



# Jahresbericht



# Annual Report

2010 / 2011



Institut für  
Antriebssysteme  
und Leistungselektronik

2010 / 2011

## **Prof. Dr.-Ing. A. Mertens**

---

Leistungselektronik  
Antriebsregelung

## **Prof. Dr.-Ing. B. Ponick**

---

Elektrische Maschinen  
Antriebssysteme

## **Anschrift**

---

Institut für Antriebssysteme und  
Leistungselektronik  
Leibniz Universität Hannover  
Welfengarten 1  
30167 Hannover

<http://www.ial.uni-hannover.de>

## **Jahresbericht**

Antriebsregelung

Elektrische Antriebssysteme

Elektrische Maschinen

Leistungselektronik

## **Annual Report**

Drive Control

Drive Systems

Electrical Machines

Power Electronics

## **Impressum**

---

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. A. Mertens, Prof. Dr.-Ing. B. Ponick

Institut für Antriebssysteme und Leistungselektronik (IAL)  
Leibniz Universität Hannover

Redaktion: Dipl.-Fachübers. P. Duensing

## Inhaltsverzeichnis ♦ Table of Contents

<b>Vorwort ♦ Preface</b> .....	4
<b>Forschung am IAL: Projektberichte ♦ Research at IAL: Project Reports</b> .....	9
Verbesserte Geräuschberechnung elektrischer Maschinen .....	10
Improved Noise Calculation of Electrical Machines	
Motorintegrierte Dämpfung von Spindelschwingungen .....	12
Integrated Damping of Spindle Vibrations	
Einrichtung zur stoßfreien Kurzzeit-Netzunterbrechung .....	14
Short-break Power Supply Without Impact Load	
Berechnung permanenterregter Synchronmaschinen für Selbstanlauf .....	18
Calculation of Line Start Permanent Magnet Synchronous Machines	
Steigerung der Drehmomentdichte .....	20
Increased Torque Density	
Thermische Modellbildung .....	22
Thermal Modelling	
Neues in und von FEMAG .....	24
Novelties around FEMAG	
Positionsgeberlose Regelung von permanentmagneterregten Synchronmaschinen .....	26
Self-sensing Control of Permanent Magnet Synchronous Machines	
Auslegung eines LCL-Filters für Umrichter mit niedriger Schaltfrequenz in dezentralen Erzeugungsanlagen .....	28
Design of LCL Filters for Converters with Low Switching Frequency Used in Decentralised Power Generating Plants	
Untersuchung modularer Multilevel-Umrichtertopologien .....	30
Examination of Modular Multilevel Topologies	
Lebensdauer von Leistungshalbleitern in Offshore Windenergieanlagen .....	34
Lifetime of Power Semiconductors in Offshore Wind Turbines	
Adaptive digitale Gate-Ansteuerung von HV-IGBTs .....	36
Adaptive Digital Gate Control of HV IGBTs	
Hocheffiziente Umrichter mit SiC-Halbleitern .....	38
Highly Efficient Converters with SiC Semiconductors	
Potentiale neuer Leistungshalbleiter für Kfz-Antriebe .....	40
Potentials of Novel Power Semiconductors for Vehicle Drives	
Forschungsinitiative Energie 2050 .....	42
Research Initiative Energy 2050	
Die Protolar-GmbH – Ein Spin-Off erweitert das Angebot des IAL .....	44
Protolar GmbH – A Spin-Off Extends the Range of Services Offered by IAL	

<b>Lehre am IAL ♦ Education at IAL</b> .....	<b>45</b>
Veranstaltungstabelle .....	47
Schedule of Lectures	
Grundlagen der elektromagnetischen Energiewandlung .....	48
Basics of Electromagnetical Power Conversion	
Berechnung elektrischer Maschinen .....	49
Theory of Electrical Machines	
Elektrische Klein- und Servoantriebe .....	50
Small Electrical Motors and Servo Drives	
Elektronisch betriebene Kleinmaschinen .....	51
Small Electronically Controlled Motors	
Elektrische Antriebssysteme .....	52
Electrical Drive Systems	
Elektrische Antriebstechnik I .....	54
Electric Drives I	
Elektrische Antriebstechnik II .....	55
Electric Drives II	
Leistungselektronik I .....	56
Power Electronics I	
Leistungselektronik II .....	57
Power Electronics II	
Datenverarbeitungssysteme .....	58
Data Processing Systems	
Leistungshalbleiter und Ansteuerungen .....	59
Power Semiconductors and Gate Drives	
Regelung elektrischer Drehfeldmaschinen .....	60
Control of Electrical Three-phase Machines	
Dynamische Regelantriebe .....	61
Dynamic Servo Drives	
Elektrische Bahnen und Fahrzeugantriebe .....	62
Electrical Traction and Vehicle Drives	
Modellierung von elektromechanischen Mikrosystemen .....	63
Modelling of Electromechanical Micro Systems	
Kolloquium „Elektrische Antriebssysteme“, „Berechnung elektrischer Maschinen“ und „Elektrische Klein- und Servoantriebe“ .....	64
Colloquium on „Electrical Drive Systems“, „Theory of Electrical Machines“ and „Small Electrical Motors and Servo Drives“	
Labor „Leistungselektronik“ .....	65
Laboratory Exercise on „Power Electronics“	
Labor „Elektrische Maschinen“ .....	66
Laboratory Exercise on „Electrical Machines“	
Labor „Elektrische Antriebssysteme“ .....	67
Laboratory Exercise on „Electrical Drive Systems“	
Studentische Arbeiten 2010/2011 .....	68
Students' Theses 2010/2011	

---

<b>Das Institut ♦ The Institute</b> .....	74
Mitarbeiter des IAL .....	74
Staff of IAL .....	
Chronik 2010/2011 .....	79
Chronicle 2010/2011 .....	
Veröffentlichungen 2010/2011 .....	85
Publications 2010/2011 .....	
Veranstaltungen 2010/2011 .....	88
Events 2010/2011 .....	
Auszeichnungen 2010/2011 .....	89
Awards 2010/2011 .....	
<b>Dissertationen 2010/2011 ♦ Dissertations 2010/2011</b> .....	91
Adaptive Ansteuerverfahren für Hochleistungs-IGBTs mit einer digitalen Treibereinheit.....	92
Adaptive Driving Scheme for High-power IGBTs Using a Digital Gate Unit .....	
Kopplung numerischer und analytischer Verfahren zur Berechnung des Betriebsverhaltens von Synchronmaschinen .....	94
Coupling of Numerical and Analytical Methods for Calculating the Operating Behaviour of Synchronous Machines .....	
Effiziente Berechnungsverfahren für Hybridschrittmotoren.....	96
Efficient Strategies to Calculate Hybrid Stepping Motors .....	



## Vorwort

### Liebe Leserinnen und Leser,

inzwischen ist das IAL 10 Jahre alt und steht seit etwa 8 Jahren unter unserer gemeinsamen Führung. Die vergangenen beiden Jahre haben im IAL wiederum zu einem Wachstum geführt, das sich sowohl quantitativ als auch qualitativ zeigt.

Die Zahl der wissenschaftlichen Mitarbeiter und Stipendiaten hat die 30 überschritten. Hinzu kommen 2 Oberingenieure sowie 6 Mitarbeiter im technischen und Verwaltungsdienst. Dabei hat sich die Grundausstattung des IAL nicht verändert, so dass recht genau 80% der wissenschaftlichen Mitarbeiter aus Drittmitteln finanziert werden, die sich auf über 2 Mio € allein in 2011 belaufen.

Wir verstehen uns nach wie vor als ein methodisch aufgestelltes Institut, das in der Lage ist, die gesamte Breite der elektrischen Antriebstechnik abzudecken. Dazu gehören Antriebskonzepte, Berechnungsverfahren für und wichtige Parasitäreffekte in elektrischen Maschinen, Wechselwirkungen in umrichter gespeisten Antrieben, die Regelung elektrischer Antriebe, leistungselektronische Schaltungskonzepte, sowie die Bewertung und Einsatztechnik von Leistungshalbleitern.

Die Anwendungsgebiete haben sich jedoch durch die jüngsten Entwicklungen erweitert. Während die ursprünglichen Themengebiete des IAL, also die industrielle Antriebstechnik, Kleinantriebe und Mechatronik, weiterhin mit gut einem Drittel den größten Teil ausmachen, sind die Fahrzeugantriebe mit einem weiteren Drittel zu einem sehr wichtigen Standbein geworden, nicht zuletzt aufgrund unserer guten Zusammenarbeit im NFF (Niedersächsisches Forschungszentrum für Fahrzeugtechnik) und mit dem FhG-IFAM. Zudem kommen vermehrt Projekte zu den erneuerbaren Energien hinzu, die ein knappes Drittel ausmachen. Hier hilft uns die Vernetzung im ForWind (Forschungszentrum für Windenergie) sowie seit neuestem die Zusammenarbeit mit dem FhG-IWES in Hannover und Kassel.

So dürfen wir uns im Januar 2012 über die Bewilligung eines Prüfstands durch das Bundesministerium für Umwelt freuen, das einen 1-MW-Prüfstand für Generatoren und Umrichter für Windenergieanlagen mit ca. 4 Mio € fördert. Der Prüfstand wird in einem neuen Gebäude in Hannover-Marienwerder errichtet, dessen größerer Teil der Prüfung von Gründungs- und Tragwerkstrukturen von Offshore-Windenergieanlagen dienen wird.

## Preface

### Dear readers,

in the meantime, IAL could celebrate its 10<sup>th</sup> anniversary, from which 8 years under our collective leadership. During the last two years, our institute has experienced a very promising development again, both in quantity as well as in quality.

More than 30 research associates and external scholars, 2 senior engineers and 6 administrative and technical staff members have their share in IAL's success, 80 % of the staff being funded by third parties (more than 2 million € in 2011).

We still consider us as a methodologically positioned institute, being able to cover the whole spectrum of electrical drives, ranging from drive concepts, calculation methods for and parasitic effects in electrical machines, interactions in converter-fed drives, control of drives, power electronic circuit topologies to the evaluation and application technology of power semiconductors.

Due to the recent developments, the fields of application have slightly changed. While IAL's original topics, i.e. industrial drive technology, small motors and mechatronics, still comprise the largest part with about one third, vehicle drives have become with another third a very important field of activity, resulting from the close cooperation with NFF (Lower Saxony's Research Centre for Vehicle Technology) and with FhG-IFAM. Last but not least, a little less than a third are projects in the field of renewable energies. Here we can benefit from our participation at ForWind (Centre for Wind Energy Research) as well as from our cooperation with FhG-IWES in Hannover and Kassel.

In January 2012, we were happy to receive a grant for a 1-MW test bench for generators and converters used in wind power plants. The grant of about 4 million € is funded by the German Federal Ministry for Environment. The test bench will be erected in a new building at Hannover-Marienwerder, the larger area being reserved for examining foundation and support structures of offshore wind energy power plants.

Within the frame of NFF, we also will be able to rely on more and better test benches for vehicle drives (approx. 200 kW), which were approved in 2011 and will be installed in the newly constructed NFF research centre in

Braunschweig.

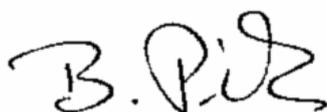
Our success is accompanied by an increasing IAL presence on the international scene. Especially worth mentioning is our leadership of the ECPE workshop “eDrives: Motor - Converter Interactions” in Hamburg in 2011, our successful participation at the ECCE 2011 in Phoenix, AZ, where one IAL presentation was awarded a “Best Student Presentation Award”, as well as the assistance of Prof. Mertens as Associate Editor of IEEE Trans. on Power Electronics, the most well-respected journal in this field. Beyond that, several other IAL staff members were awarded prestigious prizes.

So we indeed have our share in the great success, achieved by the Faculty of Electrical Engineering and Computer Science in the field of Power Engineering. The research rating of the German Council of Science and Humanities (Wissenschaftsrat) rated this sector as “excellent”, just slightly exceeded by RWTH Aachen; all other universities were left behind.

Finally, our faculty can also be glad about the rising number of first semester students. On the one hand, this results from the double number of graduates in Lower Saxony in 2011 due to reduction of the high school curriculum to 8 years instead of 9. This results in an average of 40 % more enrolments at universities. But an even greater share results from the initiatives of Prof. Ponick as Academic Dean of the Faculty of Electrical Engineering, now offering the possibility to enrol for summer terms, too. In this way, the field of Electrical Engineering alone could count on more than 200 first semester students in 2011 compared to about 100 in 2009. In addition, the new curriculum “Power Engineering” was introduced, offered in cooperation with “Mechanical Engineering”. Here, more than 100 students have enrolled.

So the next years bear a lot of challenges: the setup of the new 1-MW test bench and a large number of students, from whom we hopefully will be able to win a lot of them for the drive systems and power electronics sector.

Hannover, December 2011



Auch im Rahmen des NFF werden wir auf mehr und bessere Prüfstände für Fahrzeugantriebe bis ca. 200 kW zurückgreifen können, die in 2011 bewilligt wurden und im neu zu errichtenden Forschungsbau des NFF in Braunschweig untergebracht werden.

Diese Erfolge gehen einher mit einer weiter wachsenden internationalen Sichtbarkeit des IAL. Zu erwähnen sind hier insbesondere die Ausrichtung des ECPE-Workshops zu „eDrives: Motor – Converter Interactions“, die erfolgreiche Teilnahme an der ECCE 2011 in Phoenix, AZ, wo ein Beitrag des IAL mit einem „Best Student Presentation Award“ ausgezeichnet wurde, sowie die Mitwirkung von Prof. Mertens als Associate Editor der IEEE Trans. on Power Electronics, dem renommiertesten Journal des Fachgebiets. Darüber hinaus wurden weitere Mitarbeiter des IAL mit z. T. renommierten Preisen ausgezeichnet.

All das hat nicht wenig zu dem großen Erfolg beigetragen, den die Fakultät für Elektrotechnik und Informatik auf dem Sektor der Elektrischen Energietechnik verbuchen konnte. Dieser Sektor wurde beim Forschungsrating des Wissenschaftsrates (WR) bezüglich der Forschungsqualität als Einziger mit der Note „Sehr gut“ bedacht. Nur die RWTH Aachen wurde noch eine halbe Note besser bewertet, alle anderen schlechter.

Schließlich kann die Fakultät wieder auf deutlich gestiegene Erstsemesterzahlen blicken. Dies ist nicht nur auf den doppelten Abiturjahrgang 2011 in Niedersachsen zurückzuführen, der ca. 40% mehr Einschreibungen an den Unis zur Folge hat. Ein noch größerer Anteil ist auf die Initiativen des Studiendekans Prof. Ponick zurückzuführen. So wurde eine Einschreibung im Sommersemester ermöglicht. Allein die Elektrotechnik kommt dadurch auf über 200 Erstsemester in 2011, gegenüber ca. 100 noch in 2009. Hinzu kommt der neue Studiengang Energietechnik, der erstmals gemeinsam mit dem Maschinenbau angeboten wird. Hier haben sich zusätzlich über 100 Studenten eingeschrieben.

Damit stehen für die nächsten Jahre einige Herausforderungen vor uns: Die Realisierung des neuen 1-MW-Prüfstand und eine große Zahl von Studierenden, die wir hoffentlich zu einem guten Teil für die Antriebstechnik und Leistungselektronik begeistern können.

Hannover, Dezember 2011



## Curriculum Vitae

Prof. Dr.-Ing. Axel Mertens

Welfengarten 1

30167 Hannover

Tel.: +49(0)511/762-2471

Fax: +49(0)511/762-3040

E-mail: [mertens@ial.uni-hannover.de](mailto:mertens@ial.uni-hannover.de)



- 1982 - 1987     Studies and graduation (Dipl.-Ing.) in Electrical Engineering, RWTH Aachen University of Technology
- 1987 - 1992     Research associate at the Institute for Power Electronics and Electric Drives (ISEA) at RWTH Aachen
- 1989             Herbert Kind Award (VDE)
- 1989 - 1990     Research associate at WEMPEC, University of Wisconsin at Madison
- 1992             Doctor in Electrical Engineering at RWTH Aachen
- 1992             IEEE IAS IPCC 2nd Prize Paper Award
- 1993 - 2004     Siemens AG in Erlangen and Nürnberg as R&D engineer, manager of converter control development for large drives, and product manager for medium-voltage converters
- 2004             Appointed full professor for Power Electronics at the University of Hannover
- 2006             Appointed member of the Editorial Board of the journals "European Transactions of Electrical Power" (VDE-Verlag) and "Electrical Engineering" (Springer Verlag)
- 2007- 2011     Chairman of the Division Q1 Power Electronics of the Power Engineering Society ETG (Technical Society of the VDE)
- 2009             Appointed Head of Electric Drives Group within Fraunhofer Institute for Manufacturing Technology and Applied Materials Research
- 2010             Appointment as Board member of Energy Research Centre Lower Saxony (EFZN)
- 2010             Appointed advisor of the State's Initiative Fuel Cell Lower Saxony
- 2010             Appointed Associate Editor of the IEEE Transactions on Power Electronics
- 2011             Chairman of IEEE IAS/IES/PELS Joint German Chapter
- 2011             Elected Vice Dean of the Faculty of Electrical Engineering and Computer Science

## Curriculum Vitae

Prof. Dr.-Ing. Bernd Ponick

Welfengarten 1

30167 Hannover

Tel.: +49(0)511/762-2571

Fax: +49(0)511/762-3040

E-mail: [ponick@ial.uni-hannover.de](mailto:ponick@ial.uni-hannover.de)

