer Reluktanz-Synchronmaschine

Simulation of Sensorless Control for Synchronous Reluctance Machine

Wang, Yuxin:

Entwicklung eines Gate-Treibers zur kombinierten Überwachung von temperatur- und feuchtigkeitsbedingter Degradation an Leistungshalbleitern

Development of a Gate Driver for Combined Monitoring of Temperature- and Humidity-Induced Degradation on Power Semiconductors

Willer, Felix:

Auslegung und Aufbau eines einphasigen Solid-State-Transformers
Design and Implementation of a Single-Phase Solid-State-Transformer

Willer, Jonas:

Automatisierte Identifikation der Reglerparameter einer feldorientierten Regelung
Automated Identification of the Controller Parameters of a Field-Oriented Control

Wu, Di:

Implementierung einer auf einem Open-Source-FE- Solver basierenden Toolkette für die Geräuschvorabberechnung elektrischer Maschinen
Implementation of an Open Source FE Solver based Toolchain for Noise Prediction of Electrical Machines

Zimmermann, Luca:

Implementierung eines Frameworks zur Regelung eines PV-Modulwechselrichters unter Berücksichtigung begrenzter Rechnerressourcen
Implementation of a Framework for the Control of a PV Module Inverter Considering Limited Computational Resource

Dissertationen 2021/22 | Dissertations 2021/22

Optimierung eines einphasigen PFC-Gleichrichters mit Wide-Bandgap-Leistungshalbleitern auf Basis domänenübergreifender Modelle

von Dr.-Ing. Silvia Zulk

Einphasige PFC-Gleichrichter werden in diversen Anwendungen eingesetzt, die hohe Anforderungen an die Leistungsdichte des elektronischen Systems stellen. Die Wahl von Dimensionierungsparametern, wie zum Beispiel der Schaltfrequenz, beeinflusst signifikant die Bauraumanteile der einzelnen Komponenten und das Systemvolumen. Wide-Bandgap-Halbleiter versprechen die realisierbaren Leistungsdichten im Vergleich zu Silizium-Halbleitern zu steigern. Die reduzierten Schaltverlustenergien erlauben höhere Schaltfrequenzen und kleinere passive Bauelemente. Weiterhin erfolgt die Entwicklung von PFC-Gleichrichtern unter den Aspekten der Kühlung und der Konformität bezüglich der Grenzwerte geltender Normen.

Das Ziel dieser Arbeit ist die Erarbeitung einer Optimierungsmethodik, die Einblick in die Systemzusammenhänge erlaubt und volumenoptimierte Dimensionierungsparameter identifiziert. Grundlage dafür ist ein domänenübergreifender Modellierungsansatz, der elektrische, thermische und magnetische Dimensionierungsmethoden vereint. Die Modelle sind analytischer Art, um den Berechnungsaufwand für große Parameterräume zu reduzieren.

In dieser Arbeit wird das Bauraumpotential des Totem-Pole-PFC-Gleichrichters untersucht. Basierend auf den berechneten Halbleiterverlusten werden Modelle zur Kühlkörperdimensionierung vorgestellt. Es werden Kühlkörper für natürliche und erzwungene Konvektion berücksichtigt. Weitere Bestandteile sind eine Filterdimensionierung zur Einhaltung normativer Grenzwerte leitungsgebundener Störungen sowie die Modellierung magnetischer Bauelemente. Jedes der genannten Komponentenmodelle führt für sich zu einer volumenoptimierten Lösung. Durch die Zusammenführung aller Modelle zu einer Optimierungsmethodik kann eine volumenoptimierte Wahl der Dimensionierungsparameter Schaltfrequenz und Stromwelligkeit identifiziert werden. Im Rahmen einer Validierung wird die Zulässigkeit der Modelle geprüft.

Für einen beispielhaften SiC-basierten PFC-Gleichrichter wird für jede Konvektionsart eine eindeutige volumenoptimierte Wahl von Schaltfrequenz und Stromwelligkeit identifiziert. Das

Optimization of a single-phase PFC Rectifier using Wide Bandgap Devices based on multi-domain Modeling

by Dr.-Ing. Silvia Zulk

Single-phase PFC rectifiers are used in various applications that place high demands on the power density of the electronic system. The choice of dimensioning parameters, such as the switching frequency, has a significant influence on the installation space of the individual components and the system volume. Wide-bandgap semiconductors promise to increase the achievable power densities compared to silicon semiconductors. The reduced switching loss energies allow higher switching frequencies and smaller passive components. In addition, PFC rectifiers are being developed with regard to cooling and conformity with the limits of applicable standards.

The aim of this work is to develop an optimization methodology that gives insight into the system interrelationships and identifies volume-optimized dimensioning parameters. The basis is a multi-domain modelling approach that combines electrical, thermal and magnetic dimensioning methods. The models are analytical in nature in order to reduce the calculation effort for large parameter spaces.

In this thesis, the installation space potential of the totem pole PFC rectifier is investigated. Based on the calculated semiconductor losses, models for heat sink dimensioning are presented. Heat sinks for natural and forced convection are considered. Further components are a filter dimensioning for the

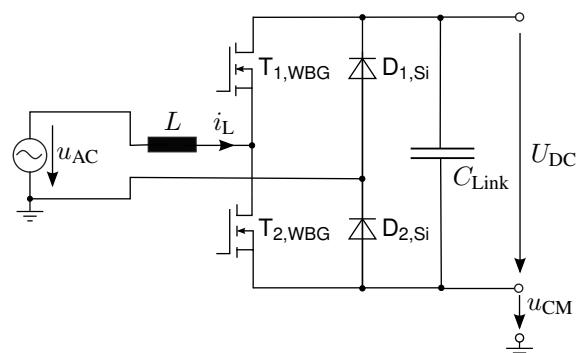


Abb. 72: Topologie des einphasigen PFC-Gleichrichters als Totem-Pole-Ausführung

Fig. 72: Single-phase PFC rectifier in Totem-Pole configuration

Systemvolumen ist sehr sensitiv gegenüber der Schaltfrequenz. Die Konvektionsart hat einen großen Einfluss auf die Schaltfrequenzwahl. Die Stromwelligkeit zeigt in weiten Bereichen der Schaltfrequenz geringe Auswirkungen auf das Systemvolumen. Das bessere Entwärmungsvermögen der erzwungenen Konvektion im Vergleich zur natürlichen Konvektion reduziert das Volumen der optimierten Komponenten Filter, Boost-Drossel und Kühlungssystem um 43%.

Zum Vergleich der Ergebnisse mit anderen realisierten Aufbauten wird einer der baukleinsten GaN-Photovoltaik-Wechselrichter der Google Little Box-Challenge herangezogen. Die Leistungsdichte von Filter, Boost-Drossel und Kühlungssystem sind vergleichbar mit den Ergebnissen dieser Arbeit, und dies ohne Einsatz von Keramikkondensatoren oder kostenintensiven magnetischen Bauelementen. Daher eignet sich die erarbeitete Optimierungsmethodik zur effizienten Dimensionierung von PFC-Gleichrichtern hoher Leistungsdichte.

observance of normative limit values of conducted disturbances as well as the modelling of magnetic components. Each of the component models mentioned leads to a volume-optimized solution. By merging all models into one optimization methodology, a volume-optimized selection of the dimensioning parameters switching frequency and current ripple can be identified. The admissibility of the models is checked within the scope of a validation.

For an exemplary SiC-based PFC rectifier, a unique volume-optimized selection of switching frequency and current ripple is identified for each type of convection. The system volume is very sensitive to the switching frequency. The type of convection has large influence on the switching frequency selection. On the other hand, the choice of the current ripple has little effect on the system volume in wide ranges of the switching frequency. The better heat dissipation capacity of forced convection compared to natural convection reduces the volume of the optimized components filter, boost inductance and cooling system by 43%.

One of the smallest GaN photovoltaic inverters of the Google Little Box Challenge is used to compare the results with other prototypes. The power density of the filter, boost inductance and cooling system is comparable to the results of this work, even without the use of ceramic capacitors or cost-intensive magnetic components. Therefore, the developed optimization methodology is suitable for an efficient dimensioning of PFC rectifiers with high power density.

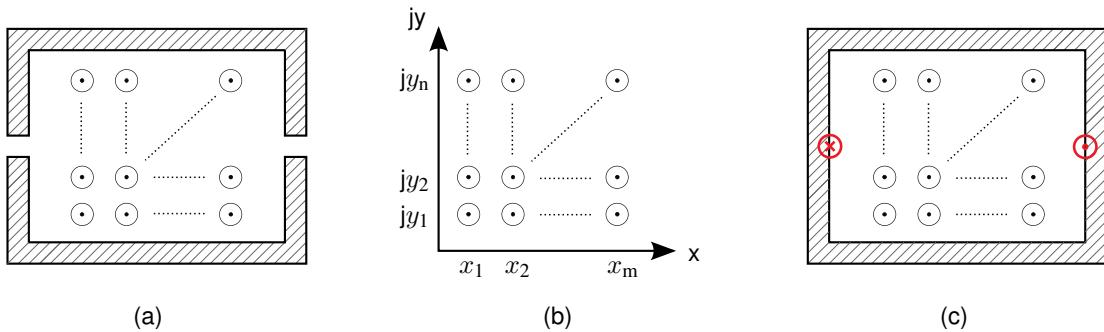


Abb. 73: Zur analytischen Berechnung der Verluste induktiver Komponenten durch den Proximity-Effekt: Ermittlung des externen H-Feldes; (a) Wicklungsanordnung im Wicklungsfenster, (b) Beschreibung der Leiteranordnung in komplexer Zahlenebene, (c) Fiktives Ersetzen der Luftspalte durch Leiter

Fig. 73: Loss calculation for inductive components due to the proximity effect: calculation of external H-field; (a) coil placement in winding window, (b) description of windings in complex numbers, (c) virtual replacement of the air gaps by additional windings

Zeiteffiziente Berechnung der Magnetgeräusche drehzahlvariabler elektrischer Maschinen

von Dr.-Ing. Stephan-Akash Vip

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, Strukturdynamik und Akustik. Die in dieser Arbeit vorgestellte Berechnungsmethode kombiniert analytische Verfahren mit numerischen Simulationen. Der Vorteil der Methode besteht darin, dass auf die für einen störenden Einzelton kausal verantwortliche Kraftanregung zurückgeschlossen werden kann.

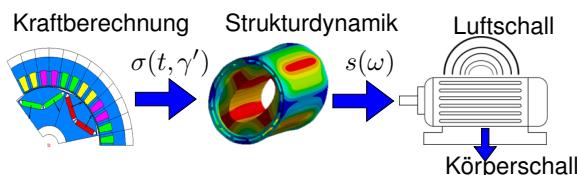


Abb. 74: Überblick über den Methoden-Workflow
Fig. 74: Overview of the methods workflow

Im Mittelpunkt der Arbeit 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 Eigenschwingformen (Moden) oder der Einfluss der Lagerung, bleiben in diesem reduzierten Modell erhalten. Im Falle der untersuchten permanentmagneterregten Synchronmaschinen (PMSM) 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 Vibrationen der abstrahlenden Oberfläche in einem Hochlauf oder für ein gesamtes Betriebskennfeld zu bestimmen. Mit Hilfe analytischer Strahlermodelle wird dann der abgestrahlte Schalldruck berechnet.

Time-efficient calculation of magnetic noise of variable-speed electrical machines

by Dr.-Ing. Stephan-Akash Vip

The noise spectrum of electrical machines is characterized by discrete individual tones of electromagnetic origin in the single-digit kilohertz frequency range. These tonal components are perceived by humans as unpleasant or even as a damage of the drive system. Thus, predicting the noise emissions in the design phase of a drive system is of high importance for many applications. The noise calculation couples the physical domains of electromagnetics, structural dynamics and acoustics. The novel calculation method presented in this thesis combines analytical methods with numerical simulations. The advantage of this method is that the causally responsible force excitation of a single tone can be deduced.

This thesis focuses on a method that extracts transfer functions from a three-dimensional structural dynamic model. Thus, the computational expenses for the structural dynamic part of the calculation is considerably reduced. Three-dimensional effects such as axially variable eigenmode shapes or the influence of the mounting are retained in this reduced model. In the case of the investigated permanent magnet synchronous machines (PMSM), the forces are determined by two-dimensional finite element simulations. In this context, it is shown how the influence of the used power electronics can be integrated into the noise prediction. These numerical results are analytically processed and combined to determine the vibration of the radiating surface during a run-up or for a complete operating map. With the help of analytical models, the radiated sound pressure is finally calculated.

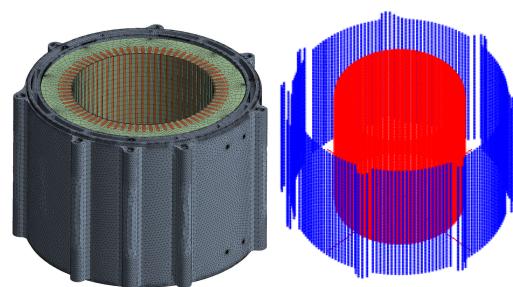


Abb. 75: Reduktion des FEM-Modells
Fig. 75: Reduction of the FEM-modell

A validation of the calculation quality is carried out by means of an experimental modal analysis and an operational deflection shape analysis of two

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

PMSMs. Furthermore, it is shown how the method can be combined with a measurement-based transfer path analysis (TPA) to evaluate the influence of the electrical machine on the noise level in the driver's cabin.

Modellierung und Regelung fehlertoleranter Antriebe mit permanentmagneterregten Synchronmaschinen für Elektrofahrzeuge

von Dr.-Ing. Alexander Rosen

Fehlertolerante Antriebe mit mehrsträngigen, permanentmagneterregten Synchronmaschinen können die Sicherheit und Zuverlässigkeit elektrischer Antriebe in Fahrzeuganwendungen erhöhen. Solche Antriebe ermöglichen auch nach Auftritt von Fehlern in Wicklung, Sensorik oder Ansteuerung noch einen sicheren Weiterbetrieb frei von Bremsmomenten und Überspannungen im gesamten Drehzahlbereich. Die mehrsträngigen, d.h. die mit mehr als drei Wicklungssträngen ausgeführten, Antriebstopologien bieten gleichzeitig Vorteile im Normalbetrieb wie z.B. geringere Stromwärmeverluste, reduzierte Anregungen von akustisch wirksamen Tangential- und Radialkräften oder eine Senkung der Effektivstrombelastung des Zwischenkreises.

Der Entwurf, die Modellbildung sowie die Regelung derartiger Antriebe ist bei Berücksichtigung von Sättigungseinflüssen, Oberwellen und unsymmetrischer Betriebszustände jedoch erheblich komplexer als bei dreisträngigen Antrieben. In dieser Dissertation wird daher ein neuartiges numerisches Simulationsmodell zur Simulation des Zeitverhaltens mehrsträngiger Antriebe beliebiger Strangzahl vorgestellt. Das mit dem Fluss als Zustandsvariable ausgeführte Modell zeichnet sich durch hohe Berechnungsgenauigkeit auch unsymmetrischer Betriebszustände bei hoher Ausführungsgeschwindigkeit sowie rechenzeiteffizienter Parametrierung aus. Aufbauend auf dem Modell werden Regelungskonzepte für den Normalbetrieb und den Fehlerfall abgeleitet. Im Normalbetrieb steht die Ausnutzung der spezifischen Vorteile mehrsträngiger Antriebe im Vordergrund, während im Fehlerfall die Kompensation auftretender Bremsmomente realisiert wird. Alle entwickelten Regelstrategien zielen auch nach Auftritt eines Fehlers auf die Nutzung eines für Elektrofahrzeuge notwendigen breiten Drehzahlbereichs inkl. Betrieb im Feldschwächebereich ab. Mit den entwickelten Regelstrategien stehen erstmals Ansätze zur Gewährleistung von Momentenfreiheit an der Abtriebswelle und Einhaltung der Spannungsgrenzen an den Maschinenklemmen über den gesamten Betriebsbereich für fehlertolerante Topologien beliebiger Strangzahlen und für verschiedene Fehlerfälle zur Verfügung.

Die messtechnische Validierung erfolgt anhand von vier Beispielantrieben mit sechs bzw. fünf Wicklungssträngen an Motorenprüfständen. Bei allen un-

Modelling and Control of Fault-Tolerant Drives with Permanent Magnet Synchronous Machines for Electric Vehicles

by Dr.-Ing. Alexander Rosen

Fault-tolerant drives with multi-phase, permanent magnet-excited synchronous machines can increase the safety and reliability of electrical drives in vehicle applications. Such drives enable safe continued operation free of braking torques and overvoltages in the entire speed range even after faults occur in the winding, sensors, or control system. The multi-phase drive topologies, i.e., those with more than three winding phases, offer additional advantages in normal operation, such as lower ohmic losses, reduced excitation of acoustically effective tangential and radial forces or a reduction in the rms current load of the DC link.

However, the design, modelling, and control of such drives, considering saturation influences, harmonics, and asymmetrical operating conditions, is considerably more complex than with three-phase drives. Therefore, this dissertation presents a novel numerical simulation model for the simulation of the time behaviour of multi-phase drives of any number of phases. The model, which is designed with the flux as a state variable, is characterized by high calculation accuracy even of asymmetrical operating states, high execution speed and computationally efficient parameterization.

Based on the model, control concepts are derived for normal operation and in case of failure. In normal operation, the focus is on exploiting the specific advantages of multi-phase drives, while in the event of a fault, the compensation of braking torques is realized. All control strategies developed aim at using a wide speed range necessary for electric vehicles, including operation in the field weakening range, even after the occurrence of a fault. With the control strategies developed, approaches are available for the first time to ensure freedom from torque at the output shaft and compliance with the voltage limits at the machine terminals over the entire operating range for fault-tolerant topologies of any number of phases and for various fault cases.

The validation is carried out measuring four example drives with six or five winding phases on motor test benches. For all the drives investigated, the measurement results showed good agreement with the precalculated data, which proves correctness of both the simulation model developed and the control strategies based on it. In addition to testing on the engine test bench, the control concepts developed were implemented in two six-phase wheel hub motors of an electric vehicle. The safety-enhancing

tersuchten Antrieben zeigte sich eine gute Übereinstimmung der Messergebnisse mit den vorab berechneten Daten, womit sowohl das entwickelte Simulationsmodell als auch die darauf aufbauenden Regelstrategien validiert werden konnten. Ergänzend zur Erprobung am Motorenprüfstand wurden die entwickelten Regelungskonzepte in zwei sechssträngigen Radnabenmotoren eines Elektrofahrzeugs implementiert. In zwei beispielhaften Fahrsituationen auf einem Testgelände wurde die sicherheitssteigernde Wirkung der entwickelten Konzepte nachgewiesen.

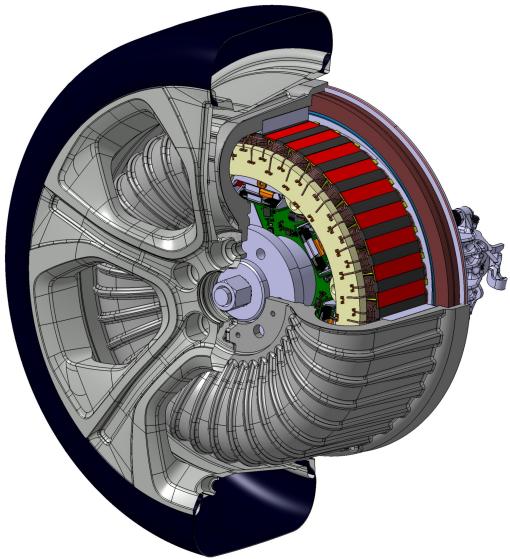


Abb. 76: Bildunterschrift 1
Fig. 76: Caption 1

effect of the developed concepts was demonstrated in two exemplary driving situations on a test site.

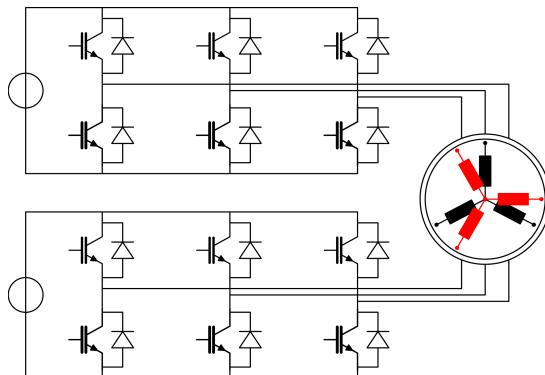


Abb. 77: Bildunterschrift 2
Fig. 77: Caption 2

Permanenterregte Synchronmaschinen hoher Drehmomentdichte

von Dr.-Ing. Constantin Wohlers

Die steigenden Anforderungen bezüglich der Leistungsdichte elektrischer Maschinen können auf verschiedene Arten erfüllt werden. Im Fokus dieser Arbeit stehen permanenterregte Synchronmaschinen (PMSM) mit Zahnpulpenwicklungen, die durch ihre kompakte Bauweise derzeit die höchsten Drehmomentdichten unter den elektrischen Maschinen aufweisen. Die Steigerung der Drehmomentdichte kann, ermöglicht durch eine direkte Flüssigkeitskühlung der Statorwicklung, durch eine Erhöhung der Stromdichte auf bis zu $S_1 = 100 \text{ A/mm}^2$ erfolgen. Stromdichten dieser Größe übersteigen den Stand der Technik um das ca. Siebenfache. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird aufgezeigt, wie Maschinen mit direkter Flüssigkeitskühlung der Statorwicklung und somit mit hoher möglicher Stromdichte sinnvoll dimensioniert werden können.