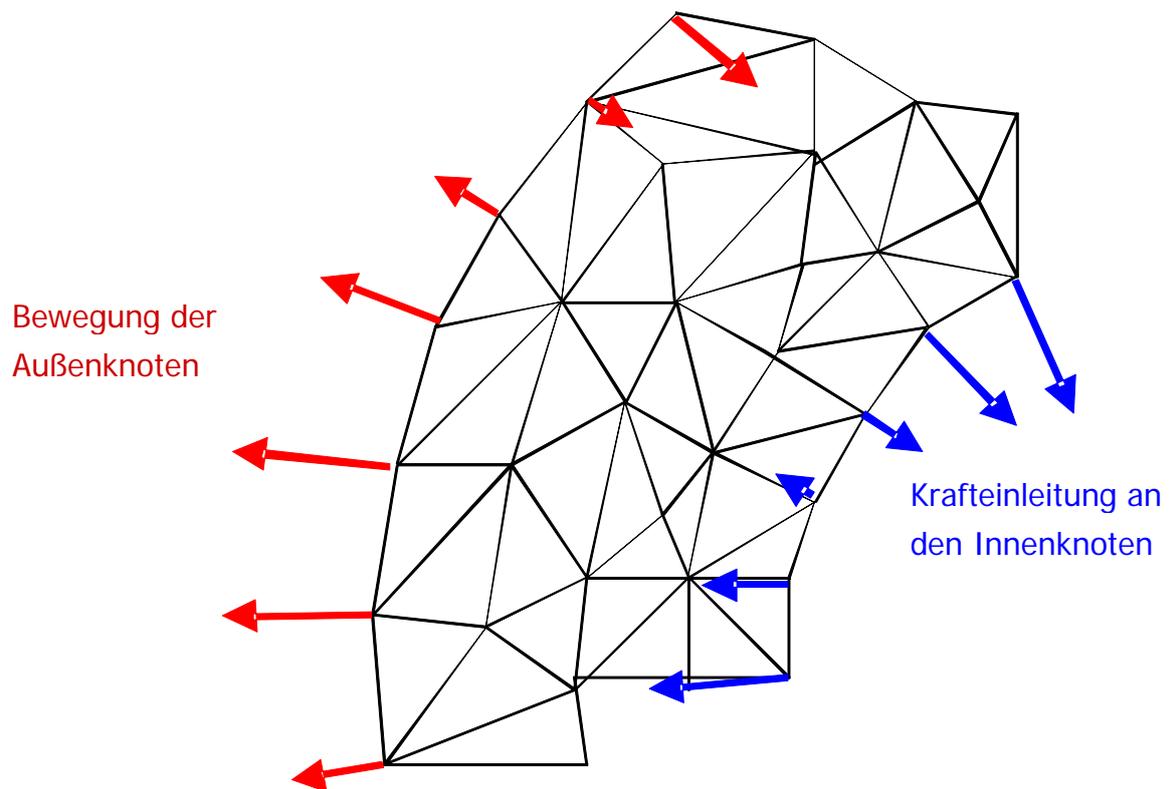


- 1984 - 1990     Studies and graduation (Dipl.-Ing.) in Electrical Engineering/Power Engineering, University of Hannover
- 1986             Philips Award
- 1990 - 1994     Research associate at the Institute for Electrical Machines and Drives at the University of Hannover
- 1994             Doctor in Electrical Engineering at the University of Hannover
- 1995             Design engineer for large variable speed motors at Siemens Dynamowerk, Berlin
- 1997             Head of the Electrical Design and Offer Processing Department
- 2001             Technical Director of Siemens Dynamowerk
- 2003             Appointed full professor for Drive Systems at the University of Hannover
- 2006             Convenor of Working Group 12 of IEC TC2 'Rotating Machinery'
- 2007             Elected Director of the Hannover Center for Mechatronics
- 2007             Elected Academic Dean for Electrical Engineering and Information Technology
- 2007             Elected Chairman of IEC TC2 'Rotating Machinery' until 2013
- 2009             Head of Electric Drives Group within Fraunhofer Institute for Manufacturing Technology and Applied Materials Research
- 2010             Board member of the Lower Saxony Research Centre for Vehicle Technology (NFF)
- 2011             Elected member of the German Research Foundation (DFG) Review Board "Electrical Engineering"



## Forschung am IAL: Projektberichte

### Research at IAL: Project Reports



Numerische Modellnachbildung der mechanischen Schwingungsberechnung  
Numerical Modelling of Mechanical Vibration Calculation

## Verbesserte Geräuschberechnung elektrischer Maschinen

von Dipl.-Ing. Dirk Braunsch

Eine rotierende elektrische Maschine erzeugt im Betrieb Geräusche, die sich auf verschiedene Ursachen zurückführen lassen. Von Bedeutung sind neben Lüfter- und Lagergeräuschen vor allem Geräusche, die durch Maxwell'sche Grenzflächenkräfte an der Ständerbohrung hervorgerufen werden und so das Blechpaket zu Schwingungen anregen.

Wird eine Eigenform des äußeren Maschinenteils – i. Allg. des Ständers – durch diese Grenzflächenkräfte in der Nähe ihrer Eigenfrequenz angeregt, können große Schwingungsamplituden und damit ein hoher Schalldruckpegel erzeugt werden. Eine Vorausberechnung dieser elektromagnetisch angeregten Geräusche ist daher ein wichtiger Bestandteil des Entwurfs elektrischer Maschinen, denn eine nachträgliche Geräuschreduzierung durch Dämpfung oder Verstimmen des Blechpakets ist aufwendig und kostspielig.

Die Berechnung der Schwingungen des Ständers kann grundsätzlich auf zwei verschiedenen Wegen erfolgen: einem analytischen nach Jordan und einem numerischen auf Basis der Finite-Elemente-Methode (FEM). Besonders reizvoll ist die kurze Rechenzeit der Analytik. Ihr Nachteil liegt hingegen in den z.T. groben Vereinfachungen, die zur analytischen Berechnung des mechanischen Systems getroffen werden müssen. Beispielsweise wird der Ständer in herkömmlichen Berechnungen als ein einfacher Zylinder mit daran gekoppelten, schwingenden und gegeneinander federgestützten Zähnen modelliert. In einer numerischen Berechnung lassen sich prinzipiell beliebig detaillierte Geometrien nachbilden und so genauere Ergebnisse erzielen. Dies wird aber durch eine sehr hohe Rechenzeit erkauft. Ziel war es nun, die Vorteile beider Methoden zu kombinieren: Kurze Rechenzeiten und eine auch komplexere genauere Abbildung der mechanischen Systeme.

Zunächst werden die Induktionswellen im Luftspalt analytisch z.B. mit dem institutseigenen Programm ALFRED berechnet. Aus diesen werden dann die an der Ständerbohrung angreifenden radialen Zugspannungswellen mit Hilfe des Maxwell'schen Spannungstensors bestimmt. Als zweiter Schritt wird ein numerisches mechanisches FEM-Modell des Ständers erstellt

## Improved Noise Calculation of Electrical Machines

by Dipl.-Ing. Dirk Braunsch

Noise emitted by rotating electrical machines during operation can have different reasons. Besides the noise produced by fans or bearings, Maxwell boundary forces at the stator bore are often a source of noise, as they excite vibrations in the core.

If an eigenmode of the outer machine part – in general the stator – is excited by these boundary forces approximately to its natural frequency, this might cause large vibration amplitudes and thus high sound pressure levels. A prediction of such electromagnetically excited noise is therefore a very important aspect when designing electrical machines, because a subsequent noise reduction via damping or putting the core out of tune is time-consuming and cost-intensive.

Basically there exist two approaches to calculate vibrations in the stator: the analytical one according to Jordan and the numerical one based on the Finite Element Method (FEM). The most important advantage of the analytical approach is its short calculation time, whereas the rough simplifications to be made when analysing a mechanical system are on the other hand disadvantageous. In conventional calculations, the stator is for example modeled as a simple cylinder with vibrating teeth coupled to it which are supported against each other by springs. In numerical calculations, even complicated or detailed geometries can principally be simulated, thus leading to more detailed results. This approach, however, comes along with very long calculation times. Our goal was therefore to combine the advantages of both approaches: Short calculation times and a more complex modelling of mechanical systems.

First the spatial harmonics of the flux density in the air gap are calculated analytically, e.g. by using the Institute's software ALFRED. It serves for determining the radial spatial harmonics of tensile stress acting at the stator bore by means of the Maxwell force tensor. In a second step, a numerical mechanical FEM model of the stator is created, and a modal analysis is performed once. This numerical calculation gives all node positions,

natural frequencies and the modal matrix for further analytical calculations. The modal matrix consists of the eigenvectors of the mechanical system which are written one after the other and are normalised for the mass matrix.

Further calculation steps are analytical again. The equation of motion

$$\mathbf{M} \frac{d^2 \vec{\xi}}{dt^2} + \mathbf{D} \frac{d \vec{\xi}}{dt} + \mathbf{K} \vec{\xi} = \vec{F}$$

reflects the system response for a specified force  $F$ . The vector dimension is equal to the number of nodes used in the FEM model. The equation of motion cannot be solved analytically, because the equation system is coupled among each other via mass  $\mathbf{M}$ , damping  $\mathbf{D}$  and stiffness  $\mathbf{K}$ .

Due to mass normalization and resulting orthogonality relations of the matrices, decoupling is successful, hereby assuming proportional damping. The modal matrix is used for coordinate transformation, thus offering the possibility to put a transformation function for harmonic force excitation at the nodes of the tip of a tooth. The system response, i. e. the vibrations of each node, are evaluated at the machine surface (fig. 1).

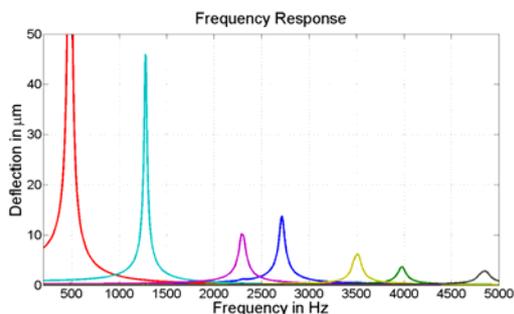


Abb. 1: Frequenzverhalten

Fig. 1: Frequency response

In the past, the method was tested for example with a frameless induction motor with rounded outer contours. The vibrations calculated were compared with the results derived from a purely numerical calculation of vibrations via ANSYS. The deviations amount to a few percents only.

It is a major advantage of this approach that the numerical modal analysis of the structural mechanics needs only to be realised once. Several parameters like current, voltage, speed or even the complete rotor can then be modified. A purely analytical calculation of vibrations based on the modal matrix lasts just a few seconds, compared to days needed for a purely numerical multiphysics calculation in the time stepping version.

und einmalig eine Modalanalyse durchgeführt. Diese numerische Rechnung stellt alle Knotenpositionen, Eigenfrequenzen und die Modalmatrix für eine weiterführende analytische Berechnung zur Verfügung. Die Modalmatrix besteht aus den hintereinander geschriebenen, auf die Massenmatrix normierten Eigenvektoren des mechanischen Systems.

Die weitere Berechnung erfolgt wieder rein analytisch. Die Bewegungsgleichung

$$\mathbf{M} \frac{d^2 \vec{\xi}}{dt^2} + \mathbf{D} \frac{d \vec{\xi}}{dt} + \mathbf{K} \vec{\xi} = \vec{F}$$

gibt die Systemantwort für eine bestimmte Kraftanregung  $F$  wieder. Die Dimension der Vektoren entspricht der Anzahl verwendeter Knotenpunkte im FEM-Modell. Eine Lösung der Bewegungsgleichung ist analytisch nicht möglich, da das Gleichungssystem untereinander über die Masse  $\mathbf{M}$ , Dämpfung  $\mathbf{D}$  und Steifigkeit  $\mathbf{K}$  gekoppelt ist.

Eine Entkopplung gelingt wegen der Massennormierung und daraus folgender Orthogonalitätsbeziehungen der Matrizen. Es wird dabei von proportionaler Dämpfung ausgegangen. Die Modalmatrix wird zur Koordinatentransformation verwendet und bietet so die Möglichkeit, eine Übertragungsfunktion für harmonische Kraftanregungen an den Knoten eines Zahnkopfes aufzustellen. Die Systemantwort, also die Schwingungen der einzelnen Knoten, werden an der Maschinenoberfläche ausgewertet (Abb. 1).

Das Verfahren wurde bisher u.a. an einem gehäuselosen Induktionsmotor mit runder Außenkontur erprobt, wobei die berechneten Schwingungen mit dem Ergebnis einer rein numerischen Schwingungsberechnung durch ANSYS verglichen wurden. Die Abweichungen liegen bei einigen wenigen Prozent.

Ein großer Vorteil des Verfahrens ist, dass die numerische Modalanalyse der Strukturmechanik nur einmal durchgeführt werden muss. Danach können verschiedene Parameter, wie z.B. Strom, Spannung, Drehzahl, oder sogar der gesamte Läufer geändert werden. Eine neue Schwingungsberechnung erfolgt rein analytisch und dauert daher nur Sekundenbruchteile im Vergleich zu Tagen, die für eine rein numerische Multiphysics-Berechnung im Zeitschrittverfahren erforderlich wäre.

## Motorintegrierte Dämpfung von Spindelschwingungen

von Dipl.-Ing. Jakob Emmrich

Schwingungseffekte an Hauptspindeltrieben im Bereich der Hochgeschwindigkeitszerspannung reduzieren oftmals die Qualität und Produktivität des Bearbeitungsprozesses. Zur aktiven Stabilisierung von Fräsprozessen wird ein motorintegrierter elektromagnetischer Aktor entwickelt. In dem durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft geförderten Projekt arbeitet das IAL eng mit dem Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW) zusammen.

Eine wesentliche Randbedingung bei der Konstruktion der motorintegrierten Dämpfung ist die ausschließliche Modifizierung des Aktivteils, so dass Spindelwelle, Gehäuse und Kühlsystem unverändert bleiben. In Abb. 1 ist das Modell des Aktivteils der Spindel dargestellt, in dem der Stator axial geteilt und zwischen die Blechpakete der Aktor zur Schwingungsdämpfung integriert wurde. Hierbei ist hervorzuheben, dass die Wicklung des Spindelaktivteils nicht geteilt wurde, sondern oberhalb des Aktors geführt wird.

Abb. 2 zeigt schematisch das Gesamtaktorkonzept, das sich aus drei einzeln ansteuerbaren Aktoren zusammensetzt, die am Umfang angeordnet sind. Aus der Summe der Kraftvektoren der Einzelaktoren kann ein umlaufender Kraftvektor erzeugt werden, der der Auslenkungsamplitude der Schwingung folgt. Die Auslenkung des Rotors wird hierbei mit 3 Wirbelstromsensoren detektiert, die unmittelbar am Blechpaket des Aktors platziert sind.

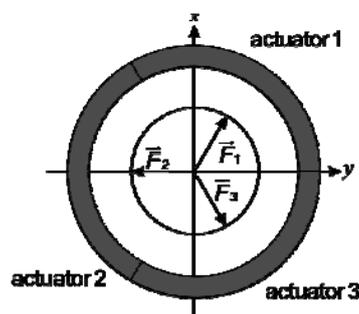


Abb. 2: Grundlegendes Aktorkonzept  
Fig. 2: Basic actuator concept

Durch Simulationen von Fräsprozessen, mechanische Schwingungsberechnungen mit Finite-Elemente-Programmen und Messungen wurden durch das IFW die zu dämpfenden

## Integrated Damping of Spindle Vibrations

by Dipl.-Ing. Jakob Emmrich

Vibrations at main spindle drives in high-speed cutting applications often have negative effects on the quality and productivity of the process of machining. For an active stabilisation of milling processes, a motor-integrated electromagnetic actuator is currently under development. In close cooperation with the Institute of Production Engineering and Machine Tools (IFW), the IAL works on this project which is funded by the German Research Foundation (DFG).

An important boundary condition for this motor-integrated damping concept is that only the active part is modified, whereas spindle shaft, frame and cooling system remain unchanged. Fig. 1 shows a model of the active part of a spindle. The stator is divided axially, and an actuator is integrated in between the core parts to dampen the vibrations. In this context, it has to be pointed out that the coil of the active part of the spindle is not divided, but is located above the actuator.

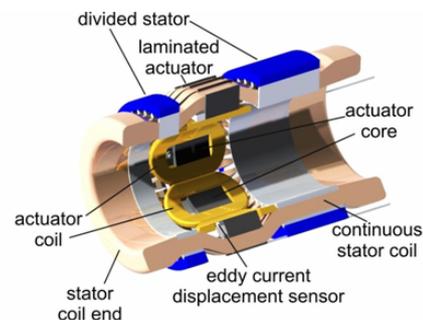


Abb. 1: Modell eines Spindelstators  
Fig. 1: Spindle stator design

Fig. 2 shows the complete actuator concept consisting of three separately controllable actuators, arranged along the circumference. From the sum of force vectors of each single actuator, a rotational force vector can be derived, following the displacement amplitude of the vibration. The rotor displacement is measured by means of 3 eddy current displacement sensors being directly located at the actuator core.

On the basis of milling process simulations, mechanical vibration calculations by use of finite element software and measurements,

the IFW was able to quantify the vibration frequencies (max. 1500 Hz) and forces (min. 700 N) to be damped.

In order to dimension the actuators, an analytical calculation program was developed based on a nonlinear magnetic circuit calculation. By modifying the numerous degrees of freedom and considering the boundary conditions resulting from the restricted installation space, this program is an appropriate tool to develop an optimum actuator design. As an example, the maximum actuator force is given in fig. 3 depending on the tooth width for different types of laminations at a supply frequency of 1500 Hz. The results already include parameters like the copper fill factor, the axial length of the end winding as well as the frequency dependence of the lamination characteristics. With a core length of approx. 36 mm, a force of about 800 N at a current density of 12 A/mm<sup>2</sup> can be obtained for each actuator.

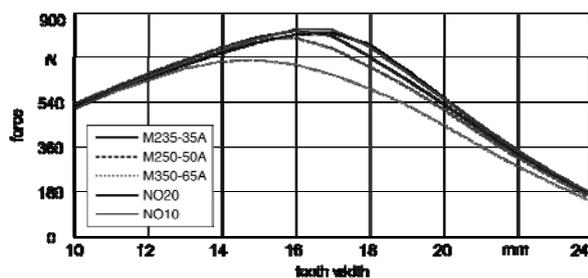


Abb. 3: Maximale Kraft eines Aktors  
Fig. 3: Maximum actuator force

Due to the high frequency of the mechanical vibrations, a minimum time constant is above all essential for controlling the actuator. Fig. 4 shows the current and force characteristic of an actuator, depending on time and for block-type power supply. With an actuator time constant of about 26 ms, the force characteristic differs with the frequency of the displacement to be damped. This has to be considered in the actuator control to avoid new undesired radial forces. Above all at maximum frequency, it is necessary to use a block voltage, in order to reach the maximum force of an actuator at maximum vibrations.

The calculation results obtained so far will be implemented in the design of a spindle prototype, which will be built in order to verify the damping concept by measurements.

Schwingungsfrequenzen (max. 1500Hz) und Kräfte (mind. 700 N) quantifiziert.

Zur Dimensionierung der Aktoren wurde ein analytisches Berechnungsprogramm basierend auf einer nichtlinearen Magnetkreisrechnung entwickelt. Hiermit ist es möglich, durch Parametervariation der zahlreichen Freiheitsgrade bei gleichzeitiger Berücksichtigung der sich durch den begrenzten Bauraum ergebenden Randbedingungen einen optimalen Aktorentwurf zu erarbeiten. In Abb. 3 ist beispielhaft die maximale Kraft eines Aktors in Abhängigkeit von der Zahnbreite für unterschiedliche Elektrolechsorten bei einer Speisefrequenz von 1500 Hz angegeben. Die Ergebnisse berücksichtigen bereits Parameter wie den Kupferfüllfaktor, die axiale Ausdehnung des Wickelkopfs sowie die Frequenzabhängigkeit der Blechkennlinien. Mit einer Blechpaketlänge von ca. 36mm kann pro Aktor eine Kraft von etwa 800N bei einer Stromdichte von 12A/mm<sup>2</sup> erreicht werden.

Durch die hohe Frequenz der mechanischen Schwingungen ist vor allem eine minimale Zeitkonstante des Aktors für eine Ansteuerung essentiell. In Abb. 4 sind der zeitliche Strom- und Kraftverlauf eines Aktors bei Blockspeisung dargestellt. Mit einer Zeitkonstanten des Aktors von etwa 26ms treten je nach zu dämpfender Frequenz der Auslenkung unterschiedliche Kraftverläufe auf, die in der Regelung der Aktoren berücksichtigt werden müssen, um nicht neue unerwünschte Radialkräfte anzuregen. Vor allem bei der Maximalfrequenz ist die Verwendung einer Blockspannung notwendig, um das Kraftmaximum des Aktors im Schwingungsmaximum zu erreichen.

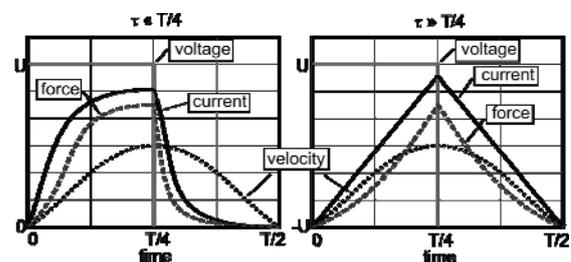


Abb. 4: Zeitlicher Strom- und Kraftverlauf eines Aktors  
Fig. 4: Actuator time constant dependency

Die bisherigen Ergebnisse der Analysen und Simulationen werden in die Konstruktion eines Spindelprototypen einfließen, um das Dämpfungskonzept messtechnisch verifizieren zu können.

## Einrichtung zur stoßfreien Kurzzeit-Netzunterbrechung

von Prof. Dr.-Ing. Hans Otto Seinsch

Die Einrichtung wurde im Auftrag der Atlas Copco Energas GmbH/Köln gemeinsam mit den wiss. Mitarbeitern Stefan Pöhler und Jan-Peter Jastrzembski entwickelt.

Die meisten Antriebe mit Hochspannungsmotoren werden für DOL-Starting bemessen. Alle Komponenten (Motor, Kupplung, ggf. Getriebe, Arbeitsmaschine) müssen den beim Anfahren vorkommenden Stoßbeanspruchungen gewachsen sein. Die Stoßwerte für den Anzugsstrom und das Kupplungsdrehmoment übersteigen meist nicht das 5- bis 6-fache ihrer Bemessungswerte.

Außerdem gilt die Forderung, dass die bei denkbaren Störfällen, wie z.B. bei 3-poligen oder 2-poligen Klemmenkurzschlüssen, bei Kurzzeit-Netzunterbrechungen mit Wiedereinschaltung auf das gleiche oder ein Reservenetz auftretenden transienten Vorgänge ohne Schäden überstanden werden. Besondere Schwierigkeiten bereitet die Beherrschung der nach einer Netzunterbrechung beim Wiedereinschalten auftretenden Drehmomente im Wellenstrang, welche je nach Anlagenkonfiguration durchaus mit dem Faktor 2 höher liegen können als beim direkten Zuschalten im Stillstand. Die Beanspruchungen liegen häufig weit oberhalb der zulässigen Werte für einzelne Komponenten, wie z.B. für die Kupplung. In solchen Fällen wird mitunter der Einsatz einer Rutschkupplung diskutiert, die auf ein maximal übertragbares Stoßmoment einstellbar ist. Da mit dieser Einrichtung bei Elektroantrieben wenige Erfahrungen vorliegen und die Wiederverwendbarkeit nach einem Ansprechen unterschiedlich beurteilt wird, stellt dieses Element eine mehr theoretische Lösungsmöglichkeit dar.

In allen Fällen, in denen die bei Störfällen möglichen stoßartigen Belastungen mit handelsüblichen Bauteilen nicht beherrschbar sind, bietet sich der Einsatz der neuartigen Umschalteneinrichtung an. Zum Verständnis der Anforderungen an das Gerät sollen die physikalischen Vorgänge bei einer Kurzzeit-Unterbrechung dargelegt werden:

Wenn ein Induktionsmotor durch einen idealen Schalter vom Versorgungsnetz getrennt wird, springt der Ständerstrom in allen drei Strängen schlagartig auf Null. Das im Abschaltaugenblick vorhandene magnetische Feld im Luftspalt ver-

## Short-break Power Supply Without Impact Load

by Prof. Dr.-Ing. Hans Otto Seinsch

An effective device how to achieve the goal was developed by order of Atlas Copco Energas/Cologne in close cooperation with the research engineers Stefan Pöhler and Jan-Peter Jastrzembski.

The majority of high voltage motors is designed to be started DOL. All components (motor, coupling, gears, the driven equipment) must withstand all transient peak loads during starting. The peak values of the starting current and the coupling torque are usually not in excess of 5 to 6 times the rated values.

In addition, the motor specifications contain the requirement that all possible transient phenomena must be withstood without damages. Difficulties arise especially from short-term interruptions of the supply voltage which may cause two times the peak values during starting. They are usually above the load capability of the mechanical components, especially of the coupling.

In such cases the use of the newly developed equipment is advisable. In order to understand the demands on the newly developed device, the physical details of a short-term supply interruption shall be explained:

When an induction motor is separated from the line by an ideal switch, the stator currents of all phases jump instantaneously to zero. However, the magnetic air-gap field cannot change stepwise because of its link with the short-circuited cage. Thus the rotor currents of slip frequency jump to those values, which secure the continuity of the flux linkage of the rotor winding. Afterwards the rotor currents decrease to zero according to the time constant of the rotor winding.

The d.c. rotor currents excite a magnetic field which induces voltages of the frequency  $f = pn$  ( $p$  number of pole pairs,  $n$  speed) in the stator winding. The motor cannot develop a torque after the separation from the supply system. Therefore the speed decreases to zero according to the counter torque of the driven machine and the total moment of inertia of all rotating parts.

The time constant of the rotor winding ranges between several 100 ms and a few seconds, it increases with increasing frame of the motor.

The residual rotor field becomes zero after approx. 3 time constants. When the reswitching of the motor occurs later, the transient phenomena are nearly the same as during DOL starting, for which the complete drive is designed. Critical stress may arise after reclosing of the switch at an instant when the residual rotor field is still high. In addition, the phase difference between the new supply voltage and the voltage induced by the residual field plays an important role. If both voltages are in phase at the instant of reclosing, the subsequent transients are less severe than in a case, when both voltages are in phase opposition. Detailed computations demonstrate, that the highest peak current occurs at  $\Delta\varphi = 180^\circ$  and the highest peak torque at approx.  $\Delta\varphi \approx 130^\circ$ .

The continuous measurement of both voltages allows the preliminary calculation of the optimal instant of reclosing the power switch. It is advantageous to use the time difference between adjacent zero crossings of the two voltages as measure of the phase difference. Moreover, the mechanical delay of the power switch must be known in order to predict the ideal instant of reclosing. According to fig. 1, the mechanical delay for reclosing was measured to 67 ms and deviated during repeated switching operations by less than 2 ms. During testing of the unit, consisting of a 2-pole 1000 kW motor and a turbo compressor, at the test floor of Atlas Copco Energas in Cologne, 10 system transfers were performed for voltage interruptions between 110 and 1980 ms. The results of the test with 1750 ms are shown for two different time scales in figure 2.

The reclosing occurred during all tests at the optimal phase difference  $\Delta\varphi \approx 0$ . In this way, the reliability performance of the newly developed equipment could be demonstrated convincingly also at several different drives of other sizes and installed at other locations.

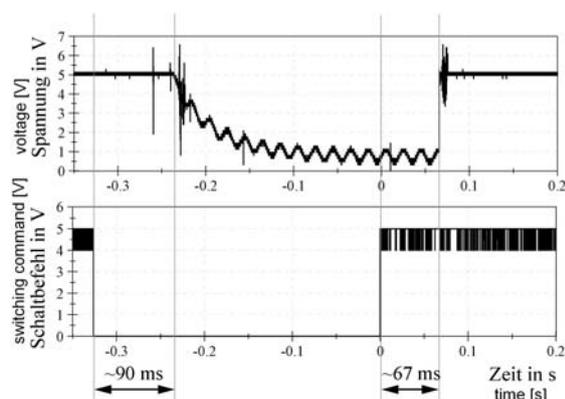


Abb. 1: Bestimmung der Schaltereigenzeiten

Fig. 1: Determination of close-open time of the switch

läuft hingegen wegen der Verkettung mit der kurzgeschlossenen Läuferwicklung stetig. Die vor dem Abschalten fließenden schlupffrequenten Läuferströme springen sprunghaft auf solche Werte, dass die Flussverkettung der Läuferwicklung stetig verläuft. Danach klingen die Läuferströme nach einer e-Funktion mit der Zeitkonstanten der Läuferwicklung auf Null ab.

Die Läufer-Gleichströme erregen ein magnetisches Feld, welches in der offenen Ständerwicklung Spannungen induziert. Da das sog. Läuferrestfeld am Läufer „klebt“, induziert es in der Ständerwicklung Spannungen der Drehfrequenz  $f = pn$  ( $p$  = Polpaarzahl des Motors,  $n$  = Drehzahl). Nach der Netztrennung entwickelt der Motor kein Drehmoment, und die Drehzahl strebt gemäß dem Gegenmoment der Arbeitsmaschine und dem Massenträgheitsmoment des Läuferstranges gegen Null. Die Restfeldspannung wird somit durch das Restfeld und die Drehzahl beeinflusst.

Die Läuferzeitkonstante bewegt sich in der Größenordnung von einigen 100 ms bis wenige s, wobei sie tendenziell mit zunehmender Maschinengröße ansteigt. Nach ca. 3 Zeitkonstanten ist das Läuferrestfeld abgeklungen. Erfolgt die Wiedereinschaltung des Motors nach dem Abklingen des Läuferrestfeldes, so entstehen Ausgleichsvorgänge wie beim DOL-Starting, wofür der Antrieb bemessen ist. Kritische Beanspruchungen erwachsen hingegen beim Wiedereinschalten zu Zeitaugenblicken, zu denen das Läuferrestfeld noch hoch ist. Außerdem spielt die Phasendifferenz zwischen der „neuen“ Netzspannung und der Läuferrestfeldspannung eine wichtige Rolle. Erfolgt das Wiedereinschalten zu einem Zeitaugenblick, zu dem Netz- und Restfeldspannung in Phase liegen, kann die algebraische Differenz beider Spannungen als Maß für die Heftigkeit der Ausgleichsvorgänge gelten. Liegen die beiden Spannungen hingegen in Phasenopposition, ist die algebraische Summe beider Spannungen maßgebend. Genaue rechnerische Untersuchungen zeigen, dass  $\Delta\varphi = 180^\circ$  den höchsten Stoßstrom,  $\Delta\varphi \approx 130^\circ$  das größte Stoßmoment bewirkt.

Die kontinuierliche Erfassung der vom Läuferrestfeld in der Ständerwicklung induzierten Spannung und der „neuen“ Netzspannung und der daraus errechnete optimale Wiedereinschaltzeitpunkt stellen das Herzstück der neuen elektronischen Einrichtung dar. Der Zeitabstand der Nulldurchgänge der beiden Spannungen wird als Maß für die Phasenverschiebung genommen. Voraussetzung für die

Funktionsfähigkeit der Einrichtung ist die Kenntnis der Schaltereigenzeiten (Abb. 1). Bei dem Test eines Turboverdichters mit einem zweipoligen 1.000 kW-Motor im Prüffeld der Atlas Copco Energas ergaben Messungen, dass der Leistungsschalter gemittelt um ca. 90 ms verzögert öffnet bzw. um ca. 67 ms verzögert schließt. Diese Zeiten wichen bei mehreren Schalthandlungen um weniger als 2 ms voneinander ab. Für die Vorausberechnung des realen Wiederzuschalt Augenblicks ist die Kenntnis der Verzögerung beim Schließen des Schalters notwendig. So lässt sich durch Extrapolation der dem Schaltbefehl vorausgegangenen Zeitverläufe der beiden Spannungen ermitteln, ob diese beim Schließen des Schalters um nicht mehr als  $\Delta\varphi = \pm 20^\circ$  voneinander abweichen. Diese Phasendifferenz kann als zulässig angesehen werden. Von den insgesamt 10 Umschaltungen mit Unterbrechungsdauern zwischen 110 und 1980 ms sind die Messergebnisse für die Umschaltzeit 1750 ms in Abb. 2 in zwei unterschiedlichen Zeitmaßstäben wiedergegeben.

Bei allen Schaltungen erfolgte die Wiederzuschaltung bei der Phasendifferenz  $\Delta\varphi \approx 0$ . Die Funktionsfähigkeit der Schaltung wurde zusätzlich an verschiedenen Aggregaten kleinerer Leistung im Bereich 20 bis 110 kW überzeugend nachgewiesen.