Anhand einer beispielhaften systematischen Parametervariation wird ein industrieller *Torque-Motor* durch FEM-Simulationen für den Einsatz hoher Stromdichten und das Erreichen hoher Drehmomentdichten dimensioniert. Die Drehmomentdichte kann im Vergleich zum Ausgangsmotor um den Faktor fünf gesteigert werden. Die auftretenden Phänomene wie Sättigung des Statorblechpaketes, Stromverdrängung in der Statorwicklung und Entmagnetisierung der Permanentmagnete werden aufgezeigt und diskutiert. Sättigung und Streuung im Stator werden als maßgebliche Einflüsse bei der Dimensionierung von elektrischen Maschinen hoher Stromdichte identifiziert. Zur Berücksichtigung dieser Einflüsse wird eine analytische Grobdimensionierung in Kombination mit einem vereinfachten magnetischen Ersatznetzwerk (MESB) erarbeitet. Zu Beginn der Arbeit werden Methoden zur Berechnung magnetischer Widerstände für den Stator elektrischer Maschinen, deren Validierung in wissenschaftlichen Veröffentlichungen bisher fehlt, vorgestellt und ihre Eignung diskutiert.

Die elektromagnetische Dimensionierung durch Parametervariationen erfordert eine große Anzahl von FEM-Simulationen. Aus diesem Grund wird ein Verfahren zur Bestimmung des Betriebsverhaltens mit einer Reduzierung der Anzahl an nötigen magnetischen Einzelrechnungen erarbeitet und die Ergebnisse mit ausführlichen FEM-Simulationen verglichen. Die Eignung des Verfahrens für den Einsatz mit MESB wird ebenfalls erprobt und diskutiert. Außerdem wird in dieser Dissertation die geschlossen-analytische Berechnungsmethodik der

Permanent Magnet Synchronous Machines with High Torque Density

by Dr.-Ing. Constantin Wohlers

The rising demands with respect to power density of electrical machines may be met with different approaches. Permanent magnet synchronous machines (PMSM) with concentrated windings, which reach the highest torque densities among the electrical machines due to their compact design, are the main focus of this thesis. A significant rise in torque density is possible by increasing the current density to up to $S_1 = 100 \text{ A/mm}^2$. This rise in current density to seven times the state of the art is possible when using a direct liquid cooling of the stator winding. In this thesis, ways are shown to achieve preferable designs for electrical machines with direct liquid cooling of the stator winding and hence high current densities.

An industrial *torque-motor* with direct liquid cooling is designed by systematic FEM parameter studies. The aim of the design is the utilization of a high current density to achieve a high torque density, while maintaining a high efficiency. Five times the torque density compared to the basic motor can be achieved. The observed phenomena like saturation of the stator, current displacement in the stator winding and demagnetization of the magnets are described and discussed during the dimensioning process. It is shown, that saturation and flux leakage are the major influences on the design of the stator of electrical machines with high current densities. Hence, an analytical method in combination with a magnetic equivalent circuit is developed to find an initial design of machines with high current densities which address the mentioned effects.

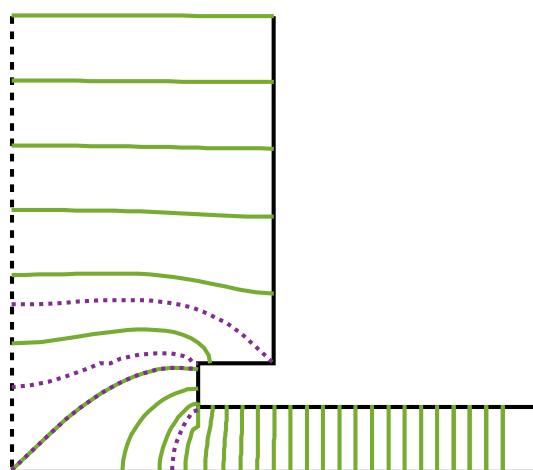


Abb. 78: Nutbereich mit Feldlinien aus konformer Abbildung
Fig. 78: Slot area with field lines by conformal mapping

Stromverdrängung um den Einfluss der endlichen Permeabilität der die Leiter umgebenden Statornut erweitert.

Die Ergebnisse der erarbeiteten analytischen Grobdimensionierungsmethodik zeigen eine gute Übereinstimmung mit Ergebnissen von FEM-Simulationen; das so ermittelte Optimum liegt nahe an der durch Parameterstudien mittels FEM dimensionierten Maschine. Zuletzt werden die Voraussagen über das Betriebsverhalten von PMSM mit hoher Stromdichte messtechnisch an einem Demonstrator mit direkter Flüssigkeitskühlung validiert.

- [30] C. Wohlers und B. Ponick. "First Estimations of Stator Dimensions for Permanent Magnet Synchronous Machines with Tooth-Coil Windings and Direct Liquid Cooling". In: *2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*. Aug. 2020, S. 462–468. DOI: 10.1109/ICEM49940.2020.9270897.

Up to now, validated methods for the calculation of magnetic resistances for the magnetic equivalent circuit of the stator of electric machines are missing in literature. Thus, such methods are presented and discussed at the beginning of this thesis.

The electromagnetic dimensioning by parameter studies requires a high number of FEM-simulations. To reduce the computational effort, a method for the determination of the operating behavior with a reduced number of magnetostatic FEM calculations, i.e. a reduced number of rotor positions, is developed and the results are compared to detailed FEM simulations. In addition, the method is tested in combination with magnetic equivalent circuits and the results are discussed. Furthermore, the known method for determination of current displacement in a closed analytical form for conductors in a slot is extended considering the influence of the finite permeability of the surrounding iron.

The results of the developed analytical method for finding an initial geometry of the stator show good agreement with the results of FEM simulations. Moreover, the design optimum is already close to the machine designed by parameter studies. Finally, the predicted operating behavior of PMSM with high current density is validated by measurements.

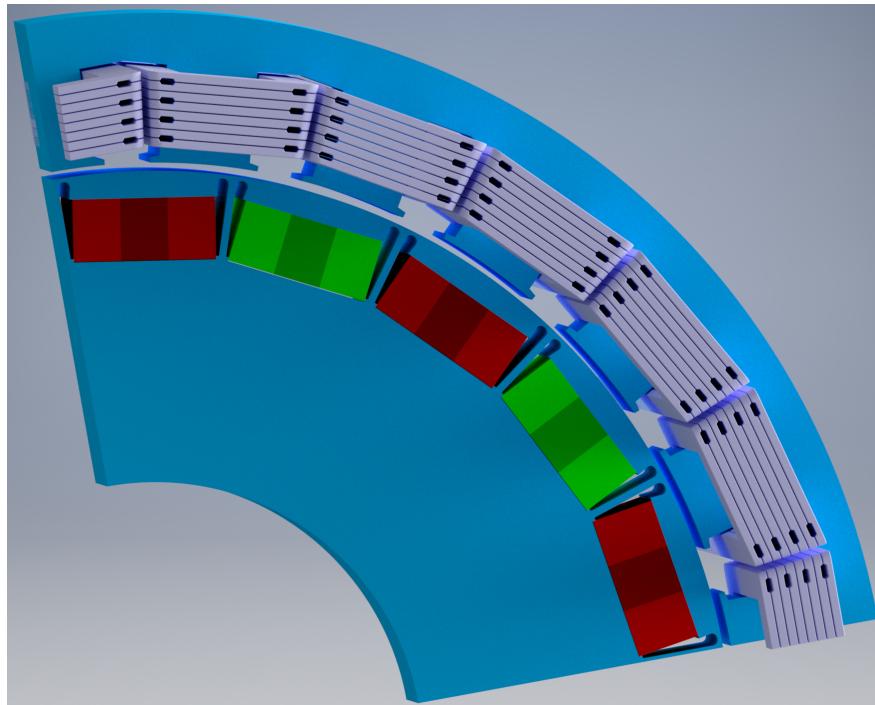


Abb. 79: 3D-Modell der dimensionierten PMSM [30]
Fig. 79: 3D-Modell of the designed PMSM

Gestaltung von Rotoren permanentmagneterregter Synchronmaschinen für die Metalladditive Fertigung

von Dr.-Ing. Stefan Urbanek

Die nahezu unbegrenzte dreidimensionale Gestaltungsfreiheit der Additiven Fertigung kann heute auch in metallischen Komponenten elektrischer Maschinen vorteilhaft genutzt werden, um den Leichtbaugrad zu erhöhen oder zusätzliche Funktionen zu integrieren. Insbesondere mittels *Laserstrahlschmelzen* können Bauteile mit hoher Präzision, geringer Formabweichung sowie sehr guten mechanischen und magnetischen Eigenschaften gefertigt werden.

In dieser Dissertation wird das große Potential der Metalladditiven Fertigung im Elektromaschinenbau am Beispiel von Rotoren permanentmagneterregter Synchronmaschinen (PM-Rotoren) aufgezeigt, welche sich für die Additive Fertigung anbieten, da mittels *Laserstrahlschmelzen* gefertigte Bauteile prinzipbedingt aus einem einzelnen Werkstoff bestehen und PM-Rotoren nicht notwendigerweise aus gestapelten Elektroblechen aufgebaut sein müssen. Indessen sind im Fall ungeblechter Rotoren im Betrieb insbesondere im Bereich der Rotoroberfläche erhöhte Wirbelstromverluste zu erwarten. Im Rahmen der Arbeit wird daher zunächst der Ansatz diskutiert, ebendiese Wirbelstromeffekte durch gezieltes Schraffieren bzw. Schlitzen der Rotoroberfläche zu unterdrücken. Anhand von numerischen Vorausberechnungen und messtechnischen Untersuchungen wird gezeigt, dass Slitzte in Umfangsrichtung die Oberflächenverluste signifikant verringern können, wohingegen in axialer Richtung orientierte Slitzte diese sogar weiter erhöhen.

Ein Schwerpunkt dieser Arbeit ist die Gestaltung und Dimensionierung des Rotors eines 1,5 kW-Servomotors für die Additive Fertigung, wobei neben der Schlitzung der Rotoroberfläche noch eine Reihe von weiteren geometrischen Besonderheiten umgesetzt werden. Insbesondere wird der weichmagnetische Teil des Rotors so gestaltet, dass eine Schrägungswirkung erzielt wird und gleichzeitig die Magnettaschen axial gerade verbleiben. Der Einfluss dieser Art der Rotorschärgung auf das Luftspltfeld und auf das resultierende Rastmoment wird dabei ausführlich erläutert. Zudem wird durch systematische Konstruktion von Hohlräumen und additiv gefertigten Leichtbaustrukturen der Leichtbaugrad des Rotors erhöht. Nach der Additiven Fertigung des Rotordemonstrators wird dieser in einen konventionellen Stator eingebaut und messtechnisch untersucht. Die Auswertung von Leerlauf- und Lastmessungen sowie von Beschleunigungs-

Design of Permanent Magnet Synchronous Machine Rotors for Metal Additive Manufacturing

by Dr.-Ing. Stefan Urbanek

The almost unlimited three-dimensional design freedom of additive manufacturing technologies can nowadays also be applied to metallic electric machine components in order to increase lightweight construction or to implement additional functionality. Especially when using the technology of *laser beam melting*, parts are built with high precision, small form deviations and very good mechanical and magnetical properties.

In this thesis, the great potential of metal-additive manufacturing in the field of electric machines is investigated using the example of permanent magnet synchronous rotors. Since *laser beam melted* parts on principle consist of one single material, the focus is on additive manufacturing of permanent magnet rotors, which are mainly exposed to a constant magnetic field. However, increased eddy current loss is expected during operation especially near the rotor surface in this case. Therefore, the approach of grooving or rather slotting the rotor surface in order to suppress eddy current effects is discussed in detail in this work. By means of numerical FEM simulations and experimental studies, it is shown that circumferential slotting leads to best possible loss reduction, whereas axial slotting of the rotor surface in turn leads to increased surface loss.

Furthermore, the rotor of a 1.5 kW servo motor is designed for additive manufacturing and built using *laser beam melting*. After this, the additively manufactured rotor is installed in a conventional stator. Besides the surface slotting, the rotor shows some specific features which can only be applied using additive manufacturing technologies. In particular, the soft-magnetic rotor active part is skewed and simultaneously the magnets and magnet pockets are kept axially straight. The impact of this special way of rotor skewing on the air-gap field as well as on the resulting cogging torque is evaluated in detail. In addition, systematically implementing cavities and additively manufactured lightweight structures in order to increase the degree of lightweight construction is focused and the impact on the design from the magnetical and the mechanical point of view is investigated. Experimental no-load and load tests as well as acceleration tests demonstrate that using the additively manufactured skewed rotor prototype leads to higher torque density, higher dynamics and significantly decreased cogging torque and torque ripple compared to a conventional reference rotor.

Finally, the findings of this thesis lead to design

versuchen ergibt, dass der Motor mit dem additiv gefertigten Rotor im Vergleich zum Referenzmotor eine höhere Drehmomentdichte, eine höhere Dynamik und geringere Rast- und Pendelmomente aufweist. Die gewonnenen Erkenntnissen werden letztlich noch auf andere Bereiche des Elektromaschinenbaus übertragen, um daraus Handlungsempfehlungen zur vorteilhaften Gestaltung von Rotoren unter Nutzung der Additiven Fertigung abzuleiten.

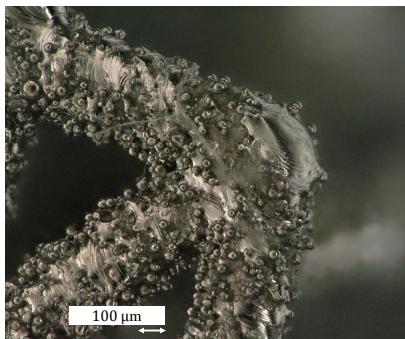


Abb. 80: Nahaufnahme einer additiv gefertigten Gitterstruktur
Fig. 80: Close-up of an additively manufactured lattice structure

guidelines regarding the dimensioning of additively manufactured synchronous rotors.

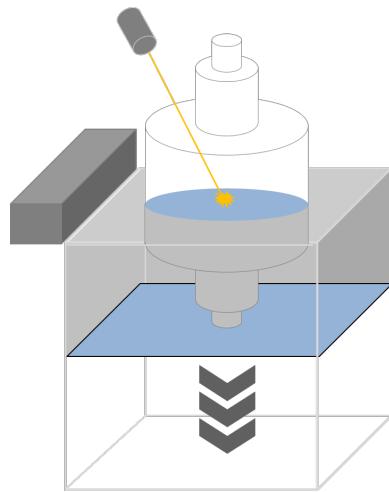


Abb. 81: Prinzipdarstellung des *Laserstrahlschmelzens*
Fig. 81: Principle sketch of *laser beam melting*

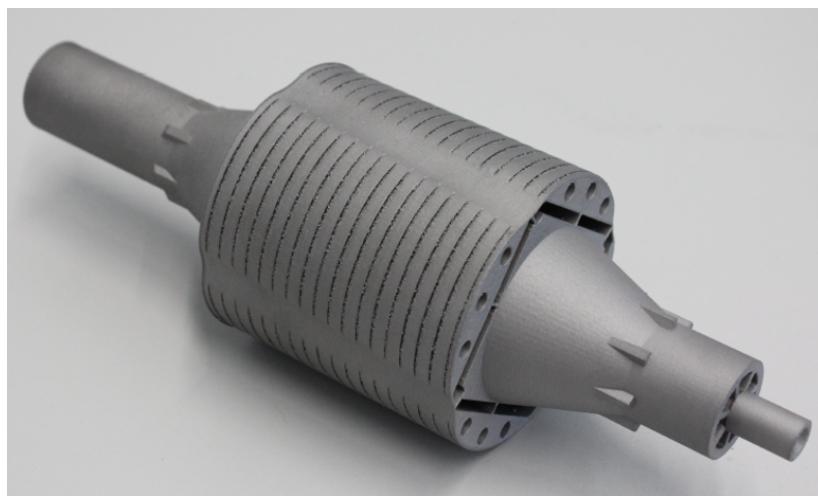


Abb. 82: Additiv gefertigter Rotordemonstrator
Fig. 82: Additive manufactured rotor demonstrator

Analytische Bestimmung parasitärer Kapazitäten in elektrischen Maschinen

von Dr.-Ing. Jan Ole Stockbrügger

Die Anzahl umrichtergespeister elektrischer Maschinen steigt aufgrund der guten Regelbarkeit des Motors bei mittlerweile niedrigen Anschaffungskosten. Infolge der diskreten Schaltzustände der Leistungstransistoren ist der Mittelwert der drei Ausgangsspannungen eines Zweipunkt-Wechselrichters eine von Null verschiedene Gleichtaktspannung, welche als Common-Mode-Spannung bezeichnet wird. Diese wird durch den Umrichter in die Motorwicklung eingeprägt und verursacht parasitäre Ströme, welche zu einer Beschädigung der Motorlagerung und der angeschlossenen Last führen können. Darüber hinaus können die durch die Leistungshalbleiter an den Klemmen der elektrischen Maschine eingeprägten steilen Spannungskanten zu einer ungleichmäßigen Potentialverteilung entlang der Statorwicklung führen. Die dadurch entstehenden Spannungsspitzen können eine unzulässige Belastung für die Isolierung des Motors darstellen. Zur rechnerischen Bestimmung dieser parasitären Effekte müssen die innerhalb einer elektrischen Maschine vorliegenden kapazitiven Kopplungen betrachtet werden.

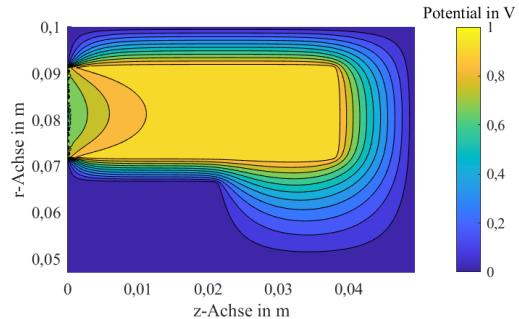


Abb. 83: Visualisierung von analytisch berechneten Äquipotentiallinien im Stirnraummodell einer elektrischen Maschine

Fig. 83: Visualization of analytically calculated equipotential lines in the end-winding model of an electrical machine

In dieser Arbeit werden neuartige analytische Berechnungsvorschriften für die Wicklung-Rotor-, die Wicklung-Stator- und die Stator-Rotor-Kapazität sowie für die Leiter-Leiter-Kapazitäten vorgestellt. Hierbei basieren die Ansätze auf der Separations-, der Spiegelungs- und der Ersatzladungsmethode. Die Auswahl einer Methode erfolgt in Abhängigkeit von den im Feldproblem vorliegenden Stetigkeits- und Randbedingungen. Insgesamt ergeben sich auf diesem Weg sehr zufriedenstellende, geringe Abweichungen zwischen den analytisch berechneten und den zur Validierung der Methodik mittels Finite-

Analytical determination of parasitic capacitances in electrical machines

by Dr.-Ing. Jan Ole Stockbrügger

The number of inverter-fed electrical machines is increasing due to the good controllability of the machine and the meanwhile low acquisition cost. As a result of the discrete switching states of the power transistors, the average of the three output voltages of a 2-level inverter is a common mode voltage, which differs from zero. This common mode voltage is impressed into the winding by the inverter and causes parasitic currents, which can result in damage of the machine's bearings and of the applied load. Also, the steep voltage slopes impressed to the winding terminals by the power semiconductors lead to an uneven distribution of the electric potential along the stator winding. Voltage peaks occur between the conductors and across the main insulation, which can overstress the insulation. To predict these parasitic effects, the capacitive couplings within an electrical machine must be considered. In this thesis, novel analytical calculation rules for the Winding-to-Rotor-, the Winding-to-Stator- and the Stator-to-Rotor capacitance as well as for the Turn-to-Turn capacitances are presented. The approaches are based on the Separation Method, the Method of Image Charges and the Charge Simulation Method. The selection of a method depends on the continuity and the boundary conditions of the field area. Overall, the small deviations between the analytically calculated and the numerically by means of Finite Element Method determined capacitance values are very satisfactory. For the further validation of the analytical calculation rules, the parasitic capacitances are measured in two electrical machines. The comparison of the measured, the analytically and the numerically determined Winding-to-Stator and Stator-to-Rotor capacitances shows acceptable or only minor deviations. The deviations between the numerically and the analytically determined Winding-to-Rotor capacitances are in the single-digit percentage range. On the other hand, these capacitances deviate significantly from the measured Winding-to-Rotor capacitances, which highly depend on random and systematic measurement errors. At the same time, the analytically and the numerically determined capacitance values depend on the modelled distance between the winding and the rotor electrode. Applying the presented calculation rules, a sensitivity analysis of the capacitive couplings is carried out. Here, the influence of the geometry and the material properties is examined. In principle and applicable to all arrangements, a large distance between

Elemente-Methode numerisch ermittelten Kapazitätswerten. Zur weiteren Validierung werden die parasitären Kapazitäten von zwei ausgeführten elektrischen Maschinen messtechnisch bestimmt. Bei der Gegenüberstellung der messtechnisch, analytisch und numerisch bestimmten Wicklung-Stator- und Stator-Rotor-Kapazitäten ergeben sich durchweg akzeptable bis geringe Abweichungen. Die Abweichungen zwischen den numerisch und den analytisch ermittelten Wicklung-Rotor-Kapazitäten liegen im einstelligen Prozentbereich. Hingegen weichen diese Kapazitätswerte signifikant von den messtechnisch bestimmten Wicklung-Rotor-Kapazitäten ab. Hierbei verdeutlichen die Analysen eine große Abhängigkeit der auf Basis von drei Messkapazitäten berechneten Wicklung-Rotor-Kapazität von zufälligen und systematischen Messfehlern. Gleichzeitig ist der analytisch und der numerisch ermittelte Kapazitätswert im hohen Maße vom modellierten Abstand zwischen der Statorwicklungs- und der Rotorelektrode abhängig. Unter Anwendung der vorgestellten Berechnungsvorschriften erfolgt abschließend eine Sensitivitätsanalyse der kapazitiven Kopplungen. Hierbei wird der Einfluss der Geometrie und der Materialeigenschaften untersucht. Grundsätzlich gilt für alle Anordnungen, dass ein großer Abstand zwischen den Elektroden, eine geringe kapazitive Kopplungsfläche und im Feldgebiet vorliegende Medien mit niedrigen Permittivitäten zu kleinen Kapazitätswerten führen. Darüber hinaus leiten sich aus den Analysen der Feldprobleme Abhängigkeiten zwischen den Geometrie- und Materialeigenschaften sowie weitere Maßnahmen zur Reduzierung oder Erhöhung der parasitären Kapazitäten ab. Insgesamt ermöglichen die in dieser Arbeit vorgestellten analytischen Berechnungsvorschriften eine einfache und schnelle Vorausberechnung der parasitären Kapazitätswerte. Die Methoden eignen sich insbesondere für Sensitivitätsanalysen und Parameterstudien.

the electrodes, a small capacitive coupling area and media with low permittivities in the field area lead to low capacitance values. In addition, dependencies between the geometry and the material properties as well as further measures for the reduction or increase of the parasitic capacitances are derived from the analysis of the field problems. In conclusion, the analytical calculation rules presented in this thesis allow a simple and fast prediction of the parasitic capacitance values. The methodology is particularly suitable for sensitivity analyses and parameter studies.

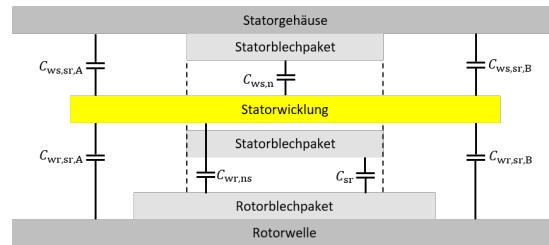


Abb. 84: Darstellung der Gegenkapazitäten in der Schnittansicht einer elektrischen Maschine
Fig. 84: Representation of the mutual capacitances in the sectional view of an electrical machine

Elektromagnetische Gestaltung permanentmagneterregter Synchronmaschinen für den geberlos geregelten Betrieb im gesamten Drehzahlbereich

von Dr.-Ing. Francesco Quattrone

In vielen Bereichen der Industrie werden kompakte elektrische Servoantriebe mit einer hohen Drehmomentdichte eingesetzt. Permanentmagneterregte Synchronmaschinen (PMSM) mit modernen Magnetwerkstoffen sind für diese Anforderungen besonders gut geeignet. Allerdings stellen mechanische Rotorlagegeber für die Antriebsregelung eine potentielle Fehlerquelle dar. Ein Defekt der Elektronik führt zu einem Ausfall des gesamten Antriebs. In Anwendungen mit erhöhten Vibrationsbeanspruchungen, erweiterten Temperaturbereichen oder erhöhtem Eintrag von Staub steigt die Häufigkeit von Fehlern.

Geberlose Regelungsverfahren ermöglichen den Betrieb von PMSM ohne mechanischen Rotorlagegeber. Neben der erhöhten Ausfallsicherheit stellen die Reduktion des Bauvolumens und der Kosten weitere Vorteile dar. Im unteren Drehzahlbereich und im Stillstand werden anisotropiebasierte Verfahren auf Basis eines überlagerten Hochfrequenzsignals verwendet. Aufgrund der besonderen Anforderungen an die magnetischen Eigenschaften im gesamten Lastbereich eignet sich nicht jede PMSM uneingeschränkt für die anisotropiebasierte Rotorangeschätzung.

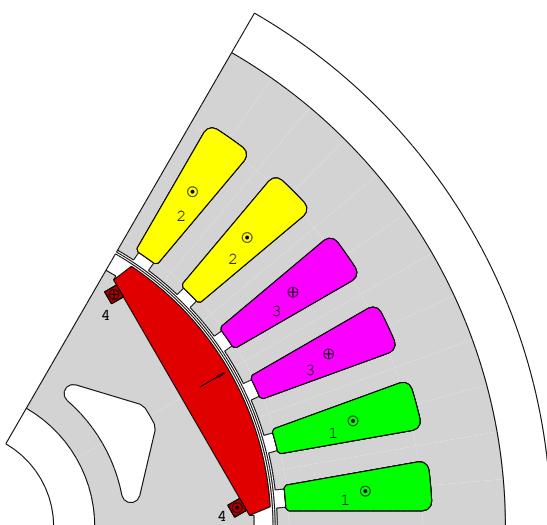


Abb. 85: Querschnitt einer PMSM mit Oberflächenmagneten und kurzgeschlossenen Spulen im Rotor

Fig. 85: Cross-section of a PMSM with surface-mounted magnets and short-circuited coils in the rotor

Electromagnetic Design of Permanent Magnet Synchronous Machines for Self-Sensing Control in the Full Speed Range

by Dr.-Ing. Francesco Quattrone

In many industrial applications, compact electrical servo motors with a high torque density are used. Permanent magnet synchronous machines (PMSM) with modern permanent magnet materials are particularly well suited for these requirements. But mechanical rotor position encoders for drive control are potential sources of error. Defects in the electronics lead to a failure of the entire drive system. In applications with increased vibrations, a wide temperature range or high dust deposit, the probability of failures is even higher.

Self-sensing control methods allow the operation of PMSM without mechanical rotor position encoders. Besides the improved resilience, the reduced construction volume and the reduced cost are additional advantages. In the lower speed range and at standstill, anisotropy based methods with a superimposed high-frequency voltage are used. Not every PMSM is suited for this anisotropy based rotor angle estimation due to the special requirements to the magnetic properties of the PMSM in a wide load range.

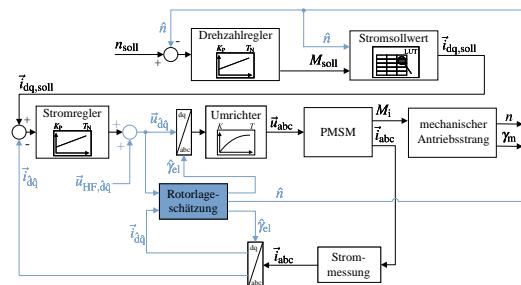


Abb. 86: Struktur einer geberlosen Drehzahlregelung mit Rotorlagenabschätzung

Fig. 86: Self-sensing speed control structure with rotor position estimation

In this thesis, the interdependencies between machine properties and self-sensing control are investigated. The focus is on the electromagnetic design of the PMSM. In addition to a detailed consideration of the rotor design, the winding design and the magnetic properties, an enhanced approach based on short-circuited coils in the rotor is examined. The limits of purely analytic methods for calculating the magnetic machine parameters are demonstrated and a time efficient approach is developed, that combines numerical and analytical calculation methods.

In dieser Arbeit werden die Wechselwirkungen zwischen Maschineneigenschaften und geberloser Regelung näher untersucht. Der Fokus liegt dabei auf der elektromagnetischen Gestaltung der PMSM. Neben einer differenzierten Betrachtung der Rotorgestaltung, der Wicklungsausführung und der magnetischen Materialeigenschaften wird auch ein erweiterter Ansatz auf Basis zusätzlicher kurzgeschlossener Spulen im Rotor untersucht. Dabei werden die Grenzen rein analytischer Berechnungsansätze für die Berechnung der magnetischen Maschinenparameter aufgezeigt und ein zeiteffizienter Lösungsansatz erarbeitet, der numerische Verfahren auf Basis der Finite-Elemente-Methode mit analytischen Berechnungen kombiniert. Die gute Übereinstimmung von Messergebnissen an Demonstratoren mit den Simulationsergebnissen stellt die Praxisrelevanz der in dieser Dissertation erarbeiteten Verfahren und Werkzeuge unter Beweis.

The good match between measured results from two prototypes and the theoretical prediction proves the practicability of the developed methods and tools.

Fünfsträngige Aktoren in Lenkungssystemen für autonomes Fahren

von Dr.-Ing. Tim Buchali

Der zuverlässige Betrieb von Aktoren ist ein wichtiges Thema in der Automatisierung. Insbesondere im Bereich des Straßenverkehrs steigen die Anforderungen an die Zuverlässigkeit von Aktoren mit zunehmendem Automatisierungsgrad deutlich an. Wichtige Aktorsysteme für das Fahren sind das Lenk-, Brems- und Antriebssystem. Diese Systeme dürfen in fahrerlosen Szenarien nicht vollständig ausfallen. Lenkaktoren nach dem Stand der Technik erreichen die geforderte Zuverlässigkeit durch eine Verdopplung der üblichen dreiphasigen Aktoren. Muss die Zuverlässigkeit weiter gesteigert werden, ist diese Lösung in Bezug auf Bauraum, Gewicht, Kosten und Energieverbrauch nicht mehr effizient. Hier kommen mehrsträngige Maschinen zum Einsatz. In dieser Arbeit wird ein fünfsträngiges Aktorkonzept für eine Lenkanwendung vorgestellt, dass durch die Nutzung einer Einzelstrangregelung ein hohes Sicherheitsniveau erreicht. Es werden drei Hauptpunkte untersucht: die Anforderungen, die Zuverlässigkeit und die fehlertolerante Strategie.

Das erforderliche Drehmoment des Aktors wird durch Testfahrten definiert. Es werden verschiedene Fahrzyklen durchgeführt, um die Zahnstangenkräfte zu untersuchen. Durch die Analyse der Systemarchitektur werden die Lenkkräfte in Zusammenhang mit dem benötigten Lenkmoment des Aktors gebracht.

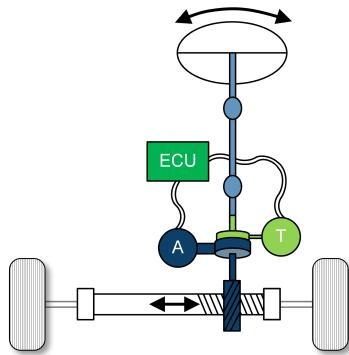


Abb. 87: Schematische Darstellung der Architektur eines Lenksystems

Fig. 87: Schematic view of a steering system architecture

Eine Methode zur Zuverlässigkeitssanalyse wird entwickelt und allgemein erläutert. Anhand der Ergebnisse dieser Analyse wird gezeigt, wie die Zuverlässigkeit eines Aktorsystems durch einen effizienten Einsatz von Redundanz erhöht werden kann. Die Methodik ist auch auf andere Systemarchitekturen übertragbar.

Electric Five-Phase Actuators in Steering Systems for Autonomous Driving

by Dr.-Ing. Tim Buchali

The reliable operation of actuators is an important topic in automation. Particularly in the area of automotive traffic, the demand on reliability of actuators for driving increases significantly with an enhancing level of automation. Important actuator systems for driving are the steering, braking and accelerating systems. These systems must not fail totally in driverless scenarios. State-of-the-art steering actuators achieve the required reliability by doubling of common three-phase actuators. If the reliability has to increase further, this solution is no longer efficient in terms of installation space, weight, costs and energy consumption. This is where multi-phase machines step in. In this thesis, a five-phase actuator concept for a steering application is proposed which achieves a high safety level by using a single-phase control. Three main points are investigated - the requirements, the reliability and the fail-operational strategy.

The required torque of the actuator is defined by test drives. Different driving cycles are conducted to examine the steering rack forces. By analysing the system architecture, the steering rack forces are related to the required steering torque of the actuator. A method for reliability analysis is developed and explained in general. According to results of this analysis, it is shown how reliability of an actuator system can be increased by an efficient use of redundancy. The methodology can also be transferred to other system architectures.

The use of a fail-operational strategy enables a post-fault operation. Starting with a basic consideration, concepts for torque production after a fault are developed. Different methods to design a post-fault operation are investigated. The result is an innovative post-fault control of the electric machine that can be adapted regarding various steering requirements on the basis of the investigation. The theoretical design of the post-fault operation is verified experimentally on the test bench for various operating points of a steering system. Results show that the theoretical consideration can be implemented to a large extent in reality. The fault management is documented in detail and, therefore, can be applied to other boundary conditions or other components.

With respect to the requirements, the presented five-phase actuator concept is compared with the conventional single three-phase and double three-phase actuators. The important parameters are reliability, which plays a major role in safety-critical applications, achievable torque in a post-fault operation

Der Einsatz einer fehlertoleranten Strategie ermöglicht einen Weiterbetrieb im Fehlerfall. Ausgehend von einer grundlegenden Betrachtung werden Konzepte für die Drehmomenterzeugung nach dem Auftritt eines Fehlers entwickelt. Es werden verschiedene Methoden zur Auslegung eines Weiterbetriebs untersucht. Auf Basis der Untersuchung ergibt sich eine innovative Regelung der elektrischen Maschine, die hinsichtlich verschiedener Anforderungen von Lenksystemen angepasst werden kann. Der theoretische Entwurf des Weiterbetriebs wird am Prüfstand für verschiedene Betriebspunkte eines Lenksystems experimentell verifiziert. Die Ergebnisse zeigen, dass die theoretische Betrachtung weitgehend in die Realität umgesetzt werden kann. Das Fehlermanagement ist detailliert dokumentiert und kann daher auf andere Randbedingungen oder andere Komponenten übertragen werden.

Im Hinblick auf die Anforderungen wird das vorgestellte fünfsträngige Aktorkonzept mit den konventionellen dreisträngigen und doppelt dreisträngigen Aktoren verglichen. Wichtige Parameter sind hierbei zum einen die Zuverlässigkeit, die bei sicherheitskritischen Anwendungen eine große Rolle spielt, das erreichbare Drehmoment im Fehlerfall und die resultierende Drehmomentqualität, wobei eine hohe Qualität bedeutet, dass es frei von Drehmomentwelligkeit ist. Es wird gezeigt, dass das vorgestellte Konzept im Gegensatz zum Stand der Technik zuverlässiger ist und mehrere Redundanzstufen bietet. Dies stellt eine erhebliche Verbesserung der Zuverlässigkeit und des Benutzererlebnisses dar.

Darüber hinaus wird nachgewiesen, dass das Aktorkonzept in der Lage ist, im Fehlerfall ein deutlich höheres Drehmoment im Vergleich zum Stand der Technik bereitzustellen.

and its torque quality where a high quality means that it is free from torque ripple. It is shown that, in contrast to the state-of-the-art, the presented concept is more reliable and provides multiple redundancy levels. This represents a significant improvement in reliability and user experience.

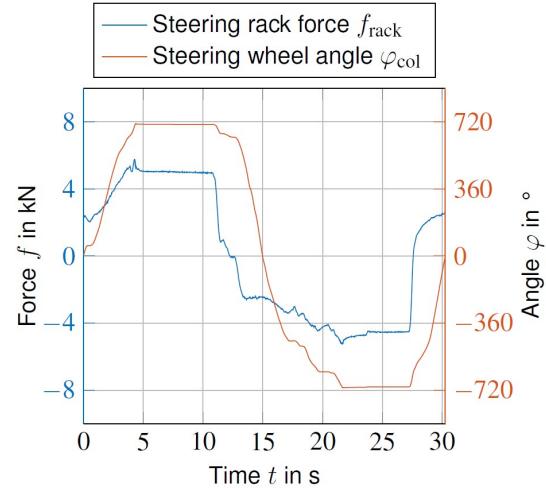


Abb. 88: Lenkkraft und -winkel eines Parkvorgangs
Fig. 88: Steering force and angle of a parking process

Furthermore, it is proven that the proposed actuator concept is able to provide a significantly higher torque in post-fault operation compared to the state-of-the-art.

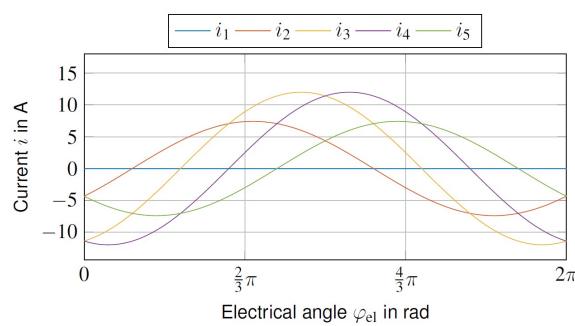


Abb. 89: Strangströme über eine elektrische Umdrehung, drehmomentrippelfreier Betrieb nach Einzelphasenausfall
Fig. 89: Phase currents over electrical rotation, torque ripple free operation after single-phase fault

Aktive Geräuschunterdrückung in einer permanentmagneterregten Synchronmaschine mit Hilfe von Stromoberschwingungen

von Dr.-Ing. Jan Andresen

Diese Arbeit leistet einen Beitrag zur Verbesserung der Geräuschemissionen, die elektrische automobile Hauptantriebe verursachen. In elektrischen Antrieben erzeugen Magnetfelder pulsierende Kräfte, die Vibrationen anregen. Eigenresonanzen der Struktur verstärken diese Vibrationen zusätzlich. Zwei dominante Eigenschwingungsformen (Moden) werden im Rahmen der Arbeit im Detail betrachtet, sowohl die radiale Mode-0 (Atemmode) als auch die tangentiale Mode-0.

Die vorliegende Dissertation analysiert, ob die Vibrationen dieser Moden durch Einprägen von Stromoberschwingungen kompensiert werden können. Die zentrale Fragestellung ist, ob beide Moden getrennt voneinander kompensiert werden können. Untersucht wird dies für eine permanentmagneterregte Synchronmaschine.

Mit Hilfe von vereinfachten analytischen Betrachtungen wird eine Methodik entwickelt. Diese beschreibt den Einfluss von Oberschwingungsströmen auf die beiden Moden. Die Methodik kann auf verschiedene Berechnungsansätze übertragen werden. Im Rahmen der Dissertation werden Kompensationssströme semianalytisch, numerisch und basierend auf Messergebnissen berechnet. Gemessene Beschleunigungen der Moden bilden die Basis für die Validierung der Methodik.

Zentrales Ergebnis der Arbeit ist, dass die radiale und tangentiale Mode-0 unabhängig voneinander beeinflusst werden können. Bei den Resonanzen führt die Reduktion der Vibrationen auch zu einer Reduzierung der abgestrahlten Geräusche. Eine Darstellung der zur Kompensation eingesetzten Ströme in feldorientierten Koordinaten erweist sich als vorteilhaft.

Das vorgestellte Verfahren kann auf der einen Seite genutzt werden, um das Verhalten von bestehenden Maschinen zu verbessern. Zum anderen kann seine Anwendung während des Entwurfs von elektrischen Maschinen berücksichtigt werden. Es ergeben sich zusätzliche Freiheitsgrade, die potentiell die Energieeffizienz steigern können.

Active Noise Cancelation in a Permanent Magnet Synchronous Machine with the Aid of Harmonic Currents

by Dr.-Ing. Jan Andresen

This thesis provides a contribution to the improvement of acoustic emissions of electric automotive main drives. In electric drives, magnetic fields cause force pulsations that excite vibrations. Natural resonances of the structure further amplify these vibrations. Two dominant normal modes of oscillation (modes) are considered in the thesis, the radial mode-0 (breathing mode) as well as the circumferential mode-0.

The dissertation on hand analyses whether the vibration of these modes can be compensated through the injection of harmonic currents. The central question is whether these modes can be compensated independently. This is analysed for a permanent magnet electric machine.

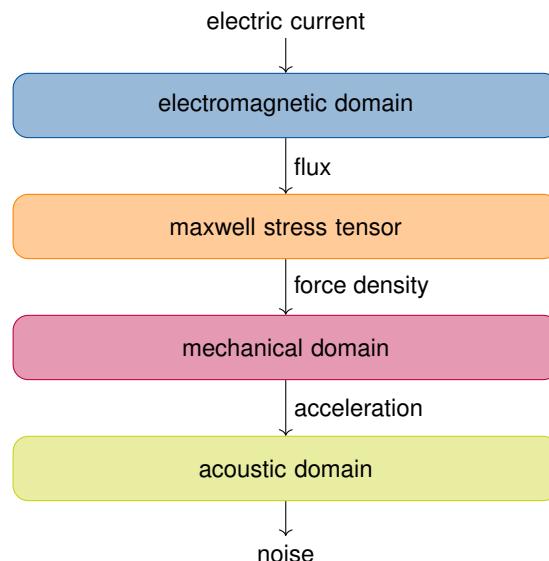


Abb. 90: Wirkungskette Geräuscherzeugung (vgl. [31])
Fig. 90: Functional chain for noise generation (cf. [31])

Based on simplified analytic calculations, a method is developed. It describes the influence that a harmonic current has on both modes. The method can be transferred to different calculation approaches. In the course of this dissertation, harmonic currents are calculated semianalytically, numerically, and measurement based. Measured accelerations of the two modes are the basis for the validation.

The central result of the thesis is that the radial and circumferential mode-0 can be influenced

- [31] M. Bösing. *Acoustic Modeling of Electrical Drives: Noise and Vibration Synthesis based on Force Response Superposition: Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2013. Bd. 71.* Aachener Beiträge des ISEA. Aachen: Shaker, 2014.

independently. At the resonance frequency, the reduction of vibrations also leads to a reduction in radiated noise emissions. A representation of the used compensation currents in field oriented coordinates has proven to be beneficial.

The presented approach can, on the one hand, be used to improve the behaviour of existing machines. On the other hand, the application can be considered during the design of electric machines. This leads to additional degrees of freedom that can potentially increase the energy efficiency.