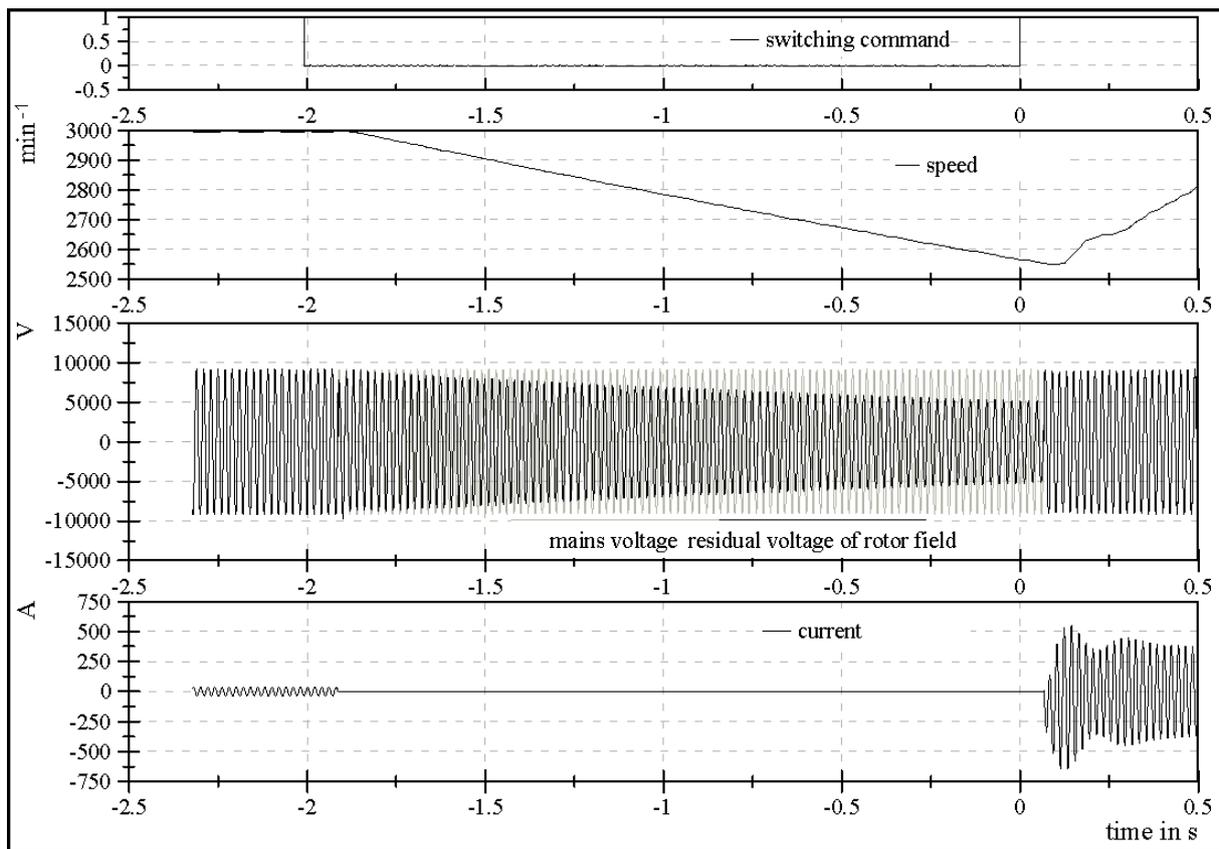


Abb. 2a: Umschaltung nach Mindestzeit 1750 ms

Fig. 2a: Transfer after switch-over time of 1750 ms minimum

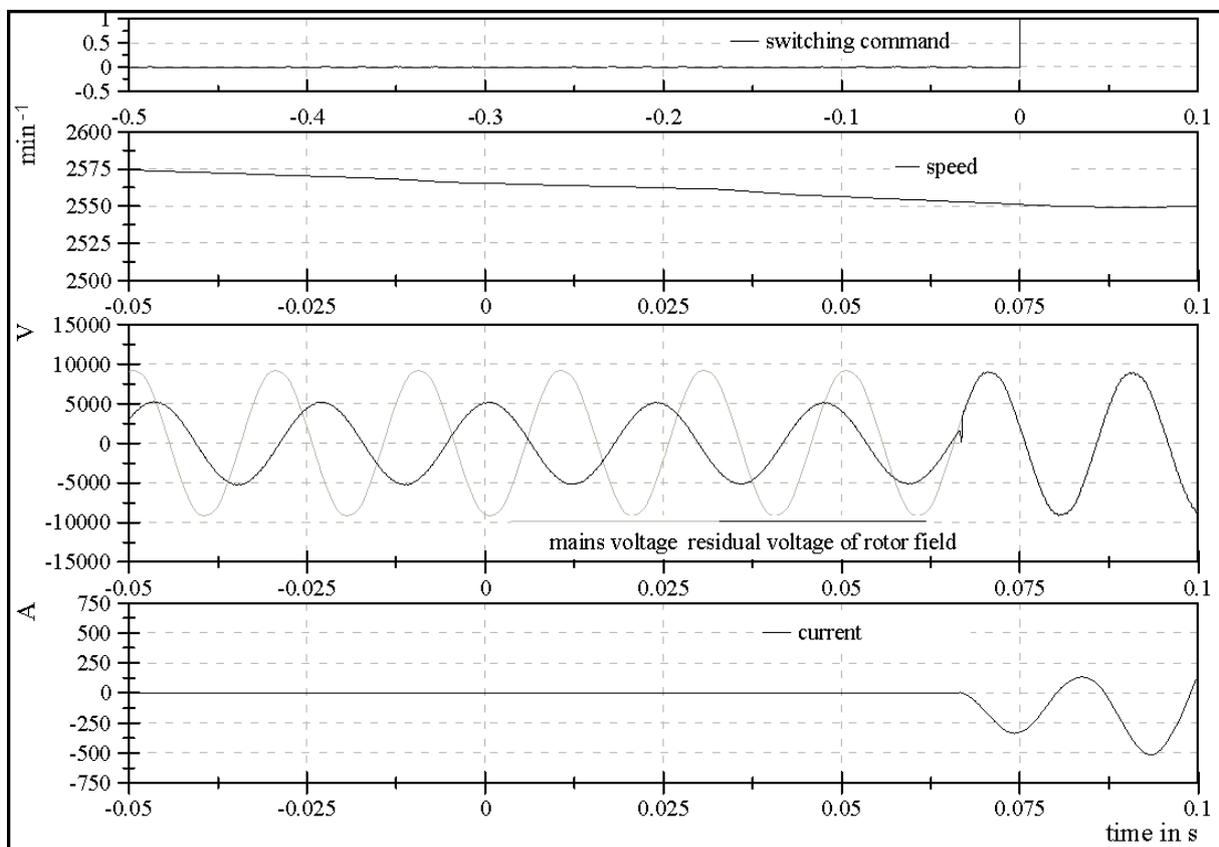


Abb. 2b: Wie Abb. 2a, aber vergrößerter Zeitmaßstab

Fig. 2b: As fig. 2a, but with enlarged scale of abscissae

## Berechnung permanent-erregter Synchronmaschinen für Selbstanlauf

von Dipl.-Ing. Meike Wehner

Bedingt durch die erhöhten Energieeffizienz-Anforderungen werden zunehmend permanent-erregte Synchronmaschinen (PMSM) als Alternative zu Induktionsmaschinen für direkt netzgespeiste Motoren interessant. PMSM bieten den Vorteil, dass sie bei einer Dimensionierung auf einen Leistungsfaktor nahe 1 fast keine Blindleistung zur Magnetisierung der Maschine aus dem Netz aufnehmen müssen. Dadurch verringert sich die Scheinleistungsaufnahme und somit der Strom sowie die Stromwärmeverluste im Stator im Vergleich zu einer Induktionsmaschine gleicher Wirkleistung. Gerade bei kleineren Maschinen stellen die Stromwärmeverluste im Stator den überwiegenden Teil der Gesamtverluste. PMSM verfügen somit über großes Potential, die IE4-Spezifikation nach IEC 60034-31 bzw. der zukünftigen IEC 60034-30 ed. 2 zu erfüllen.

Für den Selbstanlauf am Netz ist ein zusätzlicher Anlaufkäfig im Läufer erforderlich (Abb. 1). Da dieser lediglich im asynchronen Anlauf wirkt, entstehen im synchronen Betrieb nur geringe zusätzliche Verluste aus der Abdämpfung von Oberwellen. Die Herausforderung für die Dimensionierung dieser Maschinen besteht vor allem in der Gestaltung des Käfigs und der Sicherstellung eines zuverlässigen Anlaufs und Intrittfallens. Eine Simulation des Anlaufverhaltens von permanent-erregten Synchronmaschinen ist somit für eine robuste Dimensionierung unerlässlich.

Durch die geschickte Kopplung von analytischen und numerischen Berechnungsschritten lässt sich eine zeitaufwendige transiente Berechnung der PMSM vermeiden. Die analytische Berechnung basiert auf dem elektrischen Ersatzschaltbild der Maschine. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Rotorparameter durch Wirbelströme in den Permanentmagneten und durch Stromverdrängung in der Käfigwicklung beeinflusst werden und damit frequenzabhängig sind. Dies kann grundsätzlich durch eine Erweiterung des Ersatzschaltbilds um zusätzliche R-L-Glieder berücksichtigt werden. Bei richtiger Identifikation der einzelnen Elemente dieser sog. Kettenleiter erfasst das erweiterte Ersatzschaltbild die Frequenzabhängigkeit des Maschinenverhaltens über das gesamte Frequenzspektrum korrekt.

Zur Ermittlung der Motorparameter und im Be-

## Calculation of Line Start Permanent Magnet Synchronous Machines

by Dipl.-Ing. Meike Wehner

Due to increasingly higher claims for energy efficiency, permanent magnet synchronous machines (PMSM) as an alternative to induction machines are getting more and more interesting for line-start motor applications. When dimensioned with a power factor near 1, PMSM have the advantage that they barely consume any reactive power from the grid in order to magnetise the machine. Compared to an induction machine of equal active power, this reduces the apparent power consumption and thus the current as well as the  $I^2R$  losses in the stator. Above all in small-size machines,  $I^2R$  losses present the largest part of the total losses. This is why permanent magnet synchronous machines have huge potential to meet the IE4 specification according to IEC 60034-31 or the future IEC 60034-30 ed. 2.

Line start requires an additional starting cage in the rotor (fig. 1), which however is only active during asynchronous start-up. During synchronous operation, just very few additional losses result from the damping of the spatial harmonics. For dimensioning such machines, one major challenge is to choose an optimum cage design and to guarantee for a reliable start-up and pulling in of the motor. For a robust dimensioning of the motor, it is therefore indispensable to simulate the dynamic start-up behaviour of permanent magnet synchronous machines.

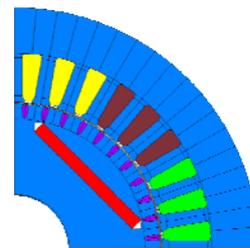


Abb. 1: Motorgeometrie  
Fig. 1: Motor geometry

A time-consuming transient calculation of the PMSM can be avoided by skilfully combining analytical and numerical calculation steps. The analytical calculation is based on the electrical equivalent circuit diagram of a machine. It has to be considered that the rotor parameters are

influenced by eddy currents in the permanent magnets and current displacements in the cage winding, thus making them frequency-dependent. This can be met by enhancing the equivalent circuit diagram by additional R-L combinations. With the correct identification of each element of the equivalent circuit, the enhanced equivalent circuit diagram correctly reflects the frequency dependency of the machine behaviour over the complete frequency range.

To determine the motor parameters and especially the frequency-dependent rotor elements, the FEM software FEMAG is used. First, the equivalent parameters are determined according to the Park's two-axis theory. Based on a modified model, the field damping factors are calculated by means of time-harmonic FEM calculations, on the basis of which the rotor parameters can then be calculated for different frequencies. Finally, the frequency-dependent rotor parameters are transformed into equivalent circuit elements for the d- and q-axis respectively.

Due to the asynchronous torque of the starting cage, the PMSM accelerates from standstill to nearly synchronous speed and then pulls in – provided that the dimensioning was chosen correctly. The resulting asynchronous torque consists of the asynchronous torque caused by the starting cage and the reversely acting braking torque caused by the permanent magnets. Moreover, torque pulsations with single and double slip frequency occur. If the magnetic flux is not sufficiently high, the motor might not pull in and will remain in asynchronous operation. In addition, the start-up process is susceptible towards changes of input voltage, moment of inertia, cage resistance and rotor temperature.

The simulation of the transient start-up behaviour is realized by use of a fundamental wave model, based on the equivalent circuit elements identified via FEM calculations. This simulation also considers the mechanical equivalent model of the shafting, including arbitrary counter torque characteristics and moments of inertia.

In order to consider the reaction of the eddy currents excited in the conductive regions of the rotor on the stator field, one equivalent damper winding in each, d- and q-, axis is provided and parameterized on the basis of the frequency-dependent rotor elements. Besides determining the speed/torque characteristics vs. time, the program can also give an estimation, how the rotor temperature will increase during start-up.

sonderen der frequenzabhängigen Rotorelemente wird das numerische Feldberechnungsprogramm FEMAG verwendet. Hierbei werden zunächst die Ersatzparameter entsprechend der Zweiachsentheorie nach Park ermittelt. Anschließend erfolgt mit einem modifizierten Modell die Berechnung der Felddämpfungsfaktoren aus zeitharmonischen FEM-Rechnungen und daraus dann der Rotorparameter bei verschiedenen Frequenzen. Im letzten Schritt werden die frequenzabhängigen Rotorparameter in ein äquivalentes Netzwerk aus R-L-Gliedern jeweils für die d- und q-Achse umgewandelt.

Die PMSM beschleunigt durch das asynchrone Drehmoment des Anlaufkäfigs vom Stillstand bis kurz unterhalb der synchronen Drehzahl und fällt dann – eine korrekte Dimensionierung vorausgesetzt – in Tritt. Das resultierende asynchrone Drehmoment setzt sich aus dem asynchronen Drehmoment aufgrund des Anlaufkäfigs und dem diesem entgegengesetzten Bremsmoment aufgrund der Permanentmagnete zusammen. Darüber hinaus entstehen Pendelmomente mit einfacher und doppelter Schlupffrequenz. Bei zu geringem Permanentmagnetfluss besteht die Gefahr, dass der Motor nicht in Tritt fällt und im asynchronen Betrieb verharrt. Zudem reagiert der Anlaufprozess empfindlich gegenüber Änderungen der Eingangsspannung, des Trägheitsmoments, des Käfigwiderstands und somit auch der Läufertemperatur.

Die Simulation des transienten Anlaufverhaltens erfolgt unter Verwendung eines Hauptwellenmodells mit den aus FEM-Rechnungen identifizierten ESB-Elementen. Dabei wird auch das mechanische Ersatzmodell des Wellenstranges unter Verwendung beliebiger Gegenmomentkennlinien und Massenträgheitsmomente berücksichtigt.

Um die Rückwirkung der in den leitfähigen Gebieten des Rotors induzierten Wirbelströme auf das Statorfeld zu berücksichtigen, wird je eine Ersatzdämpferwicklung in der d- bzw. q-Achse vorgesehen und unter Verwendung der frequenzabhängigen Rotorelemente parametrisiert. Neben der Ermittlung der Zeitverläufe von Drehzahl und Drehmoment ermöglicht das Programm zudem eine Abschätzung der Erwärmung des Läufers während des Hochlaufs.

## Steigerung der Drehmomentdichte

von Dipl.-Ing. André Brune

Drehzahlveränderbare Elektromotoren gewinnen als Hauptantriebe für Elektro- oder Hybridfahrzeuge an Bedeutung. Die bei zukünftigen Serienfertigungen zu erwartenden Stückzahlen übersteigen deutlich die derzeitigen Stückzahlen drehmomentgleicher Industrieantriebe, so dass ihre Herstellung aus ökonomischer Sicht einen wesentlich höheren Automatisierungsgrad erfordert. Eine Basis für eine hoch automatisierbare Fertigung mit Ausrichtung auf ein wirtschaftliches Optimum kann nur mit Hilfe leistungsfähiger Berechnungsverfahren und in enger Zusammenarbeit mit Spezialisten für Werkzeugmaschinen und Wickeleitechnologie gefunden werden. Die Überprüfung neuer Entwürfe hinsichtlich ihrer Eignung als Traktionsantrieb erfordert umfassende elektromagnetische und thermische Berechnungen.

Das IAL verfügt über eine umfangreiche Softwarebibliothek mit selbst entwickelten Programmen zum Entwurf und zur Nachrechnung verschiedener Arten elektrischer Maschinen, zur Simulation des dynamischen Verhaltens elektrischer Antriebe und zur Vorausberechnung wichtiger parasitärer Effekte. Diese Programme werden von verschiedenen Firmen im In- und Ausland genutzt und haben sich durchweg im industriellen Einsatz bewährt. Basierend auf den am IAL geleisteten Vorarbeiten wird in diesem FVA-Projekt ein anwenderfreundliches und fahrzeugspezifisches Softwarepaket zur Untersuchung des Hauptantriebes für die Elektromobilität entwickelt. Fragen nach dem wirtschaftlichen Optimum bei der Festlegung des Kupferfüllfaktors sollen damit z.B. ebenso effizient lösbar sein wie die Beurteilung der zu erwartenden Wirkungsgradverschlechterung bei übermäßiger Erhöhung der Ausnutzungsfaktoren.

Es wird eine Softwarelösung vorgestellt, die eine effiziente und anwenderfreundliche Berechnung von Kennfeldern für PM-Synchronmaschinen ermöglicht. Dabei wird der Fokus auf die wirkungsgradoptimierte Betriebsführung gelegt, welche mittels idealer Vorgabe der charakteristischen Stellgrößen erreicht wird.

Das neu entwickelte Berechnungsprogramm PMOK automatisiert zunächst die notwendigen numerischen Feldberechnungen (Abb. 1). Dabei werden alle notwendigen Maschinenparameter, wie beispielsweise die sättigungsabhängigen

## Increased Torque Density

by Dipl.-Ing. André Brune

Electric motors with variable speed become more and more important when used as main drives in electric or hybrid vehicles. The assumed quantities to be produced in future mass production are considerably higher than those typical for present industrial motors with the same torque. From the economical point of view, their production consequently requires a much higher degree of automation. To achieve an economical optimum, highly automated manufacturing processes are only possible by use of efficient calculation methods and in close co-operation with experts in machine tools and winding technology. Comprehensive electromagnetical and thermal calculations are needed to evaluate, if new designs are suitable for an application as a traction motor.

In the last decades, the IAL has developed a variety of software programs, suitable for the design and calculation of different types of electrical machines, the simulation of the dynamic behaviour of electric drives and the prediction of important parasitic effects. These programs are applied by many companies in Germany and abroad, having consistently proved their reliability in industrial applications. Based on the research work already done at the IAL, this FVA project aims at developing a user-friendly and vehicle-specific software for evaluating main motors for road vehicles. The approach shall efficiently handle requests like the economical optimum when determining the copper fill factor as well as the possible evaluation of a potential efficiency degradation in case of excessively high utilization factors.

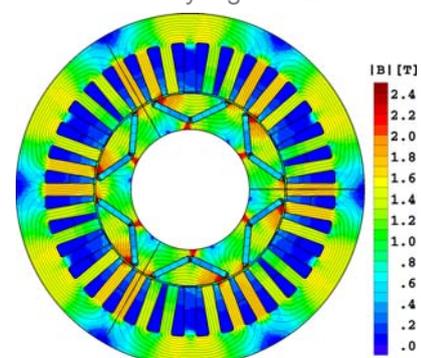


Abb. 1: FEM-Identifikation der Maschinenparameter  
Fig. 1: FEM identification of machine parameters

The software solution presented here offers an efficient and user-friendly calculation of characteristics for PM synchronous machines. The focus is laid on an efficiency-optimised supply and control which is achieved by optimally determining the characteristic input values.

The newly developed calculation program PMOK first automates all necessary numerical field calculations (fig. 1), determining for this purpose all necessary machine parameters, as for example the saturation-dependent q- and d-axis inductances. Fig. 2 shows the dependency of the respective inductance on the current vector of the stator.

After determination of the machine parameters, the M-n characteristics are calculated analytically. In this way, time-intensive numerical FE calculations are limited to a minimum. In the post-processing phase, the target characteristics can be recalculated with modified parameters, for example the stator resistance or the number of turns, within a few seconds. The special feature of the selected calculation approach is that the total losses are kept to a minimum. While the well-known MTPA trajectory method (max. torque per ampère) merely considers  $I^2R$  losses in the stator, here hysteresis and eddy-current losses within the core and additionally eddy current losses within the permanent magnets are taken into account, too. Fig. 3 exemplarily shows an efficiency map calculated by use of the program PMOK.

A similar approach is developed for electrically excited synchronous motors and induction motors, as well.

Induktivitäten der Längs- und Querachse identifiziert. In Abbildung 2 ist die Abhängigkeit der jeweiligen Induktivität vom Ständerstromvektor verdeutlicht.

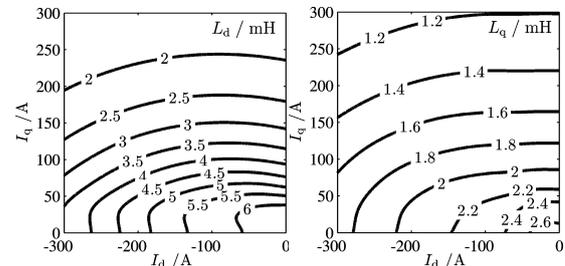


Abb. 2: Längs- und Querinduktivität

Fig. 2: d- and q-axis inductance

Nachdem die Maschinenparameter bekannt sind, erfolgt die analytische Berechnung der M-n-Kennfelder. Die zeitintensiven numerischen FE-Berechnungen werden dadurch auf ein Minimum begrenzt. Im Postprocessing können die Zielkennfelder mit veränderten Parametern bspw. des Ständerwiderstandes oder der Windungszahl innerhalb weniger Sekunden neu berechnet werden. Die Besonderheit beim gewählten Verfahren der Kennfeldberechnung liegt in der Minimierung der Gesamtverluste. Während beispielsweise das bekannte Verfahren der MMPA-Trajektorien (maximales Moment pro Ampere) lediglich die Ständerstromwärmeverluste berücksichtigt, werden zusätzlich noch die Ummagnetisierungsverluste sowie Verluste durch Wirbelströme innerhalb der Permanentmagnete betrachtet. Ein Beispiel für ein so berechnetes Wirkungsgradkennfeld zeigt Abb. 3.