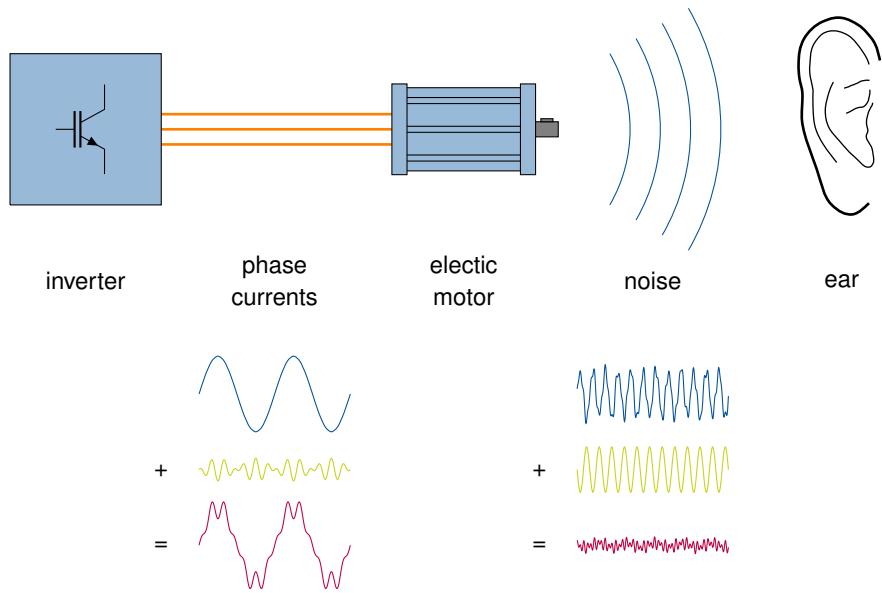


Abb. 91: Grundidee der Geräuschkomensation
Fig. 91: Basic concept of the noise compensation

Transiente Simulation elektrisch erregter Synchronmaschinen mit Parameterfindung durch magnetische Ersatznetzwerke

von Dr.-Ing. Elmar Haschen

Transiente Simulationen an hochpoligen Schenkelpolsynchronmaschinen per Finite-Elemente-Methode durchzuführen ist besonders rechenintensiv und zeitaufwendig. Weisen die Maschinen zudem Schrägung oder Ungleichförmigkeiten im Luftspalt auf, sind die Modelle derart groß, dass eine transiente Simulation kaum noch möglich ist. Liegt ein hoher Anspruch an die Ergebnisgenauigkeit vor, kommen andererseits analytische Verfahren auf Basis eines (erweiterten) Differentialgleichungssystems kaum als Ersatz für die Finite-Elemente-Methode in Frage.

Als Kompromiss zwischen Genauigkeit und Rechenzeit werden in dieser Dissertation die magnetischen Ersatznetzwerke genutzt, um transiente Simulationen an Schenkelpolsynchronmaschinen durchzuführen. Dazu wird ein vollständiges Netzwerk der Schenkelpolsynchronmaschine mit Berücksichtigung von Sättigung und der Läuferdrehung aufgebaut und untersucht. Beispielhaft ist das magnetische Ersatznetzwerk des Läufers einer vierpoligen Schenkelpolsynchronmaschine in Abb. 92 dargestellt.

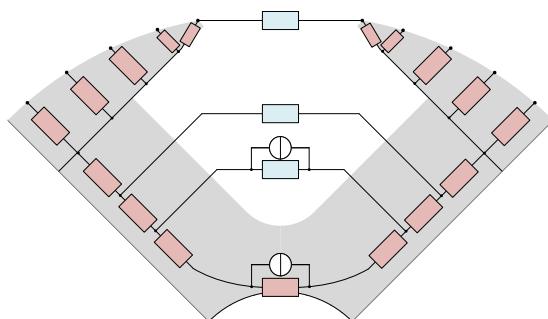


Abb. 92: Beispiel des magnetischen Ersatznetzwerks auf dem Läufer einer vierpoligen Schenkelpolsynchronmaschine

Fig. 92: Example of the magnetic equivalent circuit of the rotor of a four pole salient pole synchronous machine

Bei der Untersuchung lässt sich feststellen, dass die klassischen Ansätze zur Modellierung von magnetischen Leitwerten nicht für alle Teile des magnetischen Kreises einer Schenkelpolsynchronmaschine ausreichend sind, um die Sättigung korrekt abzubilden. Dies wird am Beispiel der Flussröhren im Polschuh in Abb. 93 deutlich. Für die Modellierung solch komplexer Formen wird ein neuer Ansatz hergeleitet. Das fertige Netzwerk wird entweder während der transienten Simulation oder für die Berech-

Transient Simulation of Electrically Excited Synchronous Machines with Parameter Finding by Magnetic Equivalent Circuits

by Dr.-Ing. Elmar Haschen

Performing transient simulations for salient pole synchronous machines with a high number of pole pairs via finite element analysis (FEA) is very time-consuming. Furthermore, if the machines are skewed, have multiple three-phase subsystems or show irregularities in the air-gap, transient simulation is almost impossible due to the big model size. With a high accuracy to deliver, simplified analytical approaches based on solving a system of differential equations for these types of machines are usually not sufficient.

As a compromise between accuracy and calculation time, magnetic equivalent circuits are evaluated for transient simulation in this dissertation. Therefore, a full magnetic equivalent circuit of a salient pole synchronous machine that includes rotor movement and saturation is built and investigated. For example, the magnetic equivalent circuit of the rotor of a four pole salient pole synchronous machine is shown in Fig. 92.

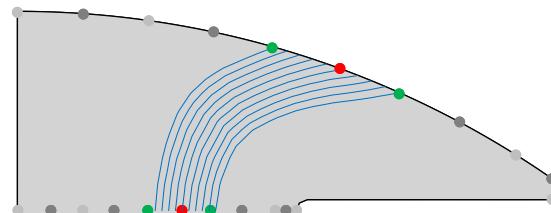


Abb. 93: FEM-Ergebnis der Flussröhren im Polschuh einer Schenkelpolsynchronmaschine bei Leerlauf, die der Berechnung eines magnetischen Leitwerts zugrunde liegen

Fig. 93: FEM result of flux tubes in the pole shoe of a salient pole synchronous machine at no load that needs to be used for the calculation of a magnetic permeance

During the investigation it can be observed that the analytical equations from standard literature for the calculation of magnetic permeances are not feasible for every part of the magnetic equivalent circuit of a salient pole synchronous machine to include saturation. This can be observed by the flux tubes in pole shoe of a salient pole synchronous machine in Fig. 93. Hence, a new approach is derived for these complicated shaped flux tubes in order to take their effects into account correctly. The magnetic equivalent circuit is used for performing the transient simulation (via co-simulation) or for doing map identifications of the machines inductances. In addition, the regarded salient pole synchronous machines have multiple three-phase winding subsys-

nung von Parameterkennfeldern genutzt. Außerdem weist die Ständerwicklung der betrachteten Gruppe von Schenkelpolsynchronmaschinen mehrere Dreiphasensubsysteme auf. Aufgrund des exponentiellen Anstiegs des Umfangs eines Parameterkennfelds mit jedem weiteren Dreiphasensubsystem wird ein Ansatz hergeleitet, wie der Berechnungsaufwand dafür deutlich reduziert werden kann.

Die Anwendung des erstellten MEC zeigt eine hohe Ergebnisgenauigkeit bei einem Bruchteil der Berechnungszeit im Vergleich zur Finite-Elemente-Methode. Das Grundwellenverhalten wird auf diese Weise durch das magnetische Ersatznetzwerk nahezu exakt und Wirkungen der niederpologen Oberfelder werden über den gesamten Bereich der Sättigung mit moderaten Abweichungen abgebildet. Begrenzt ist das Verfahren bei der Abbildung der nutharmonischen Polradoberfelder sowie der Nutilsharmonischen aufgrund der groben Diskretisierung. Weiterhin zeigt die Untersuchung zur Reduzierung des Berechnungsaufwands bei Schenkelpolsynchronmaschinen mit mehreren Dreiphasensubsystemen, dass diese nicht in Abhängigkeit von allen Zustandsgrößen der Ständerwicklung identifiziert werden müssen. Stattdessen ist eine Kennfeldidentifikation der Größen eines einzelnen Dreiphasensystems unabhängig von der Anzahl der Dreiphasensubsysteme immer ausreichend.

tems (six or twelve phases). Hence, the size of the map identification data increases exponentially with each three-phase subsystem. Thus, a new method is investigated to reduce the calculation steps for a map identification in order to enable transient simulation via lookup tables for six-phase and twelve-phase machines.

Using the magnetic equivalent circuit for transient simulation results in an accuracy that is almost equal to the FEA with significantly lower calculation time. The fundamental behavior of the electrical machine is almost equally calculated by the magnetic equivalent circuit compared to the FEA. The technical effects of most significant spatial harmonics are predicted with moderate accuracy depending on saturation. Slot harmonics cannot be predicted by the magnetic equivalent circuit due to its rough discretization. Investigating the map identification of multiple three-phase subsystems shows that the map data does not need to depend on each of the m phase currents. Instead, a map identification with the same effort of a three-phase system is sufficient.

Regelung von Induktionsmaschinen im gesamten Drehzahlbereich ohne Gebersystem

von Dr.-Ing. Stefan Lücke

Der geberlose Betrieb von elektrischen Maschinen bietet zahlreiche Potentiale durch den Wegfall des Gebers. Beispielsweise können Kosten eingespart werden, das Bauvolumen und Wartungsaufwand reduziert und der Betrieb unter extremen Umweltbedingungen ermöglicht werden. Insbesondere für eine Induktionsmaschine ist der geberlose Betrieb bei niedriger Drehzahl mit den bekannten Verfahren herausfordernd. Eine mögliche Lösung ist das Verwenden einer zusätzlichen Wicklung im Rotor, die es erlaubt eine Induktionsmaschine bei niedriger Drehzahlen zu regeln ohne das Betriebsverhalten nennenswert zu verschlechtern.

In dieser Dissertation wird eine Beobachterstruktur mit zugehöriger Lage- bzw. Drehzahladaption entworfen, die im gesamten Betriebsbereich unabhängig von der Statorfrequenz verwendet werden kann. Das Verfahren basiert auf einer hybriden Auswertung, die sowohl die Drehzahlinformation durch die induzierte Spannung als auch die Rotorlageinformation, die durch die zusätzlich Wicklung eingebracht wird, ausnutzt. Die Herleitung des Verfahrens wird detailliert aufgezeigt und die Parametrierung der Adaption beschrieben. Simulationen werden verwendet, um das Führungs- und Störverhalten, die Parametersensitivität und den Einfluss weiterer Faktoren, wie beispielsweise der Umrichternichtlinearitäten, zu bewerten.

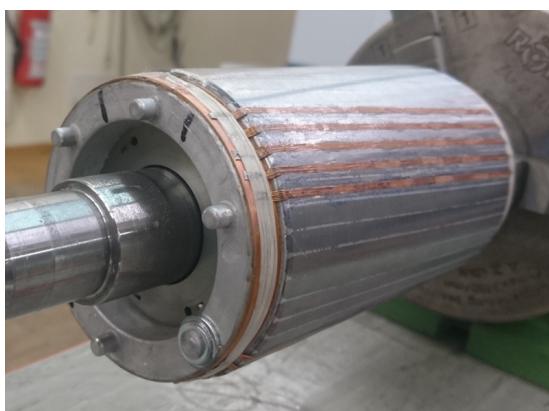


Abb. 94: Prototyp: Rotor mit Zusatzwicklung
Fig. 94: Prototype: Rotor with additional winding

Zudem wird ein innovatives Rotordesign für die Induktionsmaschine zur Steigerung der Anisotropie für hochfrequente Signale untersucht. Dazu wird zusätzlich eine kurzgeschlossene Spule in den Rotor einachsig eingelegt. Basierend auf den Systemglei-

Control of Induction Machines in Whole Speed Range Without an Encoder

by Dr.-Ing. Stefan Lücke

The sensorless control of electrical machines offers numerous potentials due to the omission of the encoder. For example, costs can be saved, the space and maintenance effort can be reduced, and operation under more extreme environmental conditions can be made possible. Especially sensorless control of an induction machine is challenging at low speed with known methods. A possible solution is to use an additional winding in the rotor, which allows controlling an induction machine at low speed without significantly degrading the operating performance. This thesis presents an observer structure including the position and speed adaptation that is designed for the whole operating range and which is independent of the stator frequency. The adaption is based on a hybrid method that exploits the speed information provided by the induced voltage and the rotor position information introduced by the additional winding. The derivation of the method is shown in detail and the parameter setting of the adaption is described. Simulations are used to evaluate the command and disturbance response, parameter sensitivity, as well as the influence of other factors, such as inverter's nonlinearities.

In addition, an innovative rotor design for the induction machine, which increases the anisotropy for high frequency signals, is investigated. Thereby, an additional short-circuited coil is inserted into the rotor in one axis. Based on the system equations, the generated anisotropy is investigated. Furthermore, FEM simulations are used to analyze the effect of various design options in more detail. Thus, design recommendations have been derived. The increase of the anisotropy could be validated using a prototype. In addition, the results from the analytical calculation, the FEM simulation and the results of the prototype's characterization are compared.

Overall simulations of the electric drive system consisting of detailed models for the induction machine and the inverter are performed in order to investigate the sensorless control. In addition, the method is tested on two test benches. Compensation methods to reduce the rotor position estimation error are shown. The investigated method in combination with the proposed rotor design enables the application of the induction machine as a sensorless rotor position controlled drive, therefore allowing new fields of application to be developed. In particular, an induction machine with the modified rotor design could be a cost-effective alternative to the permanent magnet

chungen wird die erzeugte Anisotropie untersucht. Des Weiteren wird anhand von FEM-Simulationen die Wirkung verschiedener Designmöglichkeiten näher analysiert. Daraus konnten Designempfehlungen abgeleitet werden. Die Steigerung der Anisotropie konnte mittels eines Prototypen validiert werden. Zudem werden die Ergebnisse aus der analytischen Betrachtung, der FEM-Simulation und der Charakterisierung des Prototypen verglichen.

GesamtSimulationen des elektrischen Antriebssystems bestehend aus detaillierten Modellen für Induktionsmaschine und Umrichter und unter Verwendung des untersuchten geberlosen Verfahrens werden durchgeführt. Zudem wird das Verfahren an zwei Prüfständen getestet. Kompensationsmethoden zur Reduzierung des Rotorlageschätzfehlers werden aufgezeigt. Das untersuchte Verfahren in Kombination mit dem vorgeschlagenen Rotordesign ermöglicht die Anwendung der Induktionsmaschine als geberlos rotorlagegeregelter Antrieb, sodass neue Anwendungsfelder erschlossen werden können. Insbesondere könnte eine Induktionsmaschine mit dem modifizierten Rotordesign eine kostengünstige Alternative zur permanentmagneterregten Synchronmaschine sein.

synchronous machine.

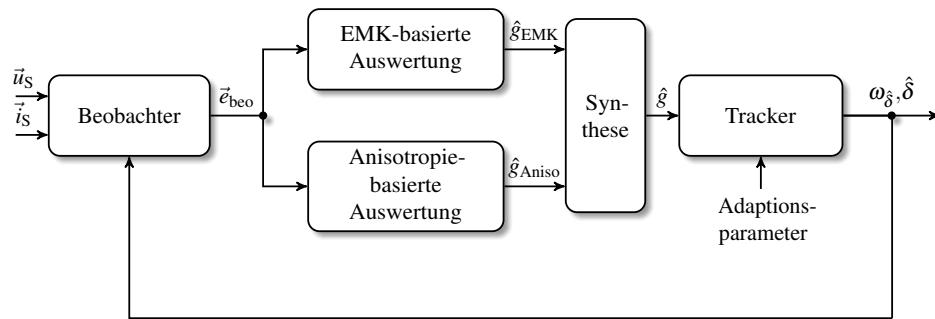


Abb. 95: Schematischer Aufbau des Verfahrens

Fig. 95: Schematic structure of the method

Wireless Power Transfer for Battery Charging Application of Electric Vehicles

von Dr.-Ing. Hedieh Movagharnejad

Das berührungslose Laden von Elektrofahrzeugen (engl. electric vehicles, EV) ist eine sehr bequeme Art der Energieübertragung und hat in den letzten Jahrzehnten wegen seines Bedienungskomforts sowie der Eliminierung von Ladesäulen und Kabeln große Beachtung gefunden. Aufgrund der steigenden Nachfrage nach Elektrofahrzeugen, die auf ihren höheren Wirkungsgrad, geringere Treibhausgasemissionen und Unabhängigkeit von Erdölpreisen zurückzuführen ist, ist deren Laden aktuell von entscheidender Bedeutung. In dieser Dissertation wird eine aufkommende Technologie, die drahtlose Energieübertragung (engl. wireless power transfer, WPT), vorgestellt, die den Schlüssel zu einer bequemeren Lademethode mittels WPT durch Induktion bildet. Die induktive Energieübertragung wird in erster Linie für Anwendungen mit mittlerer bis hoher Leistung verwendet, wie das Laden von Elektrofahrzeuggitterbatterien.

In WPT-Systemen wird die Leistung mittels der Spulen eines lose gekoppelten Transformators übertragen, die als Sender und Empfänger bezeichnet werden, und es gibt einen magnetischen Kopplungspfad mit geringer Intensität und großem Luftspalt dazwischen. Allerdings bestehen in realen EV-Ladesystemen verschiedene Nicht-Idealitäten wie vertikale, horizontale und winklige Verschiebungen der Spulen, die als Koppler dienen, welche leider nicht vermeidbar sind. Diese stellen Herausforderungen in der Entwicklung und Regelung der WPT-Systeme dar. Darüber hinaus sollte die Bauform eines WPT-Systems für Anwendungen im Automobilbereich kompakt, effizient und bequem zu bedienen sein. In dieser Dissertation wird eine Auslegungsmethodik für die Auswahl und den Entwurf der lose gekoppelten Transformatoren vorgestellt. Diese Methodik basiert auf den wichtigen Auslegungskriterien zur Verbesserung der Leistungsübertragungsfähigkeit und des Kopplungskoeffizienten unter Einbehaltung der Emissionsbeschränkungen des Streumagnetfelds. Außerdem werden analytische Modelle des lose gekoppelten Transformators inklusive der entsprechenden kapazitiven Kompen-sationsmethoden vorgestellt. Durch die Anwendung dieser Modelle kann die Charakteristik des Systemverhaltens vor dem Aufbau vorhergesagt und verbildlicht werden. Zur Definition des Betriebsbereichs des Konverters werden verschiedene Auslegungskriterien ausgewählt. In dieser Dissertation wird angestrebt, die optimalen Betriebspunkte eines reihe-reihen (engl. series-series, SS) und reihe-

Wireless Power Transfer for Battery Charging Application of Electric Vehicles

by Dr.-Ing. Hedieh Movagharnejad

Contactless charging of electric vehicles (EVs) is a very convenient way of transferring power and has received attention in the last decades because of the ease of operation provided by the elimination of charging posts and cords. In addition, due to the growing demand for EVs because of their higher efficiency, lower greenhouse gas emissions and independence from expensive petroleum, charging them effectively is crucial. This thesis presents an emerging technology, wireless power transfer (WPT), which holds the key to a more convenient charging method utilizing WPT through induction. Inductive power transfer is generally used for medium to high power transfer applications like charging the batteries of EVs.

In WPT systems, power is transferred through the coils of a loosely coupled transformer, which are called the transmitter and receiver, and a low-intensity magnetic coupling path and large air gap exist between them. However, in real EV charging systems, there are non-idealities such as vertical, horizontal and angular offsets between the coils serving as couplers, which are not avoidable. These cause challenges in designing and controlling the WPT system. Nevertheless, for automotive applications, the WPT system setup should be compact, efficient, and convenient to use. This thesis presents a design methodology for choosing and designing the loosely coupled transformer. The design procedure is based on the important design criteria which enhance the power transfer capability and coupling coefficient, while observing the magnetic field leakage emission restrictions. In addition, analytical models of the loosely coupled transformer with the corresponding capacitive compensation methods are presented. By applying these models, the characteristics of the system behaviour can be predicted and illustrated before constructing the setup. Various design metrics are used to define the power converter operation area. In this thesis, the objective is to detect and propose the optimum operating points of series-series (SS) and series-parallel (SP) compensated converters to make them robust against variations in the coupling and loading conditions. Power transfer capability, efficiency enhancement, robustness against these non-ideal variations, and optimal operation of the power converter are considered as design metrics. Various scenarios for application in EV battery charging are proposed and both compensation topologies are applied to the WPT system and the converter is designed to fulfil the require-

parallelen (engl. series-parallel, SP) kompensierenden Konverters zu finden und vorherzusagen, damit die Konverter gegenüber verschiedenen Kopplungs- und Lastschwankungen robust sind. Leistungsübertragungsfähigkeit, Wirkungsgradverbesserung, Robustheit gegenüber der Nicht-Idealitäten sowie optimaler Betrieb des Konverters werden als Auslegungskriterien genutzt. Es werden verschiedene Anwendungsszenarien für das Laden von Elektrofahrzeugbatterien vorgeschlagen und beide Kompensationstopologien werden im WPT-System angewendet. Letztendlich wird der Konverter für jede identifizierte Betriebsfrequenz entworfen, um die Anforderungen zu erfüllen. Für jede Kompensationsmethode wird ein 3 kW-Versuchsaufbau implementiert und die analytischen und simulativen Ergebnisse werden anhand der Messergebnisse validiert. Der SS-kompensierte Konverter mit der als Doppel D – Doppel D mit Überlappung bekannten Kopplertopologie zeigt einen DC-DC-Wirkungsgrad von 94,3% bei einem Luftspalt von 20 cm. Beide Kompensationssätze des vorgeschlagenen WPT-Systems wurden miteinander verglichen. Aus dem Vergleich lässt es sich ableiten, dass der SS-Resonanzkonverter die Nicht-Idealitäten besser verträgt und sich für das kontaktlose Laden in EV-Anwendungen daher besser eignet.

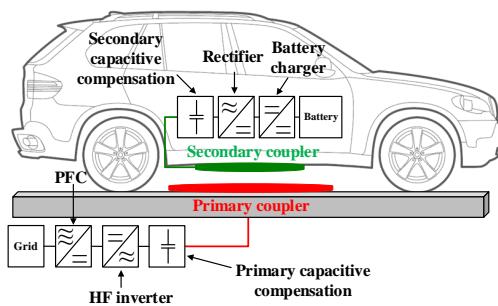


Abb. 96: Allgemeine WPT-Struktur für das berührungslose Laden von Elektrofahrzeugen

Fig. 96: General WPT structure for contactless charging of EVs

ments at each extracted operating frequency. A 3 kW test setup is implemented for each compensation method and the analytical and simulation results are validated through the measurement results. The SS compensated converter with the coupler topology known as double D – double D with overlap demonstrates a DC-DC efficiency of 94.3% at an air gap of 20 cm. The two compensation topologies of the proposed WPT system are compared, which reveals that the SS resonant converter is more tolerant of non-idealities and is, therefore, more suitable for contactless charging in EV applications.

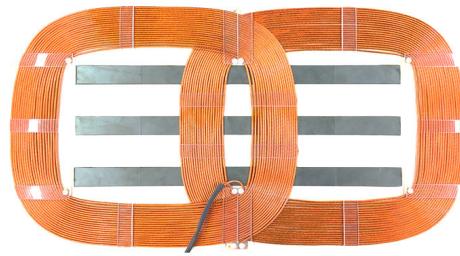


Abb. 97: Aufgebaute Kopplertopologie: Doppel D Spule mit Überlappung

Fig. 97: Constructed coupler topology: Double D coil with overlap

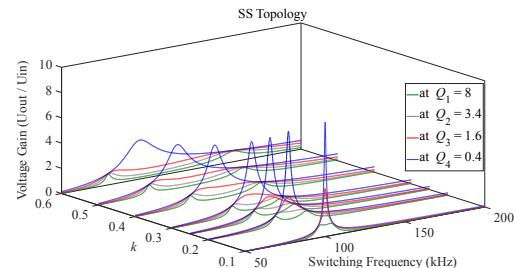


Abb. 98: Spannungsverstärkung des SS-kompensierten Konverters bei verschiedenen Kopplungsfaktoren und unterschiedlichen Lasten

Fig. 98: Voltage gain of SS compensated converter at various coupling coefficients and different loads

Elektrisch erregte Synchronmaschine mit kontaktlosem induktiven Übertragungssystem ohne zusätzlichen Wechselrichter

von Dr.-Ing. Stefan Udemra

Außerhalb der Energieerzeugung werden bei elektrisch erregten Synchronmaschinen (ESM) meist Schleifringssysteme eingesetzt. Diese Systeme sind aufgrund des mechanischen Schleifkontakte der Bürsten auf den Schleifringen verschleißbehaftet und können dadurch in bestimmten Anwendungsbe reichen nicht eingesetzt werden. Deshalb sind Erregersysteme entstanden, die durch die Verwendung eines Transformatoren, bei dem die Sekundärseite gegenüber der Primärseite verdreht werden kann, den erforderlichen Erregerstrom kontaktlos übertragen. Hierbei werden zusätzliche Komponenten benötigt, wodurch der Bauraumbedarf und die Kosten gegenüber dem Schleifringssystem steigen können. Ziel dieser Dissertation ist es, den zusätzlichen Wechselrichter zur Speisung des Transformators durch ein neuartiges Antriebssystem einzusparen, um die Verwendung von ESM, beispielsweise für den industriellen Einsatz, zu attraktivieren.

Zur Erreichung eines hohen Systemwirkungsgrads erfolgt zunächst die Dimensionierung einer Schenkelpolsynchronmaschine (SPSM) mit Hilfe eines metaheuristischen Optimierungsalgorithmus. Ziel der Dimensionierung ist es, einen möglichst hohen Wirkungsgrad bei kleiner Erregerleistung zu erreichen, um die Reduzierung des Bauvolumens des Erregersystems zu unterstützen.

Im Mittelpunkt der Arbeit steht die Dimensionierung sowie Analyse des neuartigen Erregerkonzepts, bei dem das Erregersystem in den Nullleiter eingebbracht und über die Gleichtaktspannung des Maschinen-Umrichters versorgt wird, sodass kein weiterer Wechselrichter benötigt wird. Mit Anschluss des Sternpunktes rufen unerwünschte Nullspannungen einen vom Betriebspunkt abhängigen, nicht steuerbaren Erregerstrom hervor. Deshalb werden zwei analoge Filtertopologien, ein Bandpass und eine Bandsperre mit Hochpass hinsichtlich ihrer Eignung untersucht. Dazu wird ein Dimensionierungsverfahren erarbeitet, bei dem der Einsatz eines Optimierungsalgorithmus neben einem minimalen Nullstrom zur Erreichung des geforderten Erregerstroms auch die maximal mögliche Steuerbarkeit des Erregerstroms sicherstellt. Die Ergebnisse zeigen unter anderem, dass das System mit Bandsperre und Hochpassfilter gegenüber dem System mit einem Bandpass etwa den halben Nullstrom zur Erreichung des geforderten Erregerstroms benötigt.

Electrically excited synchronous machine with contactless inductive transmission system without an additional inverter

by Dr.-Ing. Stefan Udemra

Outside of power generation slip ring systems are usually used for electrically excited synchronous machines (ESM). These systems are due to the mechanical sliding contact of the brushes on the slip rings subject to wear and therefore cannot be used in certain application areas. Therefore, contactless excitation systems have been developed. They are able to transmit the required excitation current without contact by using a transformer in which the secondary side can be rotated in relation to the primary side. This requires additional components, which can increase the installation space requirements and the costs compared to the slip ring system. The aim of this dissertation is therefore to save the additional inverter for supplying the transformer by means of an innovative drive system in order to make the use of ESM more attractive, for example for industrial operations.

To achieve a high system efficiency, a salient pole synchronous machine (SPSM) is first dimensioned using a metaheuristic optimisation algorithm. The aim of the dimensioning is to achieve the highest possible efficiency with low excitation power in order to support the reduction of the construction volume of the excitation system.

The focus of the present work is the dimensioning and analysis of the new excitation concept, in which the excitation system is integrated into the neutral conductor and supplied via the common-mode voltage of the machine inverter, so that no further inverter is required. With connection of the neutral point, undesirable zero voltages cause a non-controllable excitation current that depends on the operating point. This is why two analogue filter topologies, a bandpass and a bandstop with high-pass, are investigated with regard to their eligibility. For this purpose, a dimensioning method is developed in which the use of an optimisation algorithm ensures not only a minimum zero current to achieve the required excitation current, but also the maximum possible controllability of the excitation current. The results show inter alia that the system with bandstop and highpass filter requires about half the zero current to achieve the required excitation current compared to the system with a bandpass.

For experimental verification both the dimensioned SPSM and the excitation system with bandstop and high-pass filter are realised as prototypes. Extensive measurements confirm the suitability of the dimensioning method and the function of the excita-

Zur experimentellen Überprüfung werden sowohl die dimensionierte SPSM als auch das Erregersystem mit Bandsperre und Hochpassfilter als Prototypen realisiert. Umfangreiche Messungen bestätigen die Eignung des Dimensionierungsverfahrens sowie die Funktion des Erregerkonzepts. Insgesamt zeigt sich, ohne Optimierung der Komponenten hinsichtlich ihrer Verluste, ein maximaler Erregersystem-Wirkungsgrad von 48 %.

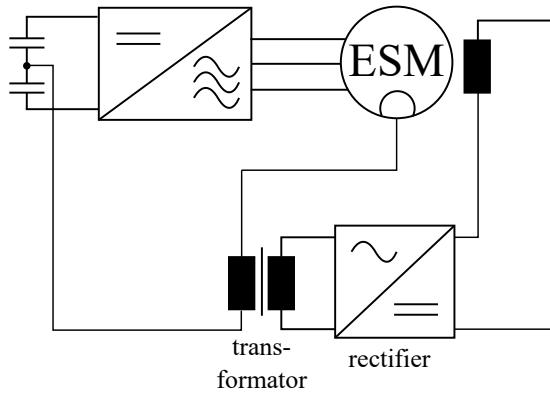


Abb. 99: Aufbau des neuen Systems ohne Wechselrichter zur Versorgung des Transformators

Fig. 99: Structure of the new system without an inverter supplying the transformator

tion concept. Finally, a maximum excitation system efficiency of 48 % can be outlined without optimising the components with regard to their losses.

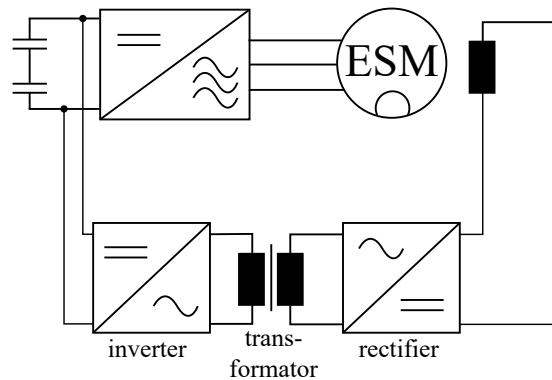


Abb. 100: Aufbau konventioneller Systeme mit einem zusätzlichen Wechselrichter zur Versorgung des Transformators

Fig. 100: Structure of conventional systems with an additional inverter supplying the transformator

Wirbelstromverluste im Statorpresssystem in Großer Schenkelpolsynchronmaschinen

von Dr.-Ing. Torben Fricke

Große Schenkelpol-Synchronmaschinen erfordern ein Presssystem, um ausreichend Axialkraft auf das Statorblechpaket auszuüben. Andernfalls können Vibrationen aufgrund von Magnetkräften die Isolierung der Statorwicklung beschädigen und somit zu Erdschlüssen führen. Das Presssystem ist dem Endbereichsfeld ausgesetzt, wodurch es zu Wirbelstromverlusten kommt. Zur Berechnung dieser Verluste werden meist 3D-Finite-Elemente-Methoden (FEM) eingesetzt. 3D-FEM sind zwar flexibel und in der Lage, eine große Anzahl von Effekten abzubilden, sie erfordern jedoch einen erheblichen Modellierungsaufwand für jede neue Geometrie und lange Berechnungszeiten, was gegen einen Einsatz in frühen Entwurfsstadien einer großen elektrischen Maschine spricht.

Compression System Losses in Large Salient Pole Synchronous Machines

by Dr.-Ing. Torben Fricke

Large salient pole synchronous machines require a compression system to apply sufficient axial force onto the stator core to inhibit vibrations of the stator laminations due to magnetic forces. These vibrations might otherwise damage the stator winding insulation, leading to ground faults. This compression system is exposed to the end region field, leading to eddy current losses. Calculating these losses is a domain dominated by 3D finite element analysis (FEA). While being powerful and flexible, 3D FEA requires significant modeling effort and calculation time for each new geometry, making it infeasible for the early design stages of a large electrical machine.

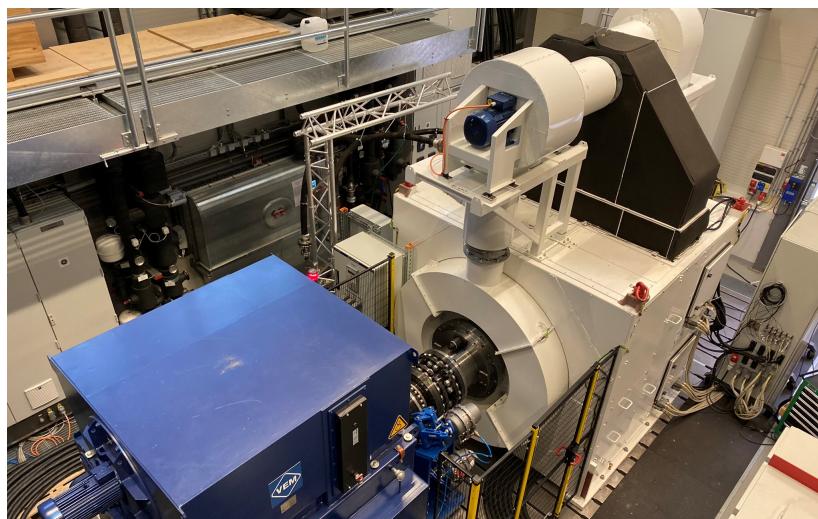


Abb. 101: Genolab Testmaschine (oben rechts).
Fig. 101: Genolab test machine (top right).

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Reihe von Feld- und Verlustberechnungsansätzen entwickelt, um Wirbelstromverluste in magnetischen sowie in nichtmagnetischen Druckplatten und Pressfingern zu berechnen. Die Luftspaltflussdichte, Stator- und Erregerströme sowie eine Reihe von geometrischen Parametern werden als Eingangswerte verwendet, aus denen die Verluste des Presssystems berechnet werden. Das Biot-Savart-Gesetz und numerisch gelöste Schwarz-Christoffel-Abbildungen liegen den entwickelten Feldberechnungsansätzen zugrunde, während die Verlustmodelle auf Oberflächenimpedanzen und einem magnetischen Ersatzschaltbild aufbauen. Die einzelnen Kom-

In this thesis, a set of field and loss calculation approaches is developed to calculate the eddy current losses in magnetic and non-magnetic clamping plates and in pressure fingers. The air-gap flux density, stator and field winding currents, and several geometric parameters are used as input values from which compression system losses are calculated. The field calculation is based on Biot-Savart law and numerically solved Schwarz-Christoffel mappings, while surface impedance boundary conditions and a magnetic equivalent circuit are employed for the loss models. A combination of 3D FEA and measurements on a highly instrumented test machine (see Fig. 101) are used to validate the individual

ponenten der Feld- und der Verlustberechnung werden anhand einer Kombination aus 3D-FEM und Messungen an einer hochinstrumentierten Testmaschine (s. Abb. 101) validiert.

Ein besonderer Schwerpunkt wurde auf die Zeiteffizienz der entwickelten Berechnungsverfahren gelegt. Die Berechnungszeit für die Verluste in einer Druckplatte aus magnetischem Baustahl, einer Druckplatte aus nichtmagnetischem Stahl (s. Abb. 102) sowie in vier Druckfinger-Konfigurationen für Leerlauf-, Dauerkurzschluss- und Bemessungsbetrieb auf herkömmlicher Laptop-Hardware beträgt nur etwa 1,2s. Anhand einer Parameterstudie und einer Datenanalyse auf Basis eines Datensatzes, bestehend aus 88 gebauten Maschinen, werden kosteneffiziente Maßnahmen zur Reduzierung der Presssystemverluste abgeleitet.

components of the overall field and loss calculation.

An emphasis was placed on the computational speed resulting in a calculation time of around 1.2s to compute losses in a clamping plate made from magnetic structural steel, in one made from non-magnetic steel (see Fig. 102) and in four pressure fingers configurations for open-circuit, short circuit, and rated operation on commodity laptop hardware. A parameter study and data analysis on a dataset containing 88 built machines are used to identify cost-effective measures to reduce compression system losses.

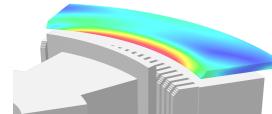


Abb. 102: Druckplattenverluste in einem CAD Modell überlagert.

Fig. 102: Compression system losses overlaid in a CAD model.

Das Institut | The Institute

Nachruf

Prof. Dr. Johannes Nestler

† 1.10.2022 in Berlin

Wir trauern um Prof. Dr.-Ing. Johannes Nestler, geboren am 12. Januar 1935 in Magdeburg, der am 1. Oktober 2022 im Alter von 87 Jahren in Berlin verstarb.

Herr Prof. Nestler war als Professor für Leistungselektronik an der Leibniz Universität Hannover der fachliche Vorgänger von Prof. Mertens.

Nach dem Studium der Elektrotechnik an der TU Berlin von 1957 bis 1964 trat Herr Nestler zunächst bei der AEG in Berlin ein, wo er insgesamt bis 1986 tätig war. Die grundlegenden Beiträge des AEG-Forschungszentrums zur Leistungselektronik, die sich in dieser Zeit stürmisch entwickelt hat, sind weithin anerkannt. In diesem ausgezeichneten Umfeld konnte Herr Nestler fundierte wissenschaftliche Arbeit leisten. Auf Basis seiner daraus entstandenen Dissertationsschrift mit dem Thema „Untersuchungen an einem dreiphasigen parallelkompensierten Schwingkreisumrichter“ wurde er 1975 von der TU Berlin zum Dr.-Ing. promoviert. Bereits 1976 erhielt er einen Ruf als Professor an die TU Berlin, den er aber zunächst ablehnte. Erst 1986 nahm er den Ruf an die Universität Hannover auf die C4-Professur für Leistungselektronik an als Nachfolger von Prof. Clemens Heumann, der an die TU Berlin gewechselt war. Das Fachgebiet war zunächst dem Institut für Grundlagen der Elektrotechnik, Messtechnik und Leistungselektronik (GEML) angegliedert und verfügte über Räumlichkeiten und Labore im Hochhaus der Universität in der Appelstraße. Nach fünf Jahren in dieser Konstellation wurde 1991 das Institut für Leistungselektronik gegründet, dem Herr Prof. Nestler vorstand, wobei der Standort erhalten blieb. Fachlich arbeiteten Herr Prof. Nestler und seine Mitarbeiter an innovativen Themen wie Pulsstromrichtern am Netz und Matrixumrichtern. Zu diesen und anderen Themen entstand auch eine Anzahl von Dissertationen und Veröffentlichungen; unter den von ihm betreuten Doktorarbeiten sind vor allem die Namen Trost, Schütt, Flerlage, Borcherding, Wübbelmann, Cordes, Richter und Lösenbeck zu nennen.

Das Pensionsalter erreichte Herr Nestler im Jahr 2000. Angesichts der Sparzwänge, die der Universität und der Fakultät auferlegt waren, konnte jedoch noch keine Nachfolge berufen werden. Die Lehre

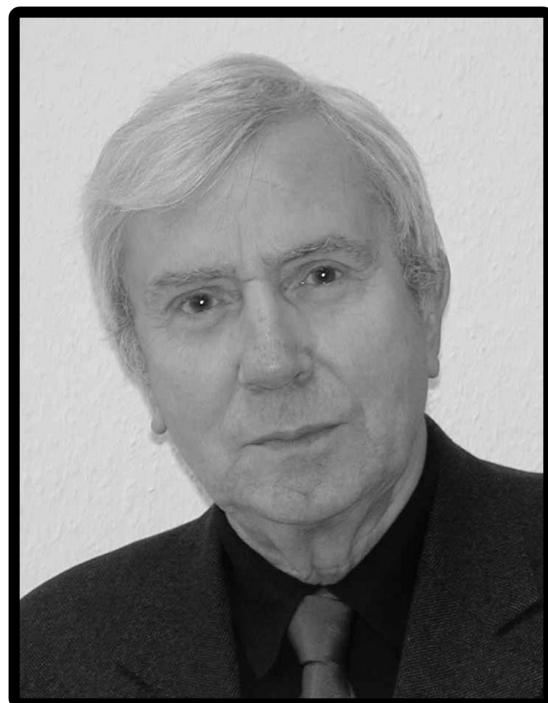
Obituary

Prof. Dr. Johannes Nestler

† 1.10.2022 in Berlin

We mourn the death of Prof. Dr.-Ing. Johannes Nestler, born on 12 January 1935 in Magdeburg, who passed away in Berlin on 1 October 2022 at the age of 87.

Prof. Nestler was Prof. Mertens' predecessor as Professor of Power Electronics at Leibniz University Hannover.



After studying electrical engineering at the Technical University of Berlin from 1957 to 1964, Mr Nestler first joined AEG in Berlin, where he worked until 1986. The fundamental contributions of the AEG research centre to power electronics, which developed at a tumultuous pace during this time, are widely recognised. In this excellent environment, Mr Nestler was able to carry out profound scientific work. Based on his resulting dissertation with the topic "Investigations on a three-phase parallel-compensated oscillating circuit converter", he was awarded a doctorate in engineering from the TU Berlin in 1975. As early as 1976, he was offered a professorship at the TU Berlin, which he initially declined. It was not until 1986 that he accepted the call to the University of Hannover for the C4

im Fachgebiet Leistungselektronik hat Herr Prof. Nestler daher bis zum Wintersemester 2003/2004 aufrechterhalten, d.h. bis zum Amtsantritt von Prof. Mertens.

Kurz nach seiner Pensionierung wurde im Jahr 2001 das IAL gegründet, und zwar in den Räumlichkeiten im Trakt H des Hauptgebäudes der Universität, dem Sitz des ehemaligen Instituts für Elektrische Maschinen und Antriebe sowie des Instituts für Elektrische Energieversorgung. Durch diese weit-sichtige Entscheidung konnten die Fachgebiete für Elektrische Maschinen und für Leistungselektronik unter einem Dach vereint werden und somit eine Voraussetzung für die sehr erfolgreiche Entwicklung des IAL geschaffen werden. Herr Prof. Nestler hat dabei den Umzug seines Fachgebiets in die neuen Räume sowie die vorbereitenden Planungen der Laboreinrichtungen noch persönlich begleitet.

Nach der Übergabe an Prof. Mertens lebte Prof. Nestler in Berlin, wo er stets seinen Lebensmittelpunkt hatte, und war nur noch selten in Hannover. Er widmete sich in dieser Zeit noch der Geschichte der Elektrotechnik; unter anderem organisierte er mit der ETG im VDE eine erfolgreiche Tagung zur Geschichte der Hochspannungs-Gleichstromübertragung.