Ähnliche Berechnungssoftware wird auch für elektrisch erregte Synchronmaschinen und für Induktionsmaschinen entwickelt.

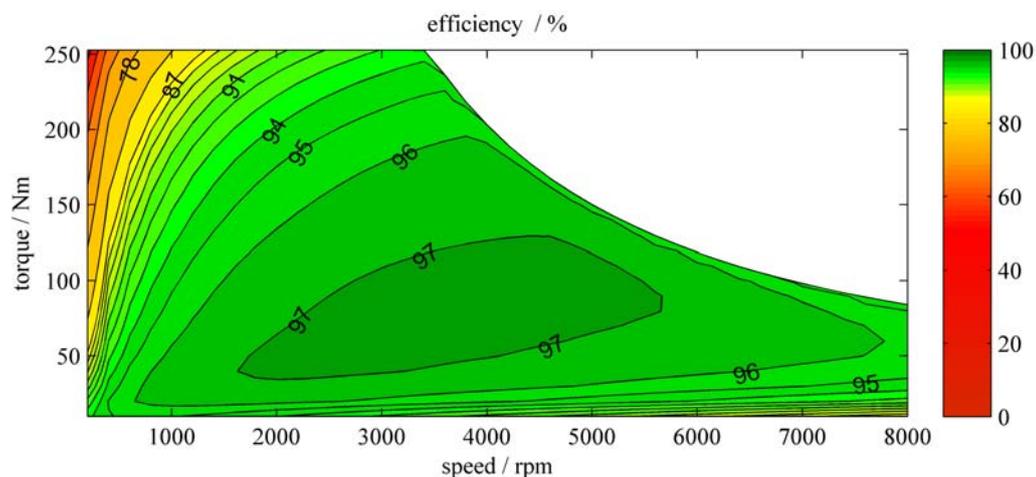


Abb. 3: Wirkungsgradkennfeld einer PMSM

Fig. 3: Efficiency map of a PMSM

## Thermische Modellbildung

von Dipl.-Ing. Thorsten Getschmann

Die sogenannte Elektrotraktion stellt den Elektromaschinenbau in den letzten Jahren vor neue Herausforderungen. Auf Grund des geringen zur Verfügung stehenden Bauraums und geforderter hoher Leistungsdichten kommen hochausgenutzte Drehstromantriebe zum Einsatz. Neben dem elektromagnetischen Entwurf ist die thermische Betrachtung des Antriebs sowohl im stationären als auch im dynamischen Betrieb bereits im Entwurfsstadium von besonderer Bedeutung.

Ziel der thermischen Modellierung ist es, aus den geometrischen Eckdaten des elektromagnetischen Entwurfs, dem beabsichtigten Kühlkonzept sowie bekannten thermischen Materialeigenschaften ein transientes thermisches Modell zu erstellen. Mit Hilfe der zu erwartenden Verluste wie Kupfer-, Eisen- und Reibungsverlusten werden die Temperaturverläufe verschiedener Bauteile innerhalb der elektrischen Maschine ermittelt und ihre thermische Belastung überprüft.

Thermische Modelle lassen sich unter anderem in Form eines Wärmequellennetzwerks oder einer FEM-Modellierung realisieren. Die FEM-Modellierung bietet den vermeintlichen Vorteil einer höheren Genauigkeit. Dieser Vorteil wird jedoch durch die bei beiden Ansätzen erforderlichen Annahmen zu Strömungsverhältnissen und Kontaktwiderständen aufgehoben. Aufgrund der geringeren Rechenzeit wird daher der analytische Ansatz eines Wärmequellennetzwerks weiterverfolgt.

Bei dem Aufbau des Wärmequellennetzwerks werden die Symmetrieeigenschaften der elektrischen Maschine berücksichtigt. Vereinfachend wird davon ausgegangen, dass der Motor im Wesentlichen aus ineinander geschichteten Hohlzylindern besteht, die bei Bedarf feiner aufgeteilt (Wicklung ↔ Zahn) oder in weitere Dimensionen ergänzt (z.B. Wicklungskopf) werden können (siehe Abb. 1).

Die Lagen gliedern sich z. B. bei permanent-erregten Synchronmaschinen wie folgt:

1. Gehäuse mit Kühlkanälen, 2. Joch des Statorblechpakets, 3. Zähne des Stators, 4. Wicklung in der Nut des Stators, 5. Wicklungskopf, 6. Bandage, 7. Magnete, 8. Rotorjoch, 9. Welle

Aufgrund der untereinander isolierten Elektrobleche ergeben sich unterschiedliche Wärmeübergangswiderstände in radialer und axialer Rich-

## Thermal Modelling

by Dipl.-Ing. Thorsten Getschmann

In the last few years, the so-called electrical traction has born a variety of new challenges for manufacturers of electrical machines. Limited installation space and the demand for high power density are the reasons for the application of highly utilised multi-phase drives. Supplementary to the electromagnetic design, drives must also be examined thermally, and this already in the design phase during steady-state and dynamic operation.

Thermal modelling aims at developing a transient thermal model, based on the geometrical key data of the electromagnetic design, the chosen cooling concept as well as on the thermal material properties already known. Under consideration of potential losses like copper, iron or friction losses, the temperature curves are determined for different components of an electrical machine, and their thermal load is checked.

Thermal models can for example be realised via thermal equivalent circuit models or FEM models. FEM modelling seems to be more favourable due to its higher accuracy. This advantage is however irrelevant, as assumptions have to be made for both approaches with respect to flow conditions and contact resistances. Here, the analytic approach of thermal equivalent circuit models is favoured due to its lower computation time.

When designing a thermal equivalent circuit model, the symmetrical properties of electrical machines are considered. For the sake of simplicity, the motor is assumed to consist of hollow cylinders layered into one another, which can be distributed more finely (winding ↔ tooth) or enhanced by further dimensions (e. g. end winding), as needed (see fig. 1).

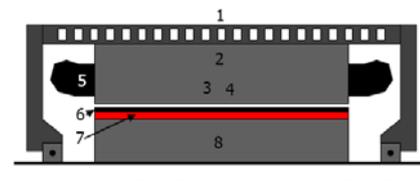


Abb. 1: Längsschnitt einer PMSM

Fig. 1: Longitudinal section of a PMSM

For permanent magnet synchronous machines, the layers are as follows:

1. frame with cooling channels, 2. yoke of stator core, 3. stator teeth, 4. winding in the

stator slot, 5. end winding, 6. bandage, 7. magnets, 8. rotor yoke, 9. shaft

As all magnetic steel sheets are insulated against each other, the heat transfer resistances are different in radial and axial direction. Compared to the radial one, the heat transfer in axial direction can be neglected except for the end winding. For this reason, the heat flow within the core is assumed to be in radial direction, except for the heat transfer from winding towards teeth. In axial direction, only the heat flow in the shaft and from the end winding is considered. The influence of the end winding and the heat transfer in the air gap depend on the flow conditions and are defined by empirical formulas proportional to speed.

When enhancing the plot by heat capacitances, a simulation of transient heating processes is possible (see fig. 2). The capacitances can easily be determined by predefined geometrical and material data.

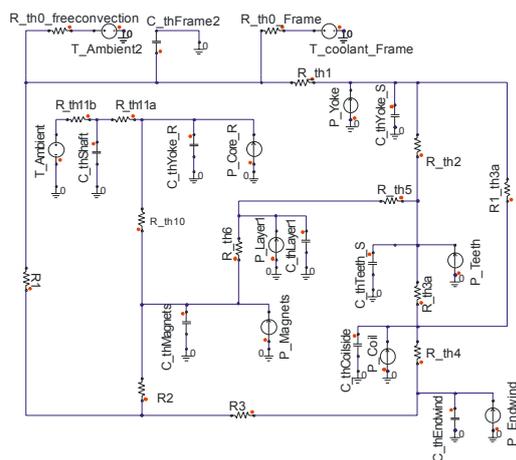


Abb. 2: Wärmequellennetzwerk der PMSM  
Fig. 2: Thermal equivalent circuit model of a PMSM

With some small adaptations, this model made for a PMSM can also be used for induction machines or electrically excited synchronous machines.

Despite the simplifications mentioned above, verification at an induction machine with forced cooling leads only to deviations below 4 % between measurement and simulation (see fig. 3). The sensitivity check showed a strong dependence of winding temperature on insulation thickness. Based on empirical values derived from comparable winding systems, winding temperatures can be predicted quite precisely to some Kelvin.

Enhanced by the specification of loss curves, the model allows the thermal examination of complete operation cycles, an increased winding resistance being considered by a feedback of the winding temperature.

Der Wärmetransport in axialer Richtung ist gegenüber dem radialen abgesehen vom Wicklungskopf vernachlässigbar. Innerhalb des Blechpaketes wird aus diesem Grund mit Ausnahme des Wärmeübergangs von der Wicklung zu den Zähnen ausschließlich radialer Wärmefluss unterstellt. In axialer Richtung wird nur der Wärmefluss in der Welle und vom Wicklungskopf her berücksichtigt. Der Einfluss der Stirnräume und der Wärmeübergang im Luftspalt sind von den Strömungsverhältnissen abhängig und werden über drehzahlproportionale empirische Formeln beschrieben.

Durch die Ergänzung des Netzwerks mit Wärmekapazitäten ist die Simulation von transienten Erwärmungsvorgängen möglich (siehe Abb. 2). Die Kapazitäten sind durch vorgegebene Geometrie- und Materialdaten leicht zu bestimmen.

Das hier anhand einer permanenten Synchronmaschine vorgestellte Modell lässt sich mit geringen Anpassungen der Struktur des Wärmequellennetzwerks auch für Induktionsmaschinen oder elektrisch erregte Synchronmaschinen verwenden.

Trotz der obigen Vereinfachungen zeigten sich bei der Verifikation an einer fremdbelüfteten Induktionsmaschine nur Abweichungen im Bereich unter 4% zwischen Messung und Simulation (siehe Abb. 3). Anzumerken sei die bei der Sensibilitätsanalyse untersuchte starke Abhängigkeit der Wicklungstemperatur von der Isolationsdicke. Mit Erfahrungswerten von vergleichbaren Wicklungssystemen lassen sich auch die Wicklungstemperaturen bis auf wenige Kelvin genau vorhersagen.

Erweitert um die Vorgabe von Verlustverläufen bietet das Modell die thermische Betrachtung ganzer Fahrzyklen, wobei die Erhöhung des Wicklungswiderstands durch die Rückführung der Wicklungstemperatur berücksichtigt werden kann.

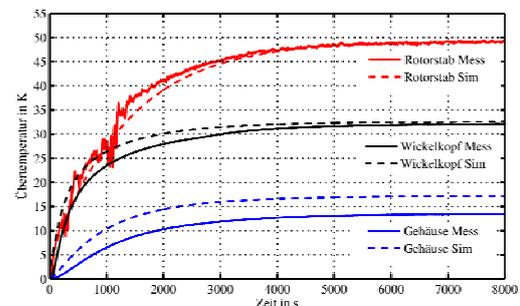


Abb. 3: Vergleich von Messung und Simulation an einer fremdbelüfteten IM  
Fig. 3: Comparison of measurement and simulation of induction machines with forced cooling

## Neues in und von FEMAG

von Dr.-Ing. Jörn Steinbrink

FEMAG kann nun inzwischen auf fast 30 Jahre industriellen Einsatz zurückblicken. Die weite Verbreitung dieser Software bei Herstellern und Anwendern elektrischer Maschinen ist sicher darin begründet, dass die Entwicklung des Programms konsequent auf die Erfordernisse der Anwender ausgerichtet und die Weiterentwicklung durch die Kenntnis der Funktionsweise elektrischer Maschinen flankiert ist. Eine schnelle zugeschnittene Berechnung und dem Bedarf angepasste Analyse der Berechnungsergebnisse zeichnet FEMAG aus. So ist im Laufe vieler Jahre vornehmlich durch den unermüdlichen Einsatz von Prof. Reichert ein sehr effektives, schnelles und zuverlässiges Werkzeug zur Berechnung jeder Art von elektrischen Maschinen entstanden.

Das FEMAG-Anwendertreffen hat sich in den letzten Jahren als eine feste Einrichtung etabliert. Das steigende Interesse an der numerischen Berechnung mittels FEMAG und an dessen Einsatz zeigt sich auch in den hohen Teilnehmerzahlen von 120 bzw. 145 Ingenieuren von verschiedenen Firmen und Hochschulen zumeist aus dem deutschsprachigen Raum. Durch die freundliche Unterstützung der Ausrichtung der Veranstaltung durch die Wittenstein cyber motor GmbH im Jahre 2010 und durch die ebm-papst Mulfingen GmbH in diesem Jahr jeweils am Firmensitz wurde das Anwendertreffen eine gelungene Veranstaltung. Parallel zur Anzahl der Teilnehmer wuchs auch die Anzahl der Vorträge zur Entwicklung und zum Einsatz von FEMAG, die wie gewohnt auf der FEMAG-Homepage [www.femag.de](http://www.femag.de) zum Download bereitstehen.

Ein wiederkehrendes Thema ist die Modellierung magnetischer Werkstoffe mit dem Magnetisierungs- und zunehmend dem Verlustverhalten unter realen Einsatzbedingungen. So ist eine genaue Kenntnis der Magnetisierungskennlinie im Sättigungsbereich für die Berechnung von Maschinen mit eingebetteten Magneten ebenso wichtig wie für die Berechnung von Induktionsmaschinen. Aufgrund der zentralen Bedeutung der Materialkennwerte und der steigenden Notwendigkeit einer exakten Vorausberechnung der Verluste war beim Anwendertreffen 2011 ein Schwerpunkt die Eigenschaften von magnetischen Materialien. Thematisiert wurden auch die technischen Lösungen und Reaktionen auf die gestiegenen Rohstoffpreise vor allem bei

## Novelties around FEMAG

by Dr.-Ing. Jörn Steinbrink

In the meantime, FEMAG is being used in industrial applications for nearly 30 years. The common use of this software by manufacturers and users of electrical machines has surely its reason in the consequent and user-oriented program development, complemented by a profound knowledge of the functioning of electrical machines. FEMAG is distinguished by fast calculation processes, the calculation results being analysed and tailored to the particular needs. Within the course of the last years and thanks to the persistent commitment of Prof. Reichert, FEMAG has turned out to be a very effective, fast and reliable tool for calculating electrical machines of any kind.

The FEMAG user meeting could be established as a fixed event during the last years. The increasing demand for numerical calculations via FEMAG and its practical use is also proved by the high number of participants of 120 to 145 engineers coming from numerous companies and universities of the mainly German-speaking area. Thanks to the kind support of Wittenstein cyber motor GmbH in 2010 and ebm-papst Mulfingen GmbH in 2011, the user meetings arranged at their head offices have been very successful events. In parallel to the number of participants, the number of presentations increased, too, dealing with FEMAG developments and applications. As usual, the presentations can be downloaded on the FEMAG homepage [www.femag.de](http://www.femag.de).

A recurrent subject is the modelling of magnetic materials with the magnetising and increasingly with the loss behaviour under real operating conditions. A good knowledge of the magnetising curve in the saturation range is as important for the calculation of machines with embedded magnets as for the calculation of induction machines. Due to the central importance of the material characteristics and the increasing necessity of an exact loss prediction, one focus of the user meeting 2011 was laid on the properties of magnetic materials. A central theme also were the technical solutions and reactions on the increased material price, above all for NdFeB magnets.

Besides a large variety of user presentations dealing with FEMAG applications and novel-

ties around FEMAG, a special highlight of this year's user meeting was the linkage of FEMAG to different analytical programs.

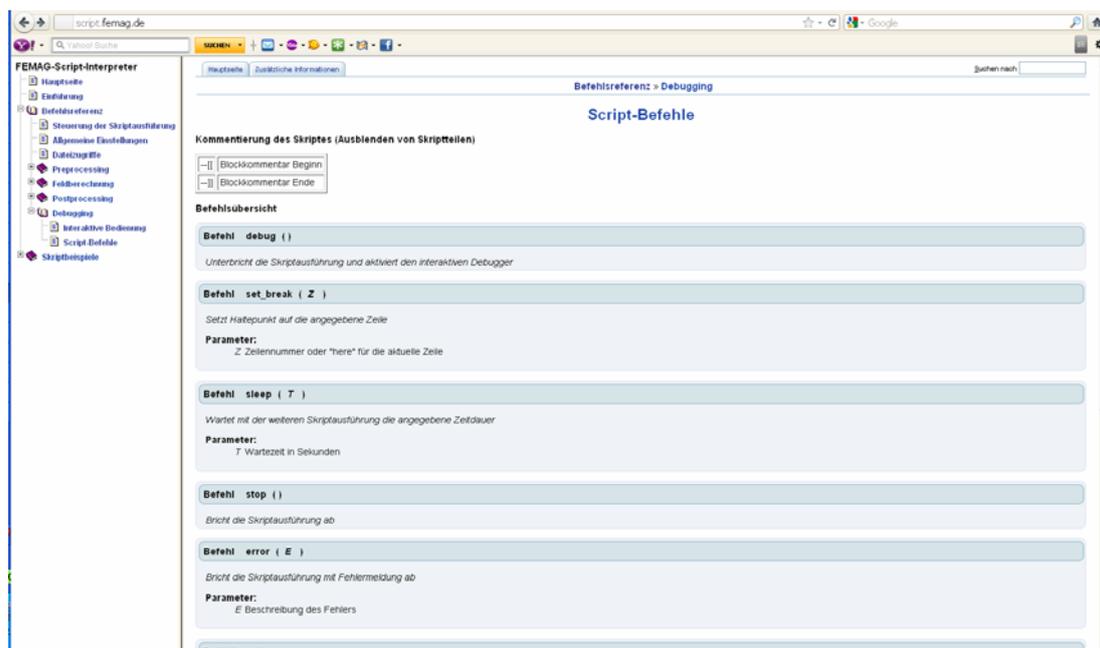
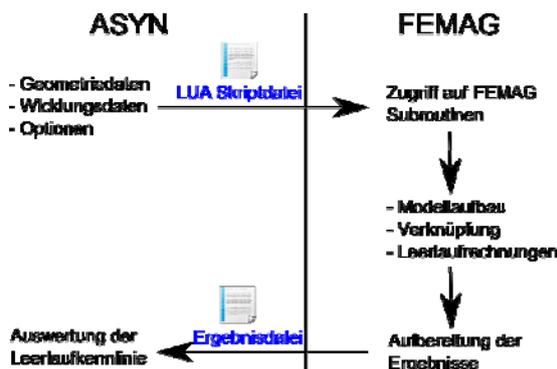
During the last years, one major focus was the further development of the script language. For this purpose, the calculation routines were enhanced by numerous scriptable fast calculations. Besides script recording during the use of FEMAG, a script debugging is meanwhile available. Moreover, it was also worked on map calculation, continuously enhanced CAD parameter models and enhanced force evaluation via virtual displacement. During analysis, the induction characteristic of each finite element can for example be shown, and based on this, further evaluations, as for example the determination of the loss distribution, can be realised.

In the period to come, IAL will be working on a further linkage of analytical calculation programs with FEMAG and its integration in complex calculation tools. In addition, the existing draft of FEMAG TS developed for transient calculations will be completed.

NdFeB-Magneten. Außerdem wurde neben zahlreichen Anwendervorträgen zum Einsatz von FEMAG und den Neuerungen in FEMAG auf dem Anwendertreffen die Verknüpfung von FEMAG mit verschiedenen analytischen Programmen vorgestellt.

In den letzten Jahren lag ein Entwicklungsschwerpunkt von FEMAG im Ausbau der Scriptsprache. Hierzu wurden die Berechnungsroutinen um zahlreiche scriptfähige Schnell-Berechnungen ergänzt. Verfügbar ist neben der Script-Aufzeichnung während der Anwendung inzwischen auch ein Script-Debugging. Weiterhin wurde an der Kennfeldberechnung, der regelmäßigen Erweiterung der CAD-Parametermodelle und der Erweiterung der Kraftauswertung über die virtuelle Verschiebung gearbeitet. In der Analyse können u. a. der Induktionsverlauf jedes finiten Elementes dargestellt und darauf basierend weitere Auswertungen wie die Bestimmung der Verlustverteilung vorgenommen werden.

In der kommenden Periode wird am IAL an der weiteren Verknüpfung von analytischen Berechnungsprogrammen mit FEMAG und dessen Einbettung in komplexen Berechnungswerkzeugen gearbeitet, aber auch die vorliegende Arbeitsversion von FEMAG TS für transiente Berechnungen fertig gestellt werden.



## Positionsgeberlose Regelung von permanentmagneterregten Synchronmaschinen

von Dipl.-Ing. Karsten Wiedmann

Am IAL wird seit mehreren Jahren der positionsgeberlose Betrieb von permanentmagneterregten Synchronmaschinen (PMSM) untersucht. Im unteren Drehzahlbereich wird eine anisotropiebasierte Rotorlageschätzung durchgeführt. Mit anderen Worten wird die Abhängigkeit der Stranginduktivitäten von der Rotorlage ausgewertet. Im oberen Drehzahlbereich basiert die Rotorlageschätzung auf der Auswertung der EMK.

Der geberlose Betrieb von PMSM stellt seit über 20 Jahren einen Schwerpunkt auf dem Forschungsgebiet geregelter Antriebe dar. Zahlreiche Veröffentlichungen haben sich mit grundlegenden Verfahren (HF-Injektionen, INFORM-Methode, etc.) und der Minderung störender Einflüsse befasst. Die im Folgenden aufgeführten Punkte verdeutlichen, welche Themengebiete noch immer eine Herausforderung darstellen:

1. In der Regel beruhen die anisotropiebasierte und EMK-basierte Rotorlageschätzung auf einer unterschiedlichen Ausgangsstruktur, was oftmals deren Kombination bzw. den Übergang der Verfahren erschwert und die benötigte Rechenleistung erhöht.
2. Bei anisotropiebasierter Verfahren ist es entscheidend, den Einfluss einer dynamischen Stromregelung gering zu halten, damit die Dynamik der übergeordneten Drehmoment- bzw. Drehzahlregelung nicht gemindert werden muss. Hierfür sind in der Regel die Kenntnis des sättigungsabhängigen Verlaufs der Induktivitäten und/oder aufwendige Filterstrukturen notwendig.
3. Die geberlose Systemidentifikation ist von entscheidender Bedeutung, um Einflüsse wie z.B. Sättigungseffekte (s. Punkt 2), Oberwelleneffekte oder nichtlineare Effekte des Umrichters berücksichtigen bzw. mindern zu können.
4. Die Rechenintensität der angewendeten Verfahren, soll möglichst gering gehalten werden. Oftmals werden Verfahren vorgeschlagen, die Divisionen durch variable Größen bzw. Matrizeninversionen beinhalten.

Die Berücksichtigung aller aufgeführten Aspekte in einem Verfahren bzw. in einer methodischen Vorgehensweise ist äußerst komplex und trägt

## Self-Sensing Control of Permanent Magnet Synchronous Machines

by Dipl.-Ing. Karsten Wiedmann

For several years already, the IAL is doing research work on sensorless control of permanent magnet synchronous machines (PMSM). In this respect, an anisotropy-based estimation of the rotor position is carried out for the lower speed range. In other words, the dependency of the phase inductances on the rotor position is evaluated. For higher speeds, the estimation of the rotor position is based on EMF evaluation.

Sensorless control of PMSMs has been a main research focus in the field of drive control for more than 20 years. Numerous publications have dealt with basic methods like HF injection, INFORM method, etc. and the mitigation of possible distortions. Those topics that still require more research work to be done, are specified in the following:

1. In general, anisotropy-based and EMF-based estimations of the rotor position rely on different structures, thus often complicating the combination of different methods and increasing the calculation time.
2. For anisotropy-based methods, it is important to minimise the influence of a dynamic current control, so that the dynamics of the superior torque and speed control need not be reduced. This generally requires the knowledge of the saturation-dependent inductance and/or elaborate filter structures.
3. Sensorless system identification is of great importance in order to consider or minimise the influence of saturation effects (see item 2), multiple saliencies or nonlinearities of the converter.
4. The calculation time of the methods in use shall be kept to a minimum. But many of the proposed methods include divisions by variables or matrix inversions.

Considering all of these aspects in one method is quite difficult. This is one reason why sensorless control in PMSMs has not become as accepted in industrial applications as would actually be possible. In general, a good knowledge of the drive system is required, in order to obtain sensorless control of

sufficient quality.

As part of a PhD dissertation, a method was developed at IAL which is much more advantageous with respect to the criteria mentioned above, compared to the state-of-the-art. The method is based on the Model Reference Adaptive System (MRAS) approach, where a flux observer monitors the stator flux linkage. Based on the observer's estimation error, the rotor position for the complete speed range as well as crucial system parameters can be identified. For this purpose, the gradient descent method is used which is known for its low computational effort. This self-sensing MRAS (SS-MRAS) approach is of modular design. Particular features, like for example the identification of transient inductances in the operating point or the reduction of harmonic effects, can be considered additionally, if the drive system is not sufficiently well known. In this respect, an autocommissioning was developed for motors at zero speed, where no specific operating points have to be assumed.

The method was tested on a test bench at IAL, the drive system however not being measured in advance. In spite of high saturation effects, a sensorless operation for the complete speed range could be realised at maximum load, which is shown in fig. 1 and 2. The rotor speed was accelerated and decelerated to its maximum, respectively. The initial speed is 5 Hz el. (0,9%  $n_N$ ), the final speed is  $-5$  Hz. The maximum estimation error of the rotor position is obtained during the dynamic changes, but does never exceed  $15^\circ$  el.

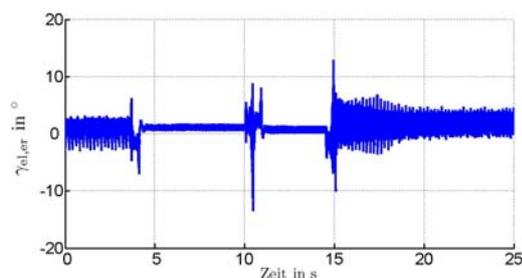


Abb. 1: Elektrische Rotorlageschätzfehler  
Fig. 1: Estimation errors of the electrical rotor position

dazu bei, dass sich die geberlose Regelung von PMSM in industriellen Anwendungen noch nicht in einem Maße durchgesetzt hat, wie es prinzipiell möglich wäre. In der Regel ist eine gute Vorabkenntnis des Antriebssystems (AS) notwendig, um einen geberlosen Betrieb ausreichender Güte zu gewährleisten.

Im Rahmen einer Dissertation wurde am IAL ein Verfahren entwickelt, das hinsichtlich der aufgeführten Kriterien entscheidende Vorteile gegenüber dem Stand der Technik erzielt. Das Verfahren basiert auf dem Model Reference Adaptive System (MRAS)-Ansatz, wobei ein Flussbeobachter der Ständerflussverkettung die Grundlage bildet. Anhand des Beobachterschätzfehlers lassen sich sowohl die Rotorlage für den gesamten Drehzahlbereich als auch entscheidende Systemparameter identifizieren. Hierfür wird u. a. das Gradientenabstiegsverfahren herangezogen, das für seine geringe Rechenintensität bekannt ist. Dieses „Self-Sensing“-MRAS (SS-MRAS) ist modular aufgebaut. Einzelne Features, wie z. B. die Identifikation der transienten Induktivitäten im Arbeitspunkt oder Minderung von Oberwelleneffekten, können bei Bedarf hinzugezogen werden, wenn das AS nur unzureichend bekannt ist. In diesem Zusammenhang wurde ebenfalls ein Autocommissioning für den Stillstand der Maschine entwickelt, für das keine speziellen Betriebspunkte angefahren werden müssen.

Das Verfahren wurde an einem Prüfstand des IAL getestet, wobei das AS zuvor nicht vermessen wurde. Trotz starker Sättigungseffekte wurde bei maximaler Belastung ein geberloser Betrieb für den gesamten Drehzahlbereich realisiert, was durch Abb. 1 und 2 verdeutlicht wird. Für das abgebildete Drehzahlprofil wurde der Rotor maximal beschleunigt bzw. abgebremst. Startwert der Drehzahl ist 5 Hz elektrisch (0,9%  $n_N$ ), der Endwert beträgt  $-5$  Hz. Der maximale Rotorlageschätzfehler tritt während der dynamischen Vorgänge auf, überschreitet jedoch zu keinem Zeitpunkt einen Wert von  $15^\circ$  elektrisch.

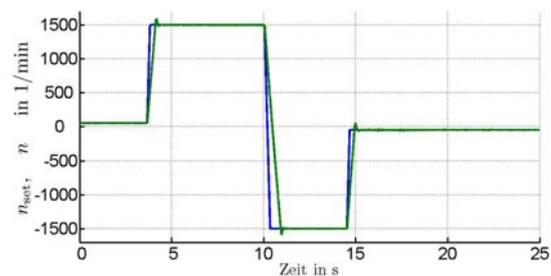


Abb. 2: Mechanische Rotordrehzahl  
Fig. 2: Mechanical rotor speed

## Auslegung eines LCL-Filters für Umrichter mit niedriger Schaltfrequenz in dezentralen Erzeugungsanlagen

von Dipl.-Ing. Robert Meyer

Bedingt durch die knappen Reserven an fossilen Energieträgern und das steigende Umweltbewusstsein haben regenerative Energiequellen wie Windenergieanlagen oder PV-Anlagen in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung gewonnen. Ein Großteil dieser Anlagen speist die erzeugte Energie dezentral über Umrichter in das allgemeine Energieversorgungsnetz ein. Durch die stetig wachsende Leistung der Erzeuger geht der Trend dabei zu einer direkten Einspeisung in das Mittelspannungsnetz.

Zur Reduzierung der Umrichterverluste wird häufig versucht, die Schaltfrequenz der Halbleiter zu minimieren. Eine weitere Möglichkeit, die mittlere Schaltfrequenz zu reduzieren, ist ein diskontinuierliches Modulationsverfahren, wie die Flat-Top-Modulation. Beide Ansätze führen zu signifikanten Oberschwingungen im gesamten Frequenzbereich, was eine Filterauslegung deutlich erschwert. Aus diesem Grund wurde am IAL ein Auslegungsverfahren für LCL-Filter entwickelt, mit dem die zulässigen Oberschwingungen in allen notwendigen Betriebspunkten der Anlage eingehalten werden können. Es kann für alle Umrichtertopologien und für alle Modulationsverfahren mit periodischer Ausgangsspannung verwendet werden. Durch einfache Modifikationen ist es möglich, das Verfahren an individuelle Randbedingungen anzupassen. So ist es beispielsweise ohne weiteres möglich, ein Filter auf den Strom- oder Spannungs-THD-Wert zu optimieren.

Das Verfahren basiert auf einer analytischen Berechnung des Worst-Case-Umrichterspektrums. Das Worst-Case-Spektrum beinhaltet für einen definierten Bereich des Modulationsgrades die Maxima der Spannungsamplituden der auftretenden Harmonischen. In Abb. 1 ist dieses beispielhaft für einen Bereich von  $m = 0,75$  bis  $1,05$  dargestellt. Mit Hilfe der komplexen Filterübertragungsfunktion lässt sich daraus das Worst-Case-Spektrum am Netzanschlusspunkt (PCC) berechnen und auf die Grundschwingung beziehen (Abb. 2). Der Vorteil dieses Verfahrens ist, dass es nicht notwendig ist, einzelne Be-

## Design of LCL Filters for Converters with Low Switching Frequency Used in Decentralised Power Generating Plants

by Dipl.-Ing. Robert Meyer

Due to the limited reserves of fossil energies and an increasing environmental awareness, regenerative energy sources like wind turbines, photovoltaic power plants or biogas plants have gained more and more importance within the last years. Most of the energy generated by such plants is decentrally fed via converters into the public mains. Due to the constant increase in generated power, the trend is to feed it directly into the medium-voltage grid.

In order to reduce the converter losses, it is often tried to minimise the switching frequency of the semiconductors. Especially for medium-voltage converters, this leads to switching frequencies of less than 100 Hz. Another approach to reduce the medium switching frequency is to use a discontinuous modulation method, like the flat-top modulation.

Both approaches result in significant harmonics over the complete frequency range, making the filter design much more difficult. For this reason, IAL has developed a design method for LCL filters, with which the permissible harmonics can be maintained for all necessary operating points of the system. The method is suitable for all converter topologies as well as for all modulation methods with periodic output voltage. By simple modifications, it is possible to adapt the method to specific boundary conditions. Without any difficulty, it is for example possible to optimise a filter for the current or voltage THD value.

The method is based on an analytical calculation of the worst-case converter spectrum. The worst-case spectrum comprises the maximum voltage amplitudes of the occurring harmonics for a defined modulation level range. Fig. 1 shows this for a range of  $m = 0.75$  to  $1.05$ .

Using the complex filter transfer function, the worst-case spectrum can be calculated for the Point of Common Coupling (PCC), related to the fundamental frequency (fig. 2). Here it is advantageous that it is not necessary to con-

sider individual operating points. It must simply be guaranteed that all operating points are within the predicted modulation level range.

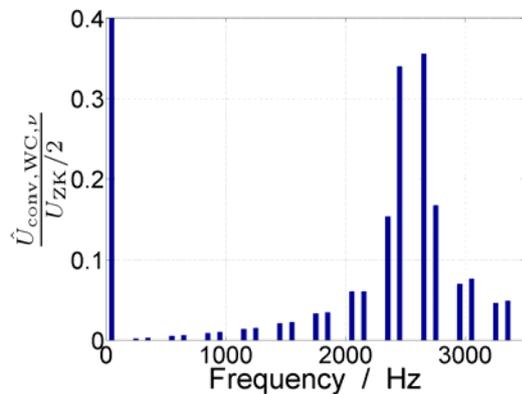


Abb. 1: Auf die halbe Zwischenkreisspannung bezogenes Spektrum der Leiter-Sternpunkt-Spannung eines 2-Punkt-Umrichters mit Flat-Top-Modulation (DPWM1) für  $f_c = 2550$  Hz

Fig. 1: Phase-neutral voltage spectrum related to half of the DC link voltage of a two-level converter with flat-top modulation (DPWM1) for  $f_c = 2550$  Hz

When comparing the calculated spectrum at PCC with the maximum permissible one, it is relatively easy to verify, if a filter dampens the harmonics to the permissible level. In addition, due to the calculation of the maximum and minimum resonance frequency of the filter, it is guaranteed that no filter resonance is excited, independent from the plant site.

When choosing the optimal filter parameters from those which meet all requirements, it must be kept in mind that high capacitances require high capacitive reactive power to be supplied by the converter. Moreover, less inductance is required for the same filter performance, resulting in a high harmonic content of the converter current. Both aspects cause a high rms value of the converter current, leading as a consequence to a bad utilisation of the converter. High inductances work against this effect. On the other hand, they provoke a large voltage drop at the filter, which must be compensated by the level of modulation or an increased DC link voltage.

An optimisation criterion is thus the energy contents of the filter inductances as an indicator of volume and weight of the filter. Due to the quadratic consideration of the converter current, a good utilisation of the converter is granted, too.

triebspunkte zu betrachten. Es muss lediglich sichergestellt sein, dass alle Betriebspunkte innerhalb des prognostizierten Modulationsgradbereiches liegen.