Wir betrauern den Verlust von Prof. Nestler und werden sein Andenken stets in Ehren halten.

professorship for power electronics as successor to Prof. Clemens Heumann, who had moved to the TU Berlin. The department was initially affiliated with the Institute for Fundamentals of Electrical Engineering, Metrology and Power Electronics (GEML) and had premises and laboratories in the university's high-rise building in Appelstraße. After five years in this configuration, the Institute for Power Electronics was founded in 1991, headed by Prof. Nestler, whereby the location was retained. Prof. Nestler and his colleagues worked on innovative topics such as pulse power converters connected to the grid and matrix converters. A number of dissertations and publications were also written on these and other topics; among the doctoral theses supervised by him, the names Trost, Schütt, Flerlage, Borcherding, Wübbelmann, Cordes, Richter and Lösenbeck are particularly worthy of mention.

Mr Nestler reached retirement age in 2000, but in view of the cost-cutting constraints imposed on the university and the faculty, it was not immediately possible to appoint a successor. Prof. Nestler therefore continued teaching in the Power Electronics Division until the winter semester 2003/2004, i.e., until Prof. Mertens took office.

Shortly after his retirement, the IAL was founded in 2001, in the premises in Tract H of the university's main building, the location of the former Institute for electrical machines and drives and the Institute for electrical power supply. This far-sighted decision made it possible to unite the departments for electrical machines and power electronics under one roof, thus creating a prerequisite for the very successful development of the IAL. Prof. Nestler personally accompanied the move of his department into the new rooms as well as the preparatory planning of the laboratory facilities.

After handing over to Prof. Mertens, Prof. Nestler lived in Berlin, where he always maintained the centre of his life, and was only rarely in Hannover. During this time he still devoted himself to the history of electrical engineering; among other things, he organised a successful conference on the history of high-voltage direct current transmission with the ETG in the VDE.

We mourn the loss of Prof. Nestler and will always honour his memory.

Mitarbeitende des IAL

Auf den folgenden Seiten präsentieren sich die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des IAL, die zum Jahreswechsel 2022/23 zum Team gehörten. Diejenigen, die zu Beginn 2021 noch am IAL waren, aber uns bis zum Ende 2022 bereits verlassen haben, sind separat aufgeführt.

Durch die sehr erfolgreiche Einwerbung von Drittmitteln konnte die Anzahl der wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter auf hohem Niveau nochmals gesteigert werden. Dem entsprechend hatten wir insgesamt 22 Zugänge und 21 Abgänge im Berichtszeitraum.

Neben dem weiter oben im Nachruf erwähnten, traurigen Verlust von Prof. Johannes Nestler sind folgende Änderungen besonders hervorzuheben: Bereits im letzten Bericht war der Wechsel bei der Vorlesung zu elektrischen Bahnen und Fahrzeugantrieben von Dr. Möller zu Dr. Germishuizen angekündigt worden.

Als Neuzugang und als Abgang findet sich Herr Dr. Dennis Kampen, der als Mitarbeiter der Fa. BLOCK Transformatoren zum WS 2021/22 einen Lehrauftrag zum Netzanschluss von Umrichtern erhalten hat, diesen aber wegen seines Wechsels an die Hochschule Bremen nach nur einem Durchgang wieder aufgeben musste. Die Lücke wird ab Wintersemester 2023/24 durch einen neuen Lehrauftrag geschlossen werden.

Auch der Weggang unseres IT-Administrators Hanno Lippert war bereits angekündigt, um sich voll dem Studium zu seinem Wunschberuf Berufsschullehrer zu widmen.

Frau Petra Duensing war dem IAL auch nach ihrer aktiven Zeit im Geschäftszimmer noch lange verbunden, indem sie Übersetzungen und Korrekturen in Englisch für uns vorgenommen hat. Wir bedauern, dass sie sich entschieden hat, Mitte 2021 endgültig die Arbeit für das IAL zu beenden. Als Nachfolger hat Herr Christopher Tidy die Übersetzungs- und Lektoratsarbeiten übernommen.

Wir freuen uns sehr, dass Herr Torsten Winkler nach einem Intermezzo in der Industrie wieder zu uns gefunden hat, um die elektrische Werkstatt tatkräftig zu verstärken. Das kommt gerade rechtzeitig zum Wiedereinzug in das frisch renovierte Gebäude des IAL ab Mai 2023, wozu auch der Wiederaufbau vieler Prüfstände besonders im Kellerlabor gehört.

Zur Vorschau auf 2023 gehört auch, dass sich unsere beiden inzwischen etablierten Junior-Professoren

IAL Staff

The following pages will present the IAL staff members who were part of the team at the turn of the year 2022/23. Those who were still at the IAL at the beginning of 2021 but had already left us by the end of 2022 are listed separately.

Due to the very successful acquisition of third-party funding, the number of scientific staff could be increased again to a very high level. Accordingly, we had a total of 22 new members and 21 outgoing members in the reporting period.

In addition to the loss of Prof. Johannes Nestler, mentioned above in the obituary, the following changes are particularly noteworthy: the change in the lecture on electric railways and vehicle drives from Dr. Möller to Dr. Germishuizen had already been announced in the last report.

A new addition and a departure is Dr. Dennis Kampen, who, as an employee of the company BLOCK Transformatoren, received a teaching assignment on the grid connection of converters for the winter semester 2021/22, but had to give it up again after only one season due to his move to the Bremen University of Applied Sciences. The gap will be filled by a new lecturer from winter semester 2023/24 onwards.

The departure of our IT administrator Hanno Lippert in order to devote himself fully to his studies towards his desired profession of becoming a vocational school teacher had also already been announced.

Mrs Petra Duensing was still associated with the IAL for a long time after her active time in the office doing translations and corrections in English for us. We regret that she has decided to finally end her work for the IAL in mid 2021. Mr Christopher Tidy has taken over the translation and editing work as her successor.

We are very pleased that Mr Torsten Winkler has found his way back to us after an interlude in industry to energetically strengthen the electrical workshop. This comes just in time for the move back into the freshly renovated building of the IAL from May 2023 onwards, which will also include the reassembly of many test benches, especially in the basement laboratory.

The outlook for 2023 also includes the fact that our two well-established junior professors have very successfully applied for permanent positions at other universities after 5 to 6 years at the IAL, as envisaged by the organisational model; each of them

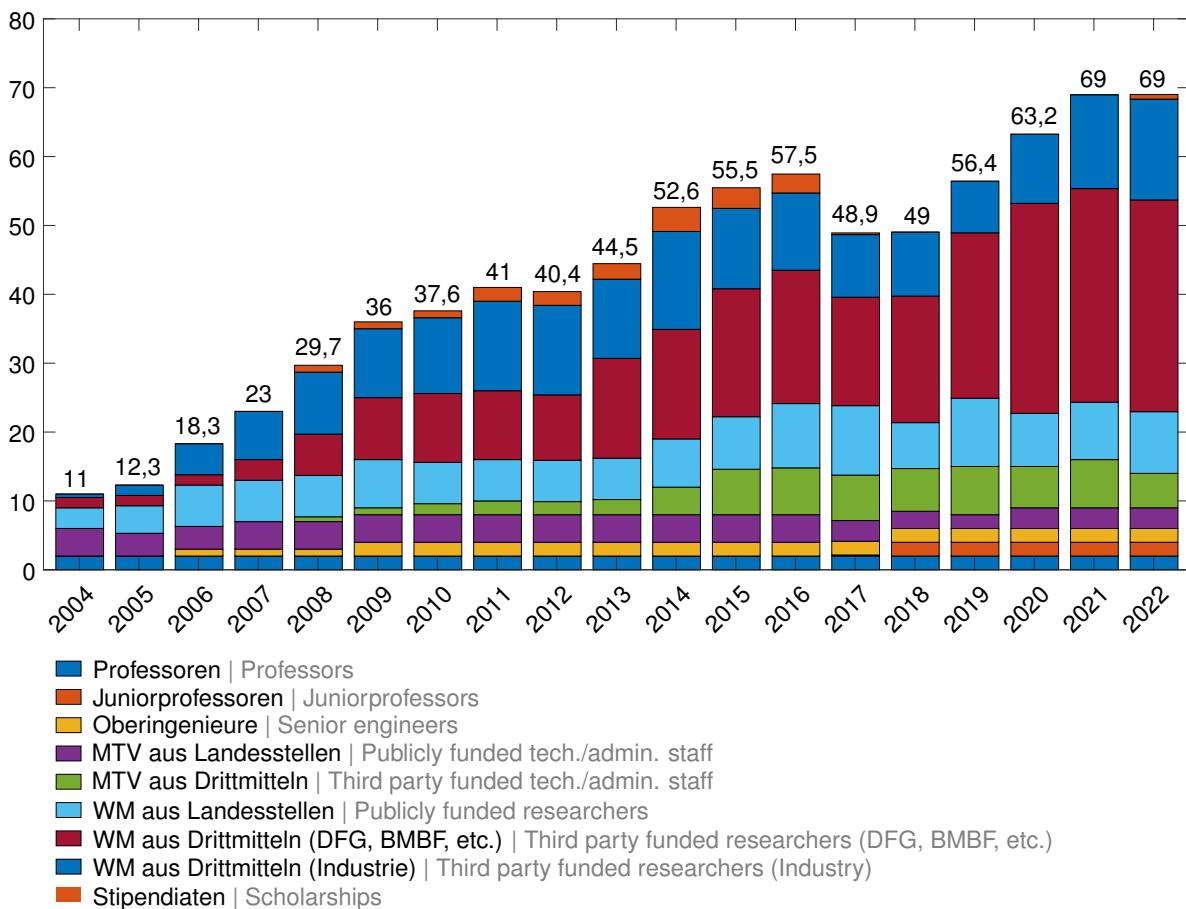
nach 5 bis 6 Jahren am IAL, wie es das Modell vorsieht, sehr erfolgreich auf Dauerstellen an anderen Universitäten beworben haben; jeder von ihnen hat zwei Rufe erhalten, womit sich die hervorragende Leistung der beiden Profs. Ebrahimi und Friebe in Forschung und Lehre eindrucksvoll bestätigt hat – und sich das IAL auch als Durchlauferhitzer für Professorenlaufbahnen bewährt hat. Prof. Friebe tritt zum 1. März 2023 seine W3-Professur in Kassel an, die zunächst als Heisenberg-Professur von der DFG finanziert wird, bevor er die Nachfolge von Prof. Zacharias übernimmt. Prof. Ebrahimi wechselt zum 1. Juli 2023 an die Universität Bremen als Nachfolger von Prof. Orlík.

An dieser Stelle sagen wir allen ehemaligen und aktuellen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern ein herzlichstes Dankeschön für ihre langjährige Mitwirkung und die hohe Professionalität und Sichtbarkeit, die wir auf allen Ebenen erreicht haben.

has received two calls, thus confirming the excellent performance of Profs. Ebrahimi and Friebe in research and teaching – and the IAL has also proved itself as a springboard for professors' careers. Prof. Friebe will take up his W3 professorship in Kassel on 1 March 2023, initially funded by the DFG as a Heisenberg professorship, before succeeding Prof. Zacharias. Prof. Ebrahimi will move to the University of Bremen on 1 July 2023 to succeed Prof. Orlík.

We would like to take this opportunity to say a heartfelt thank you to all former and current staff members for their many years of involvement and the high level of professionalism and visibility we have achieved on all levels.

Mitarbeitendenstatistik | Numbers of Employees



Prof. Dr.-Ing. Axel Mertens

Welfengarten 1
30167 Hannover, Germany

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



Curriculum Vitae

- 1982 to 1987 Studies and graduation (Dipl.-Ing.) in Electrical Engineering, RWTH Aachen, Germany
- 1987 to 1992 Research associate at the Institute for Power Electronics and Electric Drives (ISEA) at RWTH Aachen
- 1989 Herbert Kind Award of the ETG (VDE)
- 1989 to 1990 Research associate at the University of Wisconsin at Madison, USA
- 1992 Doctor in Electrical Engineering at RWTH Aachen
- 1992 IEEE IAS IPCC 2nd Prize Paper Award, 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 of DFG Review Board 408 Electrical Engineering and Information Technology
- 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
- Member of the Executive Council and the International Scientific Committee of the EPE Association
- Associate Editor of the journal "IEEE Transactions on Power Electronics" (until 2021)
- 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 Hannover, Germany

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



Curriculum Vitae

- 1984 to 1990 Studies and graduation (Dipl.-Ing.) in Electrical Engineering/Power Engineering, University of Hannover, Germany
- 1986 Philips Award
- 1990 to 1994 Research associate at the Institute for Electrical Machines and Drives at the University of Hannover
- 1994 Doctor in Electrical Engineering at the University of Hannover
- 1995 to 2003 Design engineer for large variable speed motors at Siemens Dynamowerk Berlin, Head of the Electrical Design and Offer Processing Department, Technical Director
- 2003 Appointed full professor for Drive Systems at the University of Hannover
- 2017 IEC 1906 Award
- 2022 Faculty Award for Excellence in Teaching

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 Hannover, 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
- Additive manufacturing of electrical machines
- Wearable robotic and actively powered exoskeletons for industrial and medical applications
- Acquisition of over 5 Mio € third-party funds per year, approx. 0.5 Mio € per year for the own research group
- 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
- Founder and Academic director of Etech-Akademie GmbH
- 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

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

Welfengarten 1
30167 Hannover, Germany

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



Curriculum Vitae

- 2004 to 2007 Vocational training as Electronics Technician for Industrial Engineering at SMA Solar Technology AG
- 2004 to 2009 Study of Electrical Engineering at the University of Kassel in an integrated degree program in association with SMA Solar Technology AG. 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
Wasserkräftigeneratoren
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. Störling



Prof. i.R. Dr.-Ing. (†)
Johannes Nestler

Gastdozenten | External Lecturers



Dr.-Ing.
Boris Dotz



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



Dr.-Ing.
Jaques Germishuizen

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 Britz



Dipl.-Ing. (FH)
Clemens Larivi  re



Fachinformatiker
Spiridon Lomis



Industriemeister
Sebastian Rudolph



Industriemeister
Carsten Selke



Industriemeister Elektrotechnik
Torsten Winkler

Wissenschaftliches Mitarbeitendenteam | Team of Research Associates



M.Sc.
Pramod Apte



M.Sc.
Ali Bashabsheh



M.Sc.
Christian Beckemeier



M.Sc.
Cara-Nastasia Behrendt



M.Sc.
Maximilian Bieber



M.Sc.
Norman Blanken



M.Sc.
Maximilian Bleicher



M.Sc.
Tobias Brinker



M.Sc.
Yongtao Cao



M.Sc.
Allan de Barros



M.Sc.
Jochen Dittmann



M.Sc.
Janine Ebersberger



M.Sc.
Marc England



M.Sc.
Leander Eschenmann



M.Sc.
Leon Fauth



M.Sc.
Sören Fröhling



M.Sc.
Martin Gerlach



M.Sc.
Maximilian Hagedorn



M.Sc.
Daniel Heide



M.Sc.
Jonas Henkenjohann



M.Sc.
Niklas Himker



M.Sc.
Rebecca Himker



M.Sc.
Max Hullmann



M.Sc.
Pauline Höltje



M.Sc.
Lennart Jünemann



M.Sc.
Matthias Kalla



M.Sc.
Ralf Keuter



M.Sc.
Dennis Kifel



M.Sc.
Benedikt Rafael Kostka



M.Sc.
Eike Christian Krüger



M.Sc.
Marcel Krüppelmann



M.Sc.
Jan Niclas Laumann



M.Sc.
Przemyslaw Lesniewski



M.Sc.
Tiancheng Li



M.Sc.
Siqi Lin



M.Sc.
Malte Lorenz



M.Sc.
Tobias Manthey



M.Sc.
Marius Meiswinkel



M.Sc.
Mina Mirzadeh



M.Sc.
Christian Nörenberg



M.Sc.
Dominik Reitmeier



M.Sc.
Andreas Ridder



M.Sc.
Constantin Scheppe



M.Sc.
Tobias Scholl



M.Sc.
Marius Schubert



M.Sc.
Frederik Stallmann



M.Sc.
Robin Strunk



M.Sc.
David Tatusch



M.Sc.
Johannes C. Wenzel



M.Eng.
Julius Wiesemann



M.Sc.
Viktor Willich



M.Sc.
Niklas Witzel



M.Sc.
Dapu Zhang



M.Sc.
Xi Zhu

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



M.Sc.
Mohammad Ali



Dr.-Ing.
Jan Andresen



M.Sc.
Bakr Bagaber



M.Sc.
Björn Berweiler



M.Sc.
Marc Dokus



Dr.-Ing.
Torben Fricke



Industriemeister ET
Jörg-Uwe Hammer



Dr.-Ing.
Elmar Haschen



M.Sc.
Daniel Herwig



M.Sc.
Alexander Hoffmann



Dr.-Ing.
Dennis Kampen



M.Sc.
Denis Kim



M.Sc.
Benjamin Knebusch



M.Sc.
Jan Königsberg



M.Sc.
Georg Lindemann



Fachinformatiker
Hanno Lippert



Dr.-Ing.
Hedieh Movagharnejad



Dr.-Ing.
Georg Möller



Dr.-Ing.
Jan-Ole Stockbrügger



M.Sc.
Anton Suchan



Dr.-Ing.
Stefan Urbanek



M.Sc.
Yugandhara Wankhede

Chronik 2021/22

Chronicle 2021/22

2021

Januar 2021

- 01.01.** Dennis Kifel beginnt als Assistent am IAL.
07.-10.01. Teambildungs-/Strategieworkshop in Marianska (Erzgebirge) FÄLLT AUS :-)



- 27.01.** Doktorprüfung von Silvia Zulk
29.01. Doktorprüfung von Stephan-Akash Vip
31.01. Letzter Arbeitstag von Stefan Urbanek und Yugandhara Wankhede

Februar 2021

- 01.02.** Andreas Ridder beginnt als Assistent und der Elektroniker Torsten Winkler kehrt zurück ans IAL.
14.02. Letzter Arbeitstag von Björn Berweiler
15.02. Niklas Witzel beginnt als Assistent am IAL.
18.02. Doktorprüfung von Alexander Rosen
28.02. Letzter Arbeitstag von Jan Andresen

März 2021

- 01.03.** Tobias Manthey beginnt als Assistent am IAL.
31.03. Letzter Arbeitstag von Elmar Haschen

April 2021

- 01.04.** Cara-Nastasia Behrendt beginnt als Assistentin am IAL.
01.04. PhD. Eng Johannes Jacobus Germishuizen wird externer Lehrbeauftragter am IAL.
08.-09.04. Online-Teilnahme und Beitrag von Dennis Kifel an der IEEE WEMDCD 2021, Italien.

15.04. Christian Beckemeier beginnt als Assistent am IAL.

Mai 2021

- 01.05.** Maximilian Hagedorn beginnt als Assistent am IAL.
06.05. Doktorprüfung von Constantin Wohlers

07.05. Christian Nörenberg erhält den Studienpreis der SEW-EURODRIVE-Stiftung im Rahmen der virtuellen Ernst-Blickle-Vorlesung.

15.05. Viktor Willich beginnt als Assistent am IAL.

25.-28.05. Johannes Wenzel hält einen Vortrag bei der WESC Hannover (virtuell).

31.05. Letzter Arbeitstag von Jan Königsberg

Juni 2021

- 01.06.** Norman Blanken beginnt als Assistent am IAL.
10.06. Das RMI (Dr. Robert-Meyer-Institut) im Dauereinsatz.



30.06. Dr. Jakub Kučka erhält für seine Arbeiten am IAL den Semikron Young Engineer Award 2021 im Rahmen des ECPE Annual Events in Erding bei München.



30.06. Letzter Arbeitstag von Hanno Lippert

Juli 2021

01.07. Leander Eschenmann beginnt als Assistent am IAL.

19.07. Doktorprüfung von Stefan Urbanek

27.07. Doktorprüfung von Jan Ole Stockbrügger

29.07. Betriebsausflug mit Kanutour von Laatzen nach Limmer

August 2021

31.08. Die langjährige, erfolgreiche Zusammenarbeit mit der Dipl. Fachübersetzerin Petra Duensing endet und Christopher Tidy übernimmt die Fachübersetzungen.

31.08.-03.09. Allan de Barros, Marc England und Martin Gerlach nehmen in Wien an der Fachtagung für elektrische Antriebe mOre Drive teil.

September 2021

01.09. Start der umfangreichen Umbaumaßnahmen zur Erweiterung des IAL

06.-12.09. EPE 2021 in Ghent (virtuell) mit Teilnahme von Mohammad Ali und Hedieh Movagharnejad

20.09. Doktorprüfung von Francesco Quattrone

22.-23.09. Institutsworkshop in Wöltingerode



28.09. IAL-Betriebsausflugsgrillen

Oktober 2021

01.10. Tobias Scholl (Schütte) beginnt als Assistent am IAL.

01.10. Dr. Dennis Kampen wird externer Lehrbeauftragter am IAL.

10.-14.10. Konferenz ECCE, USA, virtuell Teilnahme von Tobias Manthey

13.10. Doktorprüfung von Tim Buchali

18.10. Doktorprüfung von Jan Andresen

31.10. Letzter Arbeitstag von Jörg-Uwe Hammer

November 2021

03.11. Boßeln des IAL in der Eilenriede

25.11. IAL-Weihnachtsmarkt im Eichenwäldchen vor dem Institut für die Studierenden und Mitarbeiter

30.11.-17.12. Montié Alves Vitorino aus Brasilien besucht das IAL zu einem drei-wöchigen wissenschaftlichen Austausch.