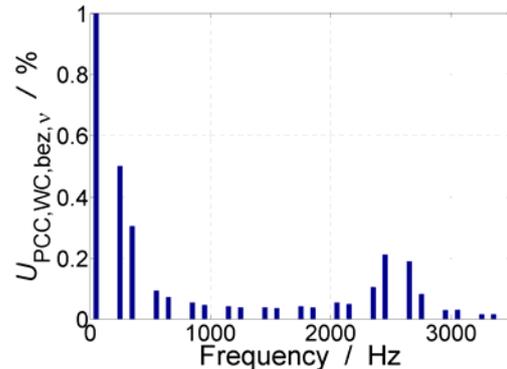


Abb. 2: Auf die Grundschwingung bezogenes Worst-Case-Spektrum der Leiter-Sternpunkt-Spannung am PCC für  $m = 0,75$  bis  $1,05$

Fig. 2: Worst-case spectrum of the phase-neutral voltage at PCC for  $m = 0.75$  to  $1.05$

Durch einen Vergleich des berechneten Spektrums am Netzanschlusspunkt mit dem maximal Zulässigen lässt sich relativ einfach prüfen, ob ein Filter die Harmonischen auf ein zulässiges Maß dämpft. Außerdem wird bei dem Verfahren durch eine Berechnung der maximalen und minimalen Resonanzfrequenz des Filters gewährleistet, dass es, unabhängig vom Standort der Anlage, zu keiner Anregung der Filterresonanz kommen kann.

Bei der Auswahl der optimalen Filterparameter aus denen, die alle Anforderungen erfüllen, ist zu beachten, dass große Kapazitäten einen hohen Bedarf kapazitiver Blindleistung bewirken, die vom Umrichter bereitgestellt werden muss. Außerdem wird bei gleicher Filterperformance eine geringere Induktivität benötigt, was zu einem hohen Oberschwingungsgehalt des Umrichterstroms führt. Beide Aspekte bewirken einen großen Effektivwert des Umrichterstroms, was eine schlechte Ausnutzung des Umrichters nach sich zieht. Große Induktivitäten wirken dem entgegen. Allerdings bewirken sie einen hohen Spannungsabfall am Filter, der durch den Modulationsgrad oder eine Anhebung der Zwischenkreisspannung kompensiert werden muss.

Als Optimierungskriterium bietet sich der Energieinhalt der Filterinduktivitäten an, der ein Indikator für die Baugröße des Filters ist. Durch die quadratische Einbeziehung des Umrichterstroms wird außerdem eine gute Ausnutzung des Umrichters gewährleistet.

## Untersuchung modularer Multilevel-Umrichter topologien

von Dipl.-Ing. Lennart Baruschka

Seit mittlerweile über drei Jahren finden am IAL Untersuchungen an modularen Multilevel-Umrichtersystemen statt. Derartige Systeme erlauben die Synthese einer Vielzahl diskreter Ausgangsspannungsniveaus, wodurch der Filterbedarf insbesondere bei Verwendung als Netzwechselrichter erheblich sinkt. Durch den modularen Aufbau verfügen entsprechende Umrichter außerdem über eine leicht skalierbare Redundanz und somit eine hohe Verfügbarkeit: Bei Defekt eines Moduls kann ein anderes, zuvor überzählig vorhandenes Modul die Aufgaben des ersten übernehmen.

Die am IAL untersuchten Topologien dienen insbesondere zwei Anwendungen: der Anbindung von Energiespeichern an das Mittelspannungsnetz sowie der Verbindung langsam drehender Generatoren mit dem Versorgungsnetz. Beide Anwendungen werden im Folgenden näher erläutert.

### Anbindung von Energiespeichern an das Mittelspannungsnetz

Während die zunehmende Leistungsfähigkeit erneuerbarer Erzeuger im Verbundnetz zu einem verringerten CO<sub>2</sub>-Ausstoß führt, stellt deren fluktuierender und nicht exakt vorhersehbarer Leistungsverlauf für das Netz auch ein Problem dar.

Zur Netzstabilisierung werden zusätzlich zu den neuen Erzeugern sowie zu den vorhandenen, fossil gespeisten Kraftwerken schnell aktivierbare Kurzzeitspeicher erforderlich.

Die zu erwartende Betriebsdauer eines solchen Kurzzeitspeichers liegt je nach Einsatz im Minutenbereich, womit sich Batteriespeicher als Lösung anbieten.

Zwei zur direkten Anbindung von Batterien an das Mittelspannungsnetz geeignete modulare Multilevel-Wechselrichtertopologien sind der kaskadierte H-Brücken Wechselrichter (CHB, Abb. 1) und der modulare Multilevel-Wechselrichter (M<sup>2</sup>LC, Abb. 2). Der wesentliche Unterschied ist, dass der CHB je Modul über eine (kleine) Teil-Batterie verfügt, M<sup>2</sup>LC hingegen über eine entsprechend größere Batterie im Gesamt-Zwischenkreis.

## Examination of Modular Multilevel Topologies

by Dipl.-Ing. Lennart Baruschka

For more than three years, modular multilevel converter systems have been examined at the IAL. Such systems allow the synthesis of numerous discrete output voltage levels, thus reducing the size of required filters, especially when used as a grid-connected converter. Due to their modular design, such converters also have an easily scalable redundancy, thus featuring a high degree of availability: Tasks of failing modules are taken over by those modules which were redundant before.

The topologies examined by IAL are especially suitable for two fields of application: the connection of energy storage systems to the medium-voltage grid as well as the connection of low-speed generators to the public power supply. Both applications are explained more detailed in the following.

### Connection of Energy Storage Systems to the Medium-voltage Grid

Although the increasing efficiency of renewable energy sources in the grid has led to less CO<sub>2</sub> emissions, their fluctuating and not precisely predictable power supply poses on the other hand a lot of problems.

To achieve power system stability, additionally to the new power sources and to the already existing power plants fed by fossil fuels, short-term storage systems are needed which are able to be activated in a minimum of time.

Depending on the application, the expected operating time of such short-term storage systems is about some minutes, so that battery storage systems seem to be a good solution.

Two modular multilevel converter topologies suitable for direct connection of batteries to the medium-voltage grid are the Cascaded H-Bridge Converter (CHB, fig. 1) and the Modular Multilevel Converter (M<sup>2</sup>LC, fig. 2). The main difference is that the CHB disposes of a (small) sub-battery in each module, and the M<sup>2</sup>LC on the other hand has a larger battery located in the overall DC link.

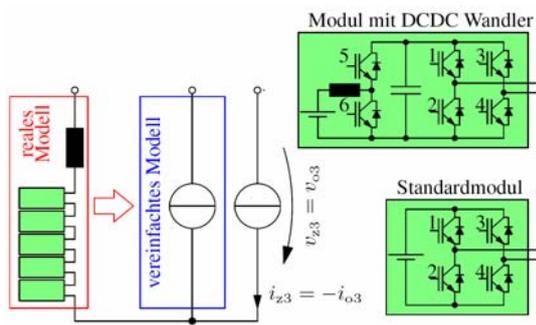


Abb. 1: Kaskadierter H-Brücken-Wechselrichter (CHB)  
Fig. 1: Cascaded H-Bridge converter (CHB)

The two topologies are analysed by means of simplified equivalent circuit diagrams, where one modular multilevel branch is replaced by one (controllable) power source respectively. The voltages and currents in the branches depend on line-side and dynamic constraints.

Depending on the topology, the considerations are based on two different types of modules, resulting in different boundary conditions. For the M<sup>2</sup>LC with half-bridge modules, the voltage in the main DC link and the battery voltage must not decrease arbitrarily, because the modules cannot generate negative voltage. Similar to this, the CHB without DC/DC converters requires a minimum battery voltage in the DC links of the modules, in order to supply the required output voltage. These constraints do not exist when using full-bridge modules (M<sup>2</sup>LC) or modules with DC/DC converters (CHB). In return, other losses are produced due to additional valves.

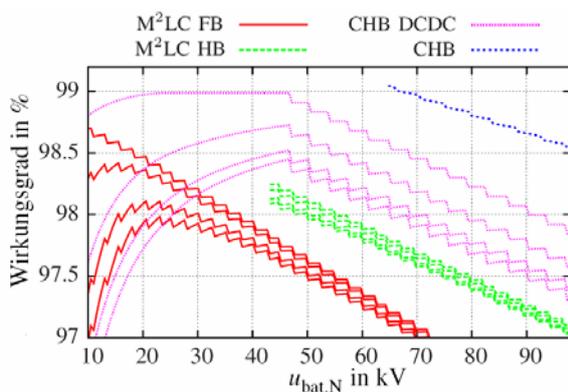


Abb. 3: Scheinleistungswirkungsgrad der untersuchten Topologien über der Bemessungsbatteriespannung; Parameter ist der Lastwinkel: Hohe Wirkungsgrade für reine Blindleistung, niedrige für reine Wirkleistung

Fig. 3: Apparent efficiency for the topologies under examination with load angle as parameter: high efficiency for only reactive power, low efficiency for only real power

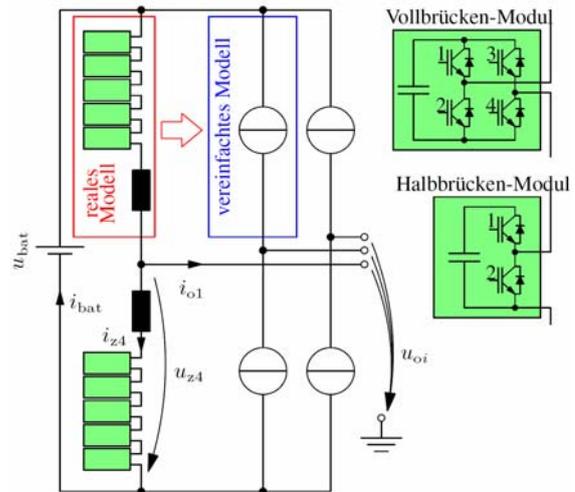


Abb. 2: Modularer Multilevel-Wechselrichter (M<sup>2</sup>LC)  
Fig. 2: Modular multilevel converter (M<sup>2</sup>LC)

Zur Analyse der beiden Topologien kommen die vereinfachten Ersatzschaltbilder zum Einsatz; hier ersetzt jeweils eine (steuerbare) Stromquelle einen modularen Multilevel-Zweig. Die Spannungen und Ströme in den Zweigen ergeben sich durch Zwangsbedingungen aus den netzseitigen sowie den regelungstechnischen Anforderungen.

Je Topologie basieren die Betrachtungen auf zwei unterschiedlichen Modultypen, woraus sich zusätzliche Randbedingungen ergeben. So darf beim M<sup>2</sup>LC mit Halbbrückenmodulen die Spannung im Haupt-Zwischenkreis bzw. die Batteriespannung nicht beliebig weit sinken, da die Module keine negative Spannung ausgeben können. Ähnlich hierzu benötigt der CHB ohne DC/DC-Wandler eine Mindestbatteriespannung in den Modulzwischenkreisen, um die erforderliche Ausgangsspannung bereitstellen zu können. Diese Einschränkungen gibt es beim Einsatz von Vollbrückenmodulen (M<sup>2</sup>LC) bzw. Modulen mit DC/DC-Wandlern (CHB) nicht, dafür fallen durch die zusätzlichen Ventile neue Verluste an.

Dies spiegelt sich in den Ergebnissen einer numerischen Simulation der vier Wechselrichtervarianten (Abb. 3) wieder, die außerdem einen höheren Wirkungsgrad für beide CHB-Varianten ergibt. Weitere Simulationen zeigen für den CHB niedrigere Halbleiterkosten, einen geringeren Energiespeicherbedarf, eine kleinere Modulanzahl und eine einfachere Realisierung des Batteriemangements, so dass der CHB die günstigere Lösungsvariante darstellt.





Abb. 4: Aufgebauter Versuchsstand: max. 100 kVA, 42 kWh  
Fig. 4: Laboratory setup: max. 100 kVA, 42 kWh

# Lebensdauer von Leistungs- halbleitern in Offshore- Windenergieanlagen

von Dipl.-Ing. Felix Fuchs

Innerhalb des Verbundprojektes „*Probabilistische Sicherheitsbewertung von Offshore-Windenergieanlagen*“ wird von Seiten des IAL unter anderem die Zuverlässigkeit der Netzanbindung untersucht. Besonders im Offshorebereich, wo Wartungs- und Reparaturarbeiten kostenintensiv und wetterabhängig sind, spielt die Zuverlässigkeit einer Windenergieanlage eine wichtige Rolle.

Ein oft verwendeter Generatortyp in Windenergieanlagen ist der doppelt gespeiste Asynchron-generator. Hier kann der sich im Rotorzweig befindende Umrichter für nur ca. ein Drittel der Gesamtleistung dimensioniert werden. Problematisch ist jedoch, dass je nach Betriebszustand rotorseitig geringe elektrische Frequenzen auftreten (ca. 0-15 Hz). Im synchronen Arbeitspunkt geht die Frequenz gegen Null. Dies erhöht die Junctiontemperaturschwankung der Leistungshalbleiter stark. In diesem Projekt wird die Auswirkung von Temperaturschwankungen auf die Lebensdauer der Leistungsmodule untersucht.

Für das gewählte System einer 2 MW-Anlage ist die Leistungscharakteristik in Abb. 1 zu sehen.

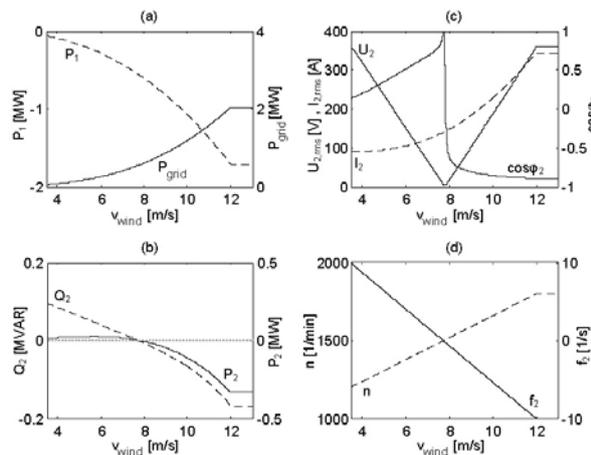


Abb. 1: (a) Stator- und Netzwirkleistung, (b) Rotorwirk- und -blindleistung, (c) Rotorspannung und -strom, (d) Rotorfrequenz und -drehzahl

Fig. 1: (a) Stator power and active line power, (b) active and reactive power of rotor, (c) rotor voltage and current, (d) rotor frequency and speed

# Lifetime of Power Semiconductors in Offshore Wind Turbines

by Dipl.-Ing. Felix Fuchs

Within the framework of the joint research project "Probabilistic Safety Assessment of Offshore Wind Turbines", IAL is amongst others involved in a reliability study concerning grid connection. Especially in offshore applications with cost-intensive and weather-dependent repair and maintenance work, the reliability of a wind turbine plays an important role.

Doubly-fed asynchronous generators are widely used in wind turbines. The converter located in the rotor branch can be dimensioned just for about one third of the total power. Nevertheless, the low level of electric frequencies (approx. 0-15 Hz) on the rotor side, depending on the operating state, is somehow problematic. In the synchronous operating point, the frequency is almost zero. This enhances the temperature variations in the power semiconductors to a large extent. Within this project, the effect of temperature variations on the lifetime of power modules is examined.

Fig. 1 shows the power characteristics of a 2 MW system which is examined here.

Two power modules were selected, and electro-thermal simulation models were created on the basis of the data sheet parameters. Based on the power characteristics, the junction temperature curves for constant wind speed were simulated for all wind speeds. Fig. 2 exemplarily shows the results for a wind speed of 7.8 m/s. The variation range of  $T_j$  for all wind speeds is indicated in fig. 3.

In a next step, the obtained temperature curves are evaluated. Based on the wind distribution of the FINO 1 measuring station located in the North Sea, the run time is determined for each wind speed. In this way, the number of temperature oscillations can be determined along with the respective average temperature and variation range.

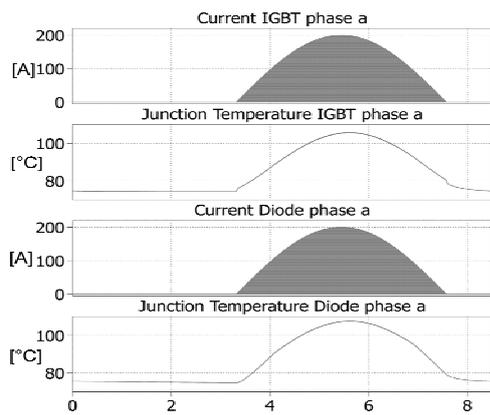


Abb. 2: Strom durch IGBT und Diode einer Phase und zugehörige Junctiontemperatur ( $v_{wind}=7,8$  m/s)  
 Fig. 2: Current through IGBT and diode of one phase and corresponding junction temperature ( $v_{wind}=7.8$  m/s)

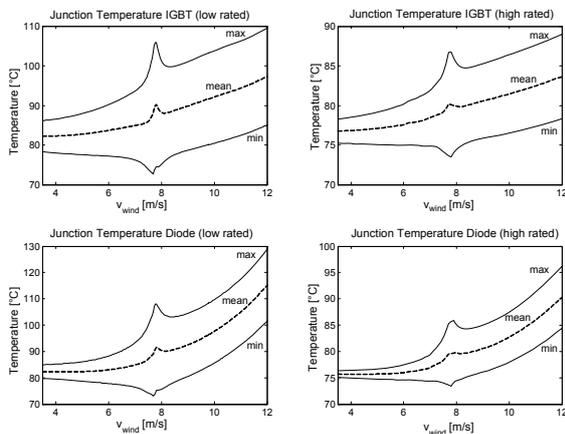


Abb. 3: Junctiontemperatur von IGBT und Diode über der Windgeschwindigkeit eines knapp (low) und eines für doppelte Leistung ausgelegten Moduls  
 Fig. 3: Junction temperature of IGBT and diode vs. wind speed of a module designed for low power and for double power

Via different drop out statistics, the elapsed lifetime is evaluated. The results are given in fig. 4.

Assuming that only steady states are considered, it can be taken for granted that the better part of the modules' lifetime under examination is consumed at nominal wind speed. The synchronous operating point can be neglected due to its minor number of temperature oscillations. Modern modules thus have a lifetime of more than the required 20 years.

In future projects, the dynamic operation of the plant will be investigated as well.

Zwei Leistungsmodule wurden ausgewählt und mit Hilfe der Datenblattangaben elektro-thermische Simulationsmodelle erstellt. Für jede Windgeschwindigkeit wurden mittels der Leistungscharakteristik die stationären Junction-Temperaturverläufe simuliert. Abb. 2 zeigt beispielhaft das Ergebnis für eine Windgeschwindigkeit von 7,8 m/s. Die Schwankungsbreite von  $T_j$  für alle Windgeschwindigkeiten zeigt Abb. 3.