Dezember 2021

01.12. Marcel Krümpelmann beginnt als Assistent am IAL.

10.12. Adventswanderung durch den Georgengarten bis zum südlichsten IAL-Außenposten Lange Laube 6



15.12. Przemyslaw Lesniewski beginnt als Assistent am IAL.

16.12. Gastvortrag von Prof. Alves Vitorino

2022

Januar 2022

01.01. Denis Kim beginnt als Assistent am IAL.

13.-16.01. Teambildungs-/Strategieworkshop in Marianska (Erzgebirge)

Februar 2022

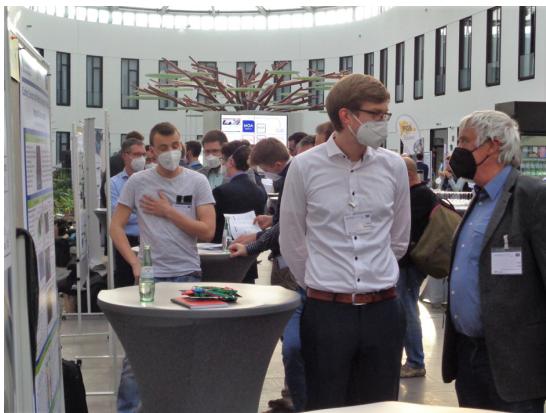
10.02. Doktorprüfung von Elmar Haschen

28.02. Letzter Arbeitstag von Dr. Jan Ole Stockbrügger

März 2022

14.03. Letzter Arbeitstag von Daniel Herwig

15.-17.03. CIPS in Berlin mit Tobias Manthey



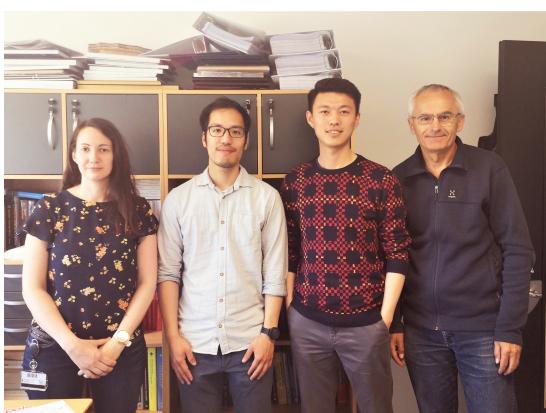
28.03.-01.04. Retreat mit Yongtao Cao, Janine Ebersberger, Leon Fauth, Yannik Freund und Ralf Keuter in Zandvoort, Niederlande, zur 2022 AIAA IEEE EATS Student Design Competition mit dem Gewinn des 2. Platzes.



April 2022

01.04. Maximilian Bleicher beginnt als Assistent am IAL.

15.04.-30.06. Yongtao Cao beginnt seinen Gastaufenthalt an der Universität Aalborg, Dänemark.



15.04.-15.07. Lennart Jünemann startet zum 3-monatigen Aufenthalt bei Prof. Bulent Sarlioglu am WEMPEC, University of Wisconsin, Madison, USA.



22.04. Doktorprüfung von Stefan Lücke

29.04. Nachgeholttes Internationales Jahresabschlusskolloquium 2021 im Janel-Saal in Hannover

Mai 2022

12.05. Exkursion nach Nürnberg zu PCIM (Tobias Brinker)

23.-25.05. Das Großereignis kündigt sich an - Besuch vom EPE-Team aus Brüssel.

31.05. Letzter Arbeitstag von Alexander Hoffmann

31.05.-01.06. Teilnahme von Norman Blanken und Ralf Keuter am Electric & Hybrid Aerospace Technology Symposium in Frankfurt

Juni 2022

04.-06.06. Prof. Mertens nimmt am IEEE PECS Workshop Future of "Electronic Power Processing and Conversion" FEPPCON XI in Reykjavík, Island, teil.

09.06. Exkursion zur Firma Siemens Mobility nach Nürnberg im Rahmen der Vorlesung „Elektrische Bahnen und Fahrzeugantriebe“



15.06. Das IAL ist auf dem Hochschulsportfest wieder mit einer Volleyball- und einer Fußballmannschaft vertreten.



15.06.-14.09. Für Mina Mirzadeh und Julius Wiesemann beginnt der 3-monatige Aufenthalt bei Prof. Bulent Sarlioglu am WEMPEC, University of Wisconsin, Madison, USA.



16.06. Doktorprüfung von Hedieh Movagharnejad

21.-24.06. Cara Behrendt und Martin Gerlach halten Vorträge auf der Speedam in Sorrento, Italien.

23.06. Prof. Mertens hält einen Vortrag auf dem German-Korean Symposium on Power Electronics in Aachen.

25.06.-23.09. Dr. Udochukwu Bola Akuru von der Tshwane University of Technology, Pretoria Campus, Südafrika, ist für drei Monate im Rahmen des TWAS-DFG Cooperation Visit Programms als Gastwissenschaftler am IAL tätig.

26.-29.06. Teilnahme an der PEDG in Kiel von Robin Strunk und Mina Mirzadeh (virtuell)

30.06. Letzter Arbeitstag von Marc Dokus

Juli 2022

01.-15.07. Jun.-Prof. Amir Ebrahimi nimmt als Vortragender an der Sommer School an der Norwegian University of Science and Technology in Trondheim, Norwegen, teil.

01.07. Kamingespräche mit Dr. Eva Bresemann, Dr. Michael Dörbaum, Michael Gröniger, Dr. Niklas Weber, Dr. Constantin Wohlers und Dr. Volker Schöber

05.07. Doktorprüfung von Stefan Udemra

07.07. Hiwi-Grillen

13.07. Exkursion zu Fa. Infineon nach Warstein im Rahmen der Vorlesung "Leistungshalbleiter und Ansteuerungen" (Benedikt Kostka)

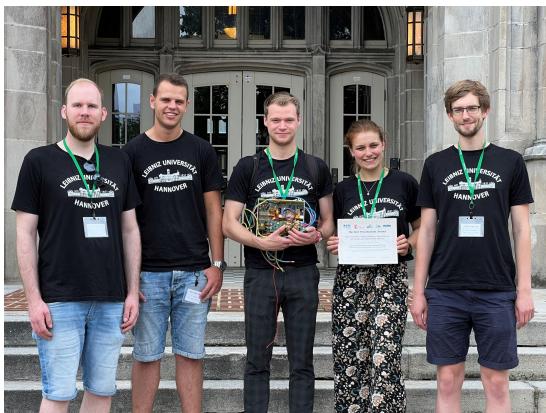
18.07. Exkursion zum Pumpspeicherwerk nach Erzhausen im Rahmen der Vorlesung "Wasserkraftgeneratoren" (Andreas Ridder)



21.07. Besuch von Herrn Alexander Wich von Volkswagen im IAL

22.07. Kamingespräche mit Dr. Marcus Alexander, Dr. Dirk Braunisch, Dr. Jan Harger, Dr. Johannes Heseding, Dr. Sebastian Tegeler und Prof. Hans-Dieter Stöltzing

29.07. Beim IEEE IFEC22 an der University of Tennessee in Knoxville, USA, erreicht das Team von Jun.-Prof. Jens Friebe mit Tobias Brinker, Marie Hanemann, Lennart Hoffmann, Tobias Manthey, Tilo Teichert, Luka Zimmermann beim "Best Presentation Award" den 4. Platz



August 2022

01.08. Marius Meiswinkel beginnt als Assistent am IAL.

04.08. Betriebsausflug in die Wedemark mit Lasertag, Seevergnügen und Grillabend bei Prof. Mertens

September 2022

01.09. Start des großen EU-Projekts EMBYAM unter Koordination von Jun.-Prof. Amir Ebrahimi

05.-08.09. Norman Blanken, Allan de Barros, Cara Behrendt, Martin Gerlach, Max Hullmann, Marius Schubert und Anton Suchan nehmen mit Vorträgen und Postern an der ICEM in Valencia, Spanien, teil.



05.-09.09. EP '22 ECCE EUROPE: Über 800 Leistungselektroniker aus der ganzen Welt treffen sich zur EPE 2022 im HCC in Hannover, Chairman ist Prof. Mertens. Organisator ist das IAL mit knapp 40 Ausstellern und 30 Papers aus dem IAL.

30.09. Dr. Dennis Kampen beendet seine Lehrtätigkeit am IAL.

30.09. Letzter Arbeitstag von Mohammad Ali, Bakr Bagaber und Anton Suchan.

Oktober 2022

01.10. Li Tiancheng und Ali Bashabsheh beginnen als Assistenten am IAL.

01.10. Eike Krüger und Jan Niclas Lauman beginnen als Assistenten am IAL.

07.10. Doktorprüfung von Torben Fricke

14.10. Letzter Arbeitstag von Dr. Torben Fricke

14.10. Jan Andresen wird mit dem Förderpreis der Victor-Rizkallah-Stiftung und der Stiftung NiedersachsenMetall ausgezeichnet.



31.10. Letzter Arbeitstag von Dr. Hedieh Movaghanejad

November 2022

04.11. Kamingespräche mit Prof. Dr. Holger Borcherding, Dr. Stephan Cordes und Dr. Björn Hagemann

17.-18.11. FEMAG-Anwendertreffen in Kassel

21.-22.11. Dominik Reitmeier, Lennart Jünemann und Martin Gerlach nehmen mit Vorträgen an der E-MOTIVE by FVA in Wolfsburg teil.



22.11. IAL-Weihnachtsmarkt im Eichenwäldchen vor dem Institut für die Studierenden und Mitarbeiter*innen

29.11.-02.12. Teilnahme an der ICEMS in Chang Mai, Thailand, von Jochen Dittmann, Marc England, Martin Gerlach, Matthias Kalla, Ralf Keuter und Anton Suchan



09.12. Internationales Jahresabschlusskolloquium wieder im Leibnizhaus mit den IAL-Bands 2.0 und 3.0



31.12. Letzter Arbeitstag von Denis Kim, Benjamin Knebusch und Georg Lindemann.

Dezember 2022

02.12. Prof. Ponick wird für sein außerordentliches Engagement und herausragende und vorbildliche Lehr- und Lernformen mit dem Apfel-Preis für exzellente Lehre beim Tag der Fakultät geehrt.



Veröffentlichungen 2021/22

Publications 2021/22

Aufsätze in Fachzeitschriften 2021

Journal Articles 2021

De Barros, A.; Galai, A.; Ebrahimi, A.; Schwarz, B.

Practical Modal Analysis of a Prototyped Hydrogenerator

Vibration 2021, 4, pp. 853-864

Denkena, B.; Bergmann, B.; Böhse, F.; Königsberg, J.; Ponick, B.

Auf dem Weg zur autonomen Werkzeugmaschine - mechatronische Dämpfungssysteme als Befähiger antriebstechnik, 01-02 Februar 2021, pp. 38-43

Dokus, M.; Mertens, A.

On the Coupling of Power-Related and Inner Inverter Control Loops of Grid-Forming Converter Systems

IEEE Access Journal, 10.1109/ACCESS.2021.3053060

Ebrahimi, A.

A Contribution to the Theory of Rotating Electrical Machines

IEEE Access Journal

England, M.; Ponick, B.

Einfluss der Rotorgeometrie auf Schwingungs- und Geräuschemissionen elektrischer Fahrzeugantriebe

e & i Elektrotechnik & Informationstechnik, Band 138, Ausgabe 6, pp. 371-382

Fricke, T.; Schwarz, B.; Ponick, B.

A Fast Calculation Approach for Pressure Finger Losses in Large Salient-Pole Synchronous Machines

IEEE Transactions on Magnetics, TBA, pp. TBA

Gerlach, M.; Zajonc, B.; Ponick, B.

Mechanical Stress and Deformation in the Rotors of a High-Speed PMSM and IM

e & i Elektrotechnik und Informationstechnik, 10.1007/s00502-021-00866-5, Band 138, Ausgabe 2, pp. 96-109

Gerlach, M.; Zajonc, B.; Ponick, B.

Methodology to Evaluate the Mechanical Stress in High Speed Electric Machines with Buried Magnets

IEEE Transactions on Industry Applications, Band 57, Ausgabe 4 (4.5.2021), pp. 3643-3653

Himker, N.; Lindemann, G.; Wiedmann, K.; Weber, B.; Mertens, A.

A Family of Adaptive Position Estimators for PMSM Using the Gradient Descent Method

IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics

Kostka, B.; Herwig, D.; Hanf, M.; Zorn, C.; Mertens, A.

A Concept for Detection of Humidity Driven Degradation of IGBT Modules

IEEE Transactions on Power Electronics, Volume 36, Issue: 12 Dec. 2021, pp. 13355-13359

Nejad, A. R.; Keller, J.; Guo, Y.; Sheng, S.; Polinder, H.; Watson, S.; Dong, J.; Qin, Z.; Ebrahimi, A.; Scheilenz, R.; Guzmán, F. G.; Cornel, D.; Golafshan, R.; Jacobs, G.; Blockmans, B.; Bosmans, J.; Pluymers, B.; Carroll, J.; Koukoura, S.; Hart, E.; McDonald, A.; Natarajan, A.; Torsvik, J.; Moghadam, F. K.; Daems, P.-J.; Verstraeten, T.; Peeters, C.; Helsen, J.

Wind turbine drivetrains: state-of-the-art technologies and future development trends

Wind Energy Science

Steffen, J.; Lengsfeld, S.; Jung, M.; Ponick, B.; Herranz Garcia, M.; Spagnolo, A.; Klöpzig, M.; Schleicher, K.; Schäfer, K.

Design of a Medium Voltage Generator with DC-Cascade for High Power Wind Energy Conversion Systems

Energies 2021, 14(11), 3106; <https://doi.org/10.3390/en14113106> - 26 May 2021

Stockbrügger, J.O.; Hoffmann, A.; Knebusch, B.; Dittmann, J.; Ponick, B.

Analytische Ermittlung der Leiter-Leiter-Kapazität von Zweischichtwicklungen unter Berücksichtigung des Zwischenschiebers zur Vorausberechnung der Potenzialverteilung in der Ständerwicklung umrichtergespeister elektrischer Maschinen

e & i Elektrotechnik und Informationstechnik, Band 138, Ausgabe 2, pp. 117-124

Konferenzbeiträge 2021

Conference Articles 2021

Ali, M.; Friebe, J.; Mertens, A.

Design and Optimization of Input and Output EMI Filters under the Influence of Parasitic Couplings

EPE'21 ECCE Europe (virtuell) 06.-10.09.2021

Ali, M.; Friebe, J.; Mertens, A.

3-D Electromagnetic Modeling and Analysis of Electromagnetic Field Couplings of EMI Filter Capacitors

ECCE Asia 2021

Ali, M.; Brinker, T.; Friebe, J.; Mertens, A.

Analysis of EMI Filter Attenuation under the Influence of Parasitic Elements of Components and their Mutual Couplings

EPE'21 ECCE Europe (virtuell) 06.-10.09.2021

Apte, P.; Lin, S.; Fraeger, L.; Friebe, J.

Design Considerations for a 50 kW Dual Bridge Series Resonant DC/DC Converter with Wide-Input Voltage Range for Solid-State Transformers

ECCE USA 2021, Vancouver, Canada (virtuell), 10.-14.10.2021

Bagaber, B.; Mertens, A.

A Parallel Voltage Source Converter and Diode Rectifier PMSM Drive Concept for Decoupling the Thermal Cycles in the Machine-Side Converter of an Airborne Wind Energy Generator

EPE'21 ECCE Europe (virtuell) 06.-10.09.2021

Bagaber, B.; Mertens, A.

Fault Ride-Through Performance of Pumping-Cycle Airborne Wind Energy Generators with the Support of Optimally Sized Energy Storage System

ECCE Asia 2021 (Virtual), Singapore, 24-27.05.2021

Brinker, T.; Gehl, A.; Priefer, F.; Graue, J.; Sawang, F.; Wicht, B.; Friebe, J.

Design of a Photovoltaic Power Supply for Nanosatellites

PCIM Europe digital days 2021, 03.– 07.05.2021, pp. 1317-1324

Brinker, T.; Hoffmann, L.; Friebe, J.

Comparison of Modulation Techniques for a Single-Phase Full-Bridge Photovoltaic Micro-Inverter Considering Reactive Power Capability

ECCE USA 2021, Vancouver, Canada (virtuell), 10.-14.10.2021, pp. pp. 1-8

Cao, Y.; Fauth, L.; Mertens, A.; Friebe, J.

Comparison and Analysis of Multi-State Reliability of Fault-Tolerant Inverter Topologies for the Electric Aircraft Propulsion System

24th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS 2021), Gyeongju, Korea, 02.11.2021

Dierks, R.; Mertens A.

Validation of an Extended Loss-Optimised Branch Energy Control for Modular Multilevel Converters under Unbalanced Grid Conditions

IECON 2021, Toronto, Canada (virtuell), 13.-16.10.2021

Ehlert, M.; Kalla, M. ; Michael, J.; Henke,C.; Traechtler, A.; Bagaber, B.; Ponick,B.; Dornaus, M. ; Demeisi, M.

Tool-Independent Simulation of Electric Drive Systems with the E-Workbench
E-MOTIVE Expert Forum (virtuell) 21.-23.09.2021

Ehlert, M.; Michael, J.; Henke,C.; Traechtler, A.; Kalla, M.; Bagaber, B.; Ponick, B.; Mertens, A.
Connecting Energy Storages from Tool Independent, Signal-flow Oriented FMUs
SMACD / PRIME 2021 | 19.-22.07.2021, Online Event

England, M.; Dotz, B.; Ponick, B.

Evaluation of Winding Symmetry and Circulating Currents of Hairpin Windings
IEMDC 2021, (Virtual) Connecticut, USA, 17.-20.05.2021

Fauth, L.; Beckemeier, C.; Friebe, J.

A Hybrid Active Neutral Point Clamped Converter consisting of Si IGBTs and GaN HEMTs for Auxiliary Systems of Electric Aircraft
ECCE USA 2021, Vancouver, Canada (virtuell), 10.-14.10.2021

Fauth, L.; Mand, P.; Friebe, J.

Selection of Test Site Locations for Long-Term Cosmic Radiation Tests
PCIM Europe digital days 2021, 03.– 07.05.2021, pp. 778-782

Fräger, L.; Ibrahim, M.; Langfermann, S.; Owzareck, M.; Friebe, J.

AFE: Control Strategies under Unbalanced Grid Conditions
PCIM Europe digital days 2021, 03.– 07.05.2021

Fröhling, S; Herwig, D; Mertens A.

Contact-integrated temperature measurement for power modules
EPE'21 ECCE Europe (virtual) 06.-10.09.2021

Hayes, J. G.; Cao, Y.; Yuan, X.; Suda, J. L.; Yang, X.; Friebe, J.; Ogashawara, O.; Renie, J. P.; Goodarzi, G.A.

Global Perspectives on Electric Vehicle Education: Part I
EESD 2021 - Building Flourishing Communities, University College Cork, Ireland

Hayes, J. G.; Cao, Y.; Yuan, X.; Suda, J. L.; Yang, X.; Friebe, J.; Ogashawara, O.; Renie, J. P.; Goodarzi, G.A.

Global Perspectives on Electric Vehicle Education: Part II
EESD 2021 - Building Flourishing Communities, University College Cork, Ireland

Heide, D.; Knebusch, B.; Ebrahimi, A.; Ponick, B.

Measurement of Parasitic High-Frequency Currents in Inverter-Fed Low-Speed Electrical Machines Using Rogowski Current Sensor
EPE'21 ECCE Europe (virtual) 06.-10.09.2021

Hoffmann, A.; Knebusch, B.; Stockbrügger, J.O.; Dittmann, J.; Ponick, B.

High-Frequency Analysis of Electrical Machines Using Probability Density Functions for an Automated Conductor Placement of Random-Wound Windings
IEMDC 2021, Connecticut, USA, 17.-20.05.2021

Kifel, D.; Urbanek, S.; Ponick, B.

Design Study on Additive Manufacturing Technologies in Permanent Magnet Synchronous Machines for Electric Aircraft
WEMDCD 2021 (virtuell), Modena, Italy, 08.-09.04.2021, pp. 325-330

Lin, S.; Ebrahimi, A.; Friebe, J.

Impact of Electric Field on Magnetic Flux Distribution in Electrical Machines with Very Large Size
ECCE USA 2021, Vancouver, Canada (virtuell), 10.-14.10.2021

Lorenz, M.; Kucka, J.; Mertens, A.

A Modular Multilevel Converter with a Clamping Switch for Quasi-Three-Level Operation
2021 22nd IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), pp. pp. 260-265

Manthey, T.; Brinker, T.; Friebe, J.

Design of an Isolated DC-DC Converter for PV Micro-Inverters with Planar Transformer and PCB Integrated Winding
ECCE USA 2021, Vancouver, Canada (virtuell), 10.-14.10.2021, pp. pp. 554-560

Movagharnejad, H.; Knebusch, B.; Mertens, A.; Ponick, B.

Traction Drives with SiC Inverters: Optimized Modelling and Design / Electrical Machines and Filter Configurations
E-MOTIVE Expert Forum (virtual) 21.-23.09.2021

Movagharnejad, H.; Mertens, A.

Design Methodology for Dimensioning EMI Filters for Traction Drives with SiC Inverters
EPE'21 ECCE Europe (virtual) 06.-10.09.2021

Roche, J-P.; Friebe, J.; Niggemann, O.

Neural Network Modeling of Nonlinear Filters for EMC Simulation in Discrete Time Domain
IECON 2021 – 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society

Souza, L.; Acevedo-Bueno, D.; Vitorino, M.; da Silva, E.; Friebe, J.; Lima, A.

Single-Stage Isolated Half-Bridge/Full-Bridge Converter for DC/AC Applications
ECCE USA 2021, Vancouver, Canada (virtuell), 10.-14.10.2021

Stallmann, F.; Mertens, A.

Stability Assessment of Pw and PV Droop Controls in Highly Resistive Microgrids using Analytical Impedance Models
PEDG 2021, Virtual Conference J28.06.-01.07.2021

Strunk, R.; Sarstedt, M.; Mertens, A.

Voltage Sensitivity Estimation Based on Measurements of Distributed PV Inverters
PEDG 2021, Virtual Conference 28.06.-01.07.2021

Tatusch, D.; Gorodnichev, A.; Haake, D.; Schnabel, F.; Friebe, J.; Jung, M.

Hardware and Control Design Considerations for a Mobile 1 MW Input-Series Output-Parallel (ISOP) DC-DC Converter in Medium Voltage Range
ECCE USA 2021, Vancouver, Canada (virtuell), 10.-14.10.2021

Urbanek, S.; Frey, P.; Magerkohl, S.; Zimmer, D.; Tasche, L.; Schaper, M.; Ponick, B.

Design and Experimental Investigation of an Additively Manufactured PMSM Rotor
IEMDC 2021, (virtuell) Connecticut, USA, 17.-20.05.2021

Wiesemann, J.; Mertens, A.

An Isolated Variable-Resistance Active Gate Driver for Use in SiC-Driven Inverters
IECON 2021, Toronto, Canada (virtuell), 13.-16.10.2021

Buchbeiträge 2021

Books 2021

Andresen, J.

Aktive Geräuschunterdrückung in einer permanentmagneterregten Synchronmaschine mit Hilfe von Stromober-schwingungen
Dissertation, TEWISS Verlag ISBN 978-3-95900-639-2

Buchali, T.

Electric Five-Phase Actuators in Steering Systems for Autonomous Driving

Dissertation, Shaker Verlag ISBN 978-3-8440-8314-9, Mahle Schriftenreihe

Müller, J.-K.

Untersuchungen zu Ausgangsfiltern in Siliziumcarbid-Antriebswechselrichtern

Dissertation, TEWISS Verlag ISBN 978-3-95900-525-8

Quattrone, F.

Elektromagnetische Gestaltung permanentmagneterregter Synchronmaschinen für den geberlos geregelten Betrieb im gesamten Drehzahlbereich

Dissertation, TEWISS Verlag ISBN 978-3-95900-655-2

Rosen, A.

Modellierung und Regelung fehlertoleranter Antriebe mit permanentmagneterregten Synchronmaschinen für Elektrofahrzeuge

Dissertation, TEWISS Verlag ISBN 978-3-95900-571-5

Stockbrügger, J. O.

Analytische Bestimmung parasitärer Kapazitäten in elektrischen Maschinen

Dissertation, Repozitorium der LUH, OnlineRess: DOI: <https://doi.org/10.15488/11154>

Urbanek, S.

Gestaltung von Rotoren permanentmagneterregter Synchronmaschinen für die metalladditive Fertigung

Dissertation, TEWISS Verlag ISBN 978-3-95900-618-7

Vip, S.-A.

Zeiteffiziente Berechnung der Magnetgeräusche drehzahlvariabler elektrischer Maschinen

Dissertation, TEWISS Verlag ISBN 978-3-95900-534-0

Wohlers, C.

Permanenterregte Synchronmaschinen hoher Drehmomentdichte

Dissertation, TEWISS Verlag ISBN 978-3-95900-587-6

Zulk, S.

Optimierung eines einphasigen PFC-Gleichrichters mit Wide-Bandgap-Leistungshalbleitern auf Basis domänenübergreifender Modelle

Dissertation, Repozitorium der LUH, OnlineRess: DOI: <https://doi.org/10.15488/10513>

Sonstige Publikationen 2021

Other Publications 2021

Denkena, B.; Teige, C.; Königsberg, J.; Ponick, B.

Hybride Spindel: Prozessabhängige Einstellung der Spindeldynamik zur Produktivitätssteigerung in der spanenden Bearbeitung

Förderer: AiF / FGW,

https://www.fgw.de/wp-content/uploads/IGF_19590N_HSP_Internetveroeffentlichung_Hybride_Spindel.pdf

Heide, D.

Electrical Machine Design for an All-Automatic Ground Generator Airborne Wind Energy System

WESC 2021 (Wind Energy Science Conference), 25 – 28 Mai 2021, Hannover

Aufsätze in Fachzeitschriften 2022

Journal Articles 2022

Ebersberger, J.; Fauth, L.; Keuter, R.; Cao, Y.; Freund, Y.; Hanke-Rauschenbach, R.; Ponick, B.; Mertens, A.; Friebe, J.

Power Distribution and Propulsion System for an All-Electric Short-Range Commuter Aircraft-A Case Study
2022, IEEE Access

Ebersberger, J.; Hagedorn, M.; Lorenz, M.; Mertens, A.

Potentials and Comparison of Inverter Topologies for Future All-Electric Aircraft Propulsion
IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Energies 2022, 15(1)

Fricke, T.; Schwarz, B.; Ponick, B.

Combining Schwarz–Christoffel Mappings and Biot–Savart Law to Calculate the Clamping Plate Field in Large Salient Pole Synchronous Machines
IEEE Transactions on Magnetics, 58

Hoffmann, A.; Ponick, B.

Method to Predict the Non-Uniform Potential Distribution in Random Electrical Machine Windings under Pulse Voltage Stress
MDPI Energies 2022

Schneider, V.; Behrendt, C.; Höltje, P.; Cornel, D.; Becker-Dombrowsky, F.; Puchtler, S.; Gutiérrez Guzmán, F.; Ponick, B.; Jacobs, G. Kirchner, E.

Electrical Bearing Damage, A Problem in the Nano and Macro-Range Lubricants, 44774

Konferenzbeiträge 2022

Conference Articles 2022

Ali, M.; Bushra, R.; Friebe, J.; Mertens, A.

Improvement of EMI Filter Attenuation Using Shielding
EPE 2022, Hannover, Germany, 05.-09.09.2022

Ali, M.; Bushra, R.; Friebe, J.; Mertens, A.

Design and Potential of EMI CM Chokes with Integrated DM Inductance
EPE 2022, Hannover, Germany, 05.-09.09.2022

Ali, M.; Bushra, R.; Magdowski, M.; Vick, R.; Friebe, J.; Mertens, A.

Prediction of Stray Capacitance of CM Chokes and its Influence on EMI Filters
PCIM 2022, Nürnberg, Germany, 10.-12.05.2022

Ali, M.; Friebe, J.; Mertens, A.

Design and Comparison of Output Filter Configurations for SiC-MOSFET-Based Automotive DC-AC Inverters
ECCE 2020, Detroit, Michigan, USA, 09.-13.10.2022

Apte, P.; Fräger, L.; Friebe, J.

Configurable ISOP-IPOP DC-DC Converter for Universal Solid-State Transformer
EPE 2022, Hannover, Germany, 05.-09.09.2022

Araújo Gomes, L. V.; Manthey, T.; Friebe, J.

Investigation of an Interleaved Current-Fed Single Active Bridge DC-DC Converter for PV Applications
EPE 2022, Hannover, Germany, 05.-09.09.2022

Bagaber, B.; Heide, D.; Ponick, B.; Mertens, A.

Efficiency and Lifetime Analysis of Several Airborne Wind Energy Electrical Drive Concepts
EPE 2022, Hannover, Germany, 05.-09.09.2022

Bagaber, B.; Mertens, A.

Energy Storage Systems for Airborne Wind Generators

EPE 2022, Hannover, Germany, 05.-09.09.2022

Beckemeier, C.; Friebe, J.

Novel Current Balancing Method for HF Interleaved Converters with Reduced Control Effort

EPE 2022, Hannover, Germany, 05.-09.09.2022

Behrendt, C.; Dittmann, J.; Knebusch, B.; Ponick, B.

Common-Mode Impedance Prediction of a High-Frequency Hairpin Stator Winding Based on FEM and Modified Nodal Analysis

SPEEDAM 2022, Sorrento, Italy, 22.-24.06.2022

Behrendt, C.; Dittmann, J.; Knebusch, B.; Ponick, B.

An Investigation Into the Trade-Off Between Full Machine and Single-Slot FEM Simulations for Electrical Machine Modeling at High Frequencies With Respect to Inter-Wire Couplings

ICEM 2022, Valencia, Spain, 05.-08.09.2022

Bezerra, V. F.; Manthey, T.; Friebe, J.

Design of Planar Coupled Inductor Applied to Zero Current Switching Clamped-Current Converter

EPE 2022, Hannover, Germany, 05.-09.09.2022

Bien, M.; Göing, J.; Friedrichs, J.; Ziaja, K.; Mare, F.; Blanken, N.; Cao, Y.; Mertens, A.; Ponick, B.; Schuchard, L.; Voigt, M.; Mailach, R.;

Modelling Degradation Mechanisms in Hybrid-Electric Aircraft Propulsion Systems

ISABE 2022, Ottawa, Canada, 25-30.09.2022

Blanken, N; Bieber, M.; Ponick, B.

Design of Axial End Region of Additively Manufactured Rotors of Synchronous Machines to Reduce the Axial Magnetic Stator Flux Density

ICEM 2022, Valencia, Spain, 05.-08.09.2022

Brinker, T.; Gräber, H.; Friebe, J.

GaN HEMT and SiC Diode Commutation Cell based Dual-Buck Single-Phase Inverter with Premagnetized Inductors and Negative Gate Driver Turn-off Voltage

EPE 2022, Hannover, Germany, 05.-09.09.2022, pp. 1-8

Brinker, T.; Mand, P.; Friebe, J.

Impact of GaN-HEMT Combinations with Different Die-Size on the Efficiency of a Single-Phase Photovoltaic Differential Buck Inverter

ECCE USA 2022, Detroit, USA, 09.-13.10.2022, pp. 1-8

Cao, Y.; Fauth, L.; Friebe, J.; Mertens, A.

Potentials to Improve the Post-Fault Performance of a Fault-Tolerant Inverter System in Electrified Aircraft Propulsion System

EPE 2022, Hannover, Germany, 05.-09.09.2022

Dierks, R.; Mertens, A.

Novel Operation Mode of the Modular Multilevel Matrix Converter based on a Dimensioning Algorithm

EPE 2022, Hannover, Germany, 05.-09.09.2022

Dittmann, J.; Behrendt, C.; Ponick, B.

Prediction of the Voltage Distribution in a Inverter-Fed Hairpin Stator Winding

ICEMS 2022, Chiang Mai, Thailand, 29.11.-02.12.2022

England, M., Helmer, R., Ponick, B.

Reduction of Torque Ripple and Vibration of Permanent Magnet Synchronous Machines with Sinusoidal Cavities

ICEMS 2022, Chiang Mai, Thailand, 29.11.-02.12.2022

Fauth, L.; Willer, F.; Friebel, J.

A Compact Solid State Transformer for Replacing Conventional Medium Power Transformer in Weight-Critical Applications

EPE 2022, Hannover, Germany, 05.-09.09.2022

Fricke, T.; Pickert, P.; Schwarz, B.; Ponick, B.

Combining Schwarz-Christoffel Mappings and Biot-Savart Law to Calculate the High-Frequency Current Distribution Inside a Single Slot

EPE 2022, Hannover, Germany, 05.-09.09.2022

Gerlach, M.E.; Bender, T.; Ponick, B.

Influence of Round Wire Winding and Insulation on the Vibration Behavior of Electric Machines

SPEEDAM 2022, Sorrento, Italy, 22.-24.06.2022, pp. 7-13

Gerlach, M.E.; Hoffmann, A.; Ponick, B.

Design of High Speed Electric Machine for an Automotive Powertrain

E-MOTIVE Expert Forum 21.-22.09.2022, Wolfsburg

Gerlach, M.E.; Langfermann M.; Ponick, B.

Influence of Concentrated Winding and Insulation on the Vibration Behavior of Electric Machines

ICEMS 2022, Chiang Mai, Thailand, 29.11.-02.12.2022

Gerlach, M.E.; Weber S.; Ponick, B.

Influence of Hairpin Winding and Insulation on the Vibration Behavior of Electric Machines

ICEM 2022, Valencia, Spain, 05.-08.09.2022

Hagedorn, M.; Lorenz, M.; Mertens, A.

Cascaded H-Bridge Converter Designs for Future Short-Range All-Electric Aircraft Propulsion

EPE 2022, Hannover, Germany, 05.-09.09.2022

Henkenjohann, J.; Andresen, J.; Mertens, A.

Comparison of Magnetic Noise Compensation Techniques for Dual Three-Phase Electrically Excited Synchronous Machines

EPE 2022, Hannover, Germany, 05.-09.09.2022

Himker, N.; Krümpelmann, M.; Mertens, A.

Low Phase Shift Filter for Current Sensing based on the Difference between AC Machine Models with and without Iron Losses

EPE 2022, Hannover, Germany, 05.-09.09.2022

Hoffmann, L.; Brinker, T.; Teichert, T.; Zimmermann, L.; Hanemann, M.; Manthey, T.; Friebel, J.

Design of a PV-Micro Inverter with Universal Three-Phase and Single-Phase Output Configurations

IEEE PESS & PELSS 2022, Kassel, Germany, 02.-04.11.2022

Hullmann, M.; Ponick, B.

General Analytical Description of the Effects of Segmentation on Eddy Current Losses in Rectangular Magnets

ICEM 2022, Valencia, Spain, 05.-08.09.2022

Kalla, M.; Ponick, B.

Validation of a Transient Model for Induction Machines Considering Saturation and Current Displacement using Transient FEM

ICEMS 2022, Chiang Mai, Thailand, 29.11.-02.12.2022

Keuter, R. J., Ponick, B.

First Step to Optimum Rotor Design for E-Motors with High Power Density for Aircraft Propulsion

ICEMS 2022, Chiang Mai, Thailand, 29.11.-02.12.2022

Knebusch, B.; Jünemann, L.; Höltje, P.; Mertens, A.; Ponick, B.

Measurement Principle for Measuring High Frequency Bearing Currents in Electric Machines and Drive Systems

EPE 2022, Hannover, Germany, 05.-09.09.2022

Kostka, B.; Mertens, A.

Practical Implementation of a Concept for In-Situ Detection of Humidity-Related Degradation of IGBT Modules

EPE 2022, Hannover, Germany, 05.-09.09.2022

Lengsfeld, S.; Grundmann, J.; Oomen, M.; Vargas-L.; Ponick, B.; Jung, M.

Comparing Armature Windings for a 10 MW Fully Superconducting Synchronous Wind Turbine Generator

12th CPEEE2022 (virtuell), 25.-27.02.2022, Shiga, Japan

Lichtenstein, T.; Fröhling, S.; Tegtmeier, B.; Fischer, K.

Climatically Induced Insulation Degradation in Power Semiconductor Modules of Wind Turbines

EPE 2022, Hannover, Germany, 05.-09.09.2022

Lindemann, G.; Willich, V.; Mertens, A.

Novel Quasi-Direct Rotor Position Estimator for Permanent Magnet Synchronous Machines based on the Back-Electromotive Force using Current Oversampling

EPE 2022, Hannover, Germany, 05.-09.09.2022

Manthey, T.; Khader, M.; Fribe, J.

Transformer Design Optimization and Comparison for a DC-DC Converter used in PV Micro-Inverters

EPE 2022, Hannover, Germany, 05.-09.09.2022

Manthey, T.; Ranft, P.; Fribe, J.

Cooling Concept and Molding Packaging for PV Module Integrated Micro-Inverters

CIPS 2022, Berlin, Germany, 15.-17.03.2022

Mirzadeh, M.; Mertens, A.

Measurement-based Component-level Load Modeling for Evaluation of a Current-suppressing Loading Scenario for Microgrid Black Start Events

ISGT 2022 North America (virtuell), 24.-28.04.2022, New Orleans, USA

Mirzadeh, M.; Strunk, R.; Erckrath, T.; Mertens, A.

Power Hardware-in-the-Loop Verification of a Cold Load Pickup Scenario for a Bottom-up Black Start of an Inverter-dominated Microgrid

EPE 2022, Hannover, Germany, 05.-09.09.2022

Mirzadeh, M.; Strunk, R.; Matter, S.; Bekker, I.; Munderloh, M.; Erckrath, T.; Hofmann, L.; Mertens, A.

A Rule-based Concept for a Bottom-up Multi-Master Black Start of an Inverter-Dominated Low-Voltage Cell

PEDG 2022, Kiel, Germany, 26.-29.06.2022

Movagharnejad, H.; Knebusch, B.; Mertens, A.; Ponick, B.

Design Interactions of AC- and DC-Side Filters for Traction Drives with SiC Inverters

EPE 2022, Hannover, Germany, 05.-09.09.2022

Schubert, M.; Wohlers, C.; Ponick, B.

Efficient Determination of the Behavior of Permanent Magnet Synchronous Machines using Magnetic Equivalent Circuits

ICEM 2022, Valencia, Spain, 05.-08.09.2022

Stallmann, F.; Fräger, L.; Mertens, A.

Design of a Robust Voltage Control for Inverters with LC Filter based on the Internal Model Control

EPE 2022, Hannover, Germany, 05.-09.09.2022

Stallmann, F.; Liebchen, G.; Mertens, A.

Initial Start and Synchronization Algorithm for Droop-Controlled Inverters Considering the Inner Voltage Control Loop

APPEEC 2022, Melbourne, Australia (hybrid), 20. - 23.11.2022

Stallmann, F.; Mertens, A.

Frequency-Supporting Control of a Solid-State Transformer

COMPEL 2022, Tel Aviv, Israel, 20. -23.06.2022

Suchan, A.; Ponick, B.

Time Efficient Calculation of Current Harmonics in Inverter-Fed Permanent Magnet Excited Synchronous Machines

ICEM 2022, Valencia, Spain, 05.-08.09.2022

Suchan, A.; Ponick, B.

Time Efficient Calculation of Current Harmonics in Inverter-Fed Electrically Excited Synchronous Machines

ICEMS 2022, Chiang Mai, Thailand, 29.11.-02.12.2022

Wenzel, J.; Mertens, A.

System Level Simulation of Moisture Propagation and Effects in Wind Power Converters

EPE 2022, Hannover, Germany, 05.-09.09.2022

Wiesemann, J.; Dumtzlaff, J.; Mertens, A.

Control of an Active Gate Driver for an Electric Vehicle Traction Inverter Using Artificial Neural Networks

EPE 2022, Hannover, Germany, 05.-09.09.2022

Wiesemann, J.; Mertens, A.

Experimental Comparison of an Active Gate Driver and a dv/dt Filter to Reduce the Output dv/dt of a SiC EV Drive Inverter

IECON 2022, Brüssel, Belgium, 17.-20.10.2022

de Barros, A.; Gerlach, M.E.; Huang, X.; Langermann, M.; Ponick, B.; Ebrahimi, A.

Calculation of Electric Machines Vibration Using an Analytical Beam Element Model

ICEM 2022, Valencia, Spain, 05.-08.09.2022

Buchbeiträge 2022 Books 2022

Fricke, T.

Compression System Losses in Large Salient Pole Synchronous Machines
Dissertation, TEWISS Verlag ISBN 978-3-95900-776-4

Haschen, E.

Transiente Simulation elektrisch erregter Synchronmaschinen mit Parameterfindung durch magnetische Er-satznetzwerke
Dissertation, TEWISS Verlag ISBN 978-3-95900-686-6

Lücke, S.

Regelung von Induktionsmaschinen im gesamten Drehzahlbereich ohne Gebersystem
Dissertation, TEWISS Verlag ISBN 978-3-95900-692-7

Movagharnejad, H.

Wireless Power Transfer for Battery Charging Application of Electric Vehicles
Dissertation, TEWISS Verlag ISBN 978-3-95900-716-0

Udemra, S.

Elektrisch erregte Synchronmaschine mit kontaktlosem induktivem Übertragungssystem ohne zusätzlichen Wechselrichter
Dissertation, TEWISS Verlag ISBN 978-3-95900-740-5

Auszeichnungen 2021/22

Awards 2021/22

2021

27.04.

Christian Nörenberg erhält für seinen Masterabschluss den Dr. Jürgen Ulderup Preis 2021.

07.05.

Christian Nörenberg wird für seine Masterarbeit mit dem Studienpreis 2020 der SEW-EURODRIVE-Stiftung ausgezeichnet.

21.06.

Marius Schubert und Lennart Hoffmann erhalten den VDE Studienpreis der VDE Ortsgruppe Hannover.

01.07.

Robin Strunk wird mit dem Best Paper Award PEDG 2021 ausgezeichnet.

18.10.

Dr. Jakub Kucka erhält im Rahmen des ECPE Annual Events in Erding bei München den Semikron Young Engineer Award 2021.

12.11.

Verleihung des Hanns-Voith Stiftungspreises für das Jahr 2021 an Pauline Höltje und für das Jahr 2020 an Constantin Schepe.

2022

08.02.

Eike Krüger wird in die Dean's List im Master-Studiengang Elektro- und Informationstechnik aufgenommen.

15.-17.06.

Leon Fauth, Janine Ebersberger, Yongtao Cao, Ralf Keuter und Yannik Freund (IfES) werden mit dem 2. Preis bei der 2022 IEEE/AIAA ITEC+EATS Aerospace Student Design Competition "High-Voltage/High Power Distribution Propulsion Design for Zero Emission Aircraft" bei der Konferenz ITEC/EATS in Anaheim, CA, USA, ausgezeichnet (in Abwesenheit).

29.07.

Beim IEEE IFEC22 erreichen Tobias Brinker, Tobias Manthey und Jun.-Prof. Jens Friebe mit den Studierenden Marie Hanemann, Lennart Hoffmann, Tilo Teichert, Luka Zimmermann beim Best Presentation Award den 4. Platz

14.10.

Jan Andresen wird mit dem Förderpreis der Victor Rizkallah-Stiftung und der Stiftung NiedersachsenMetall ausgezeichnet.

02.12.

Prof. Ponick erhält den goldenen Apfel-Preis für exzellente Lehre beim Tag der Fakultät.

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