Im nächsten Schritt werden die erhaltenen Temperaturverläufe ausgewertet. Basierend auf der Windverteilung der FINO 1 Messstation in der Nordsee wird die Laufzeit bei jeder Windgeschwindigkeit bestimmt. So kann die durchgeführte Anzahl von Temperaturschwankungen mit der entsprechenden mittleren Temperatur und der Schwankungsbreite bestimmt werden.

Mit verschiedenen Ausfallstatistiken wird eine Abschätzung der verbrauchten Lebensdauer vorgenommen. Das Ergebnis ist in Abb. 4 zu sehen.

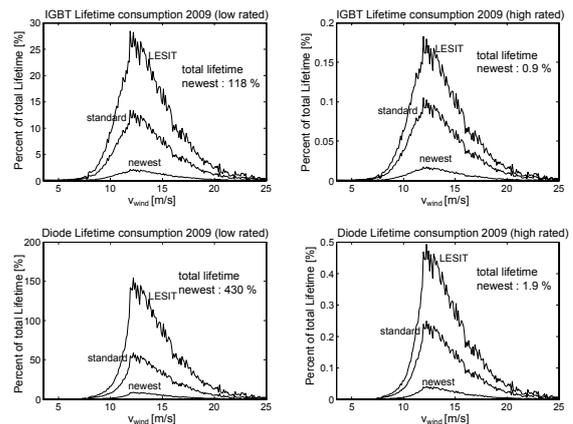


Abb. 4: Prozentualer Lebensdauerverbrauch der zwei Module in 2009  
 Fig. 4: Lifetime consumption in % for two modules in 2009

Unter der Vorbedingung, dass nur stationäre Zustände betrachtet werden, ist festzuhalten, dass der Großteil der Lebensdauer der untersuchten Module bei der Nennwindgeschwindigkeit verbraucht wird. Der synchrone Arbeitspunkt trägt aufgrund der geringen Anzahl durchgeführter Temperaturschwankungen fast nicht dazu bei. Moderne Module halten mehr als die geforderten 20 Jahre.

Im nächsten Schritt soll der dynamische Betrieb der Anlage untersucht werden.

## Adaptive digitale Gate-Ansteuerung von HV-IGBTs

von Dipl.-Ing. Harald Kuhn  
und Dipl.-Ing. Lan Dang

Im Rahmen eines DFG-Projektes konnten die Potentiale einer automatischen Optimierung des Schaltverhaltens von Hochvolt-IGBTs bei veränderlichen Betriebspunkten unter Anwendung der digitalen Technik aufgezeigt werden.

Bei konventionellen Ansteuereinheiten mit festen Gate-Vorwiderständen müssen stets weitreichende Kompromisse zwischen verschiedenen, zu optimierenden Schalteigenschaften des Bauelements getroffen werden. Es werden beispielsweise durch die Wahl eines größeren Gate-Vorwiderstands im Einschaltpfad eine Vergrößerung der gesamten Dauer des Einschaltvorgangs und der damit einhergehenden Verluste in Kauf genommen, um die Dioden-Rückstromspitze beim Einschalten großer Ströme sinnvoll zu begrenzen. Die Auslegung des Widerstands geschieht demnach nur für bestimmte Betriebspunkte bzw. -bereiche. Die Optimierung des Schaltverhaltens bezüglich verschiedener Kriterien für jeden beliebigen Betriebspunkt erfordert ein „intelligenteres“ Schalten der Halbleiter. Dieses kann mit Hilfe der in diesem Projekt entwickelten Digitalen Gate Unit (DGU) realisiert werden, ohne ausführliche Informationen über den Aufbau und die physikalischen Eigenschaften des Bauelements zu benötigen.

Anhand zeitnaher Erfassung und Auswertung relevanter Schaltsignale durch schnelle Signalwandler und eine Recheneinheit bestehend aus FPGA und Mikrocontroller kann jeder Schaltvorgang in definierten Phasen unterteilt werden. Mit Hilfe der Phasendetektion lassen sich wichtige Schaltinformationen für die Ansteuerung wie Phasendauer, Rückstromspitze, Signalableitungen usw. gewinnen (Abb. 1).

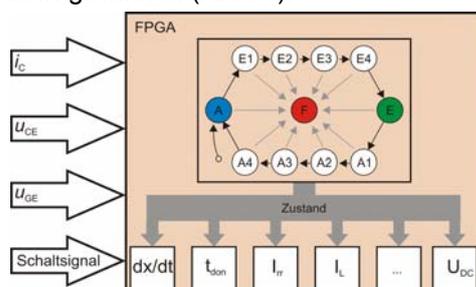


Abb. 1: Implementierte Funktionen in FPGA  
Fig. 1: Functions implemented in FPGA

## Adaptive Digital Gate Control of HV IGBTs

by Dipl.-Ing. Harald Kuhn  
and Dipl.-Ing. Lan Dang

Within the scope of a DFG-funded project, the potentials of an automated optimisation of the switching behaviour of high-voltage IGBTs with variable operating points by use of digital technology could be demonstrated.

In case of conventional gate units with constant external gate resistors, extensive compromises have to be made concerning the different switching properties to be optimised. When choosing for example a larger external gate resistor in the switching path, it is accepted that the complete switching process will last much longer, thus also enhancing the losses accompanied by it, in order to limit the diode's reverse recovery current in case of large currents. So the dimensioning of the resistance is only made for certain operating points and ranges. The optimisation of the switching behaviour concerning different criteria for each and every operating point requires a more "intelligent" switching of the semiconductor. This can be achieved by using the Digital Gate Unit (DGU) developed in this project, without requiring detailed information on the design and the physical properties of the device.

With the help of a short-term detection and evaluation of relevant switching signals by means of high-speed signal converters and a processing unit consisting of FPGA and microcontroller, each switching operation can be divided into specific phases. Due to the phase detection, important switching details can be derived for the control like for example phase duration, reverse recovery current, signal derivatives, etc. (fig. 1).

For controlling individual variables to be optimised, as for example voltage and current slope, a voltage-controlled current source is used, providing a constant value in the respective switching phase, in order to control the device's switching behaviour. Fig. 2 shows exemplarily the influence of the modified gate current in switching phase E2 on the current and voltage characteristics.

All current values with the corresponding phase durations are saved in a table (LUT) for the respective operating point. During the

steady states, an adaptation algorithm calculates from the difference between reference and control variable the optimum gate current for the next switching operation (symbolised by the  $z^{-1}$  block in fig. 3).

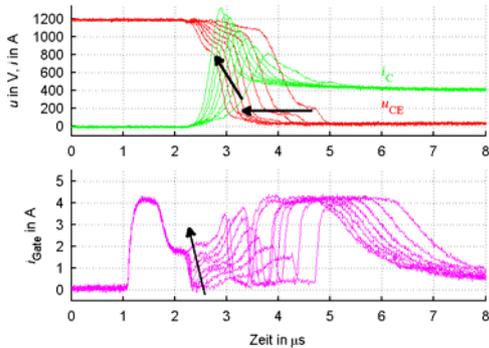


Abb. 2: Strom- und Spannungsverläufe bei Variation des Gatestroms in Phase E2 nach jedem Schaltvorgang  
 Fig. 2: Current and voltage characteristics with changing gate current in phase E2 after each switching operation

The result of the control of the maximum voltage gradient during voltage rise when switching off is shown in fig. 4. Despite different load currents, the desired set value can be adjusted. A steady control of additional variables, like the max. current slope or the max. reverse recovery current during switching on, could also be verified by measurements [1].

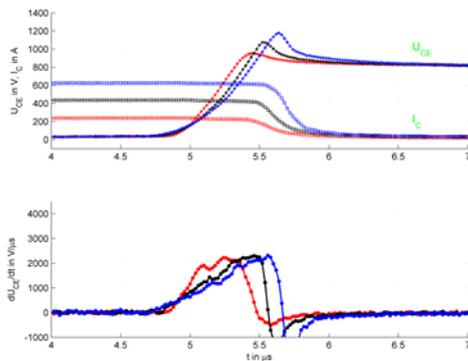


Abb. 4: Strom- und Spannungsverläufe (oben) sowie zugehörige Spannungsgradientenverläufe (unten) beim Ausschalten unterschiedlicher Lastströme  
 Fig. 4: Current and voltage characteristics (top) as well as corresponding voltage gradient characteristics (bottom) when switching off different load currents

Besides the automated optimisation of the switching behaviour of semiconductor devices, the long-term monitoring of relevant parameters via digital technology also offers new fields of application, e.g. the monitoring and diagnosis of components' aging. This aspect is among others very interesting for offshore wind energy plants, since maintenance and repair work is extremely time- and cost-intensive, and shall therefore be considered in future developments of digital gate units.

Für die Regelung einzelner zu optimierender Größen, wie Spannungs- und Stromsteilheiten, wird eine spannungsgesteuerte Stromquelle verwendet, die einen konstanten Stromwert in den entsprechenden Phasen zur Ansteuerung des Bauelements liefert. Abb. 2 zeigt exemplarisch den Einfluss des variierten Gatestromwertes in Einschaltphase E2 auf die Strom- und Spannungsverläufe.

Die einzelnen Stromwerte mit den zugehörigen Phasendauern werden entsprechend des jeweiligen Betriebspunkts in einer Tabelle (LUT) hinterlegt. Während der statischen Zustände berechnet ein Adaptionsalgorithmus aus der Differenz zwischen der Führungs- und Regelgröße den optimalen Gatestrom für den nächsten Schaltvorgang (symbolisiert durch den  $z^{-1}$  Block in Abb. 3).

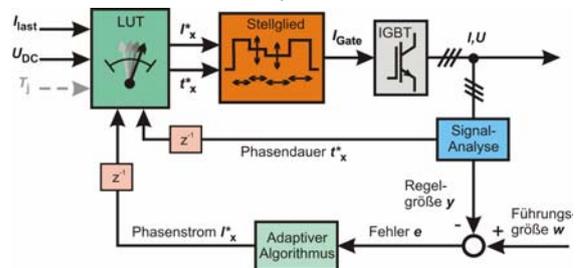


Abb. 3: Prinzip der adaptiven Ansteuerung  
 Fig. 3: Principle of adaptive control

Das Ergebnis der Regelung des maximalen Spannungsgradienten während des Spannungsanstiegs beim Ausschalten ist in Abb. 4 dargestellt. Trotz unterschiedlicher Lastströme kann der gewünschte Sollwert eingestellt werden. Eine stabile Regelung weiterer Größen, wie der maximalen Stromsteilheit oder maximalen Rückstromspitze beim Einschalten, konnte ebenfalls anhand von Messergebnissen verifiziert werden [1].

Neben der automatischen Optimierung des Schaltverhaltens von Halbleiter-Bauelementen eröffnet die Langzeitüberwachung von relevanten Parametern mit digitaler Technik ebenfalls neue Anwendungsmöglichkeiten, z. B. die Überwachung und Diagnose von Alterungen der Bauelemente. Dieser Aspekt ist u. a. bei Offshore-Windkraftanlagen von großer Bedeutung, da die Wartungs- und Reparaturarbeiten extrem aufwändig sind, und soll in der zukünftigen Weiterentwicklung der Digitalen Gate Unit berücksichtigt werden.

[1] Dang; Kuhn; Mertens: *Digital Adaptive Driving Strategies for High-Voltage IGBTs*, IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, (ECCE 2011), Phoenix, USA

## Hocheffiziente Umrichter mit SiC-Halbleitern

von Dipl.-Ing. Thies Köneke

Im Rahmen dieses von der ECPE geförderten Projekts wurde der in Abb. 1 gezeigte Wechselrichter mit SiC-JFETs aufgebaut. Durch die extrem niedrigen Verluste in den Leistungshalbleitern erreicht der Wechselrichter einen maximalen Wirkungsgrad von 99,5%, siehe Abb. 2. Auch bei höheren Schaltfrequenzen liegt der Wirkungsgrad über einen weiten Betriebsbereich über 99%. Der gesamte Umrichter ist ausschließlich durch natürliche Luftkonvektion gekühlt, erreicht aber trotzdem bei einem Bauvolumen von 4,35 Litern und einer Umgebungstemperatur von 40°C eine Dauerleistung von 12kVA. Eine Spitzenleistung von 15kVA ist möglich. Im Umrichter ist zudem ein Gleichrichter mit Si-Dioden und ein Bremschopper enthalten.

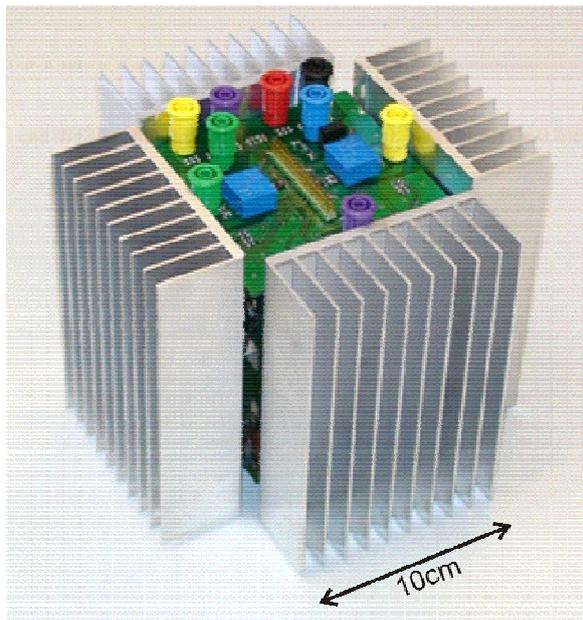


Abb. 1: Frequenzumrichter mit SiC-JFETs  
Fig. 1: Frequency converter with SiC-JFETs

Die Dimensionierung des Wechselrichters samt den Kühlkörpern erfolgte mit der Berechnungssoftware HeCSiC, die zuvor in diesem Projekt entwickelt wurde. Mit HeCSiC können ebenfalls stationäre Arbeitspunkte für den ausgelegten Wechselrichter berechnet werden. Wie in Abb. 2 und 3 zu sehen ist, decken sich die Berechnungen gut mit den gemessenen Werten. Dabei wurden die Wechselrichterverluste kalorisch gemessen und daraus anschließend der Wir-

## Highly Efficient Converters with SiC Semiconductors

by Dipl.-Ing. Thies Köneke

Within this project funded by ECPE, the inverter with SiC-JFETs shown in fig. 1 was constructed. Due to its very low semiconductor losses, it reaches a maximum efficiency of 99.5%, as plotted in fig. 2. Even at higher switching frequencies, the efficiency stays above 99% over a wide operating range. The converter is merely cooled by natural air convection, but despite this has a total volume of 4.35 litres. Furthermore, its continuous output power is 12kVA at an ambient temperature of 40°C, and a maximum power of 15kVA can be reached. Besides the inverter, the converter also includes a rectifier with Si diodes and a brake chopper.

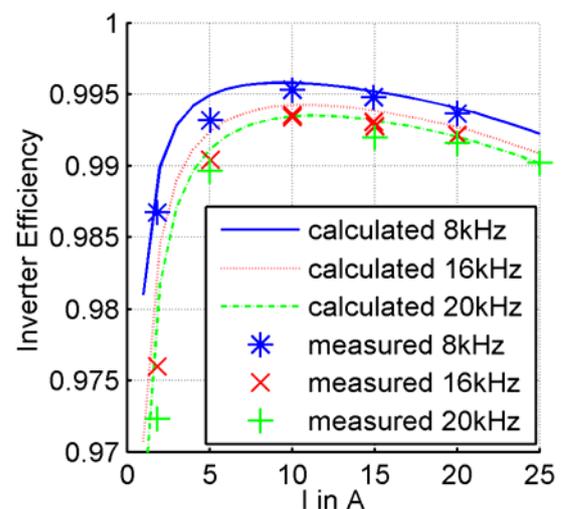


Abb. 2: Berechneter und gemessener Wirkungsgrad des Wechselrichters (ohne GR)

Fig. 2: Calculated and measured inverter efficiency (without rectifier)

The dimensioning of the inverter including the heat sinks was done with the calculation tool HeCSiC, which was developed within this project before. Static operating points of the already dimensioned inverter can be calculated with HeCSiC as well. As shown in fig. 2 and 3, the calculation results match the measurement results well. Caloric measurement was used to determine the inverter losses. From this, the efficiency was calculated. During these tests, the inverter was loaded with iron core inductors and power resistors.

Operation with an 11kW induction motor is not

possible, as later tests showed. This is because the high voltage slopes at the inverter terminals and the parasitic capacitances of the motor generate high current peaks during switching transitions, which cause electromagnetic interferences. This effect is worsened by usage of shielded motor cables. Besides additional capacitive current peaks, such a cable causes overvoltage at the motor terminals. In fig. 4, the fast voltage slope of 15 kV/ $\mu$ s at the inverter terminal and the oscillating overvoltage at the end of the open-ended cable of 10m length is plotted. The current and voltage signals can be explained by the transmission line theory. A simulation model of the cable was successfully established.

In order to solve the problems mentioned above, voltage slope limiting output filters will be examined in a further work package. Additionally to the filter effect, the minimisation of the filter losses is the major goal.

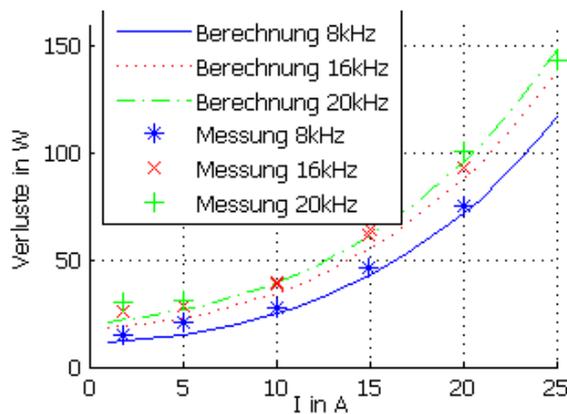


Abb. 3: Berechnete und kalorisch gemessene Wechselrichterverluste (inkl. 5W Steuerleistung)  
 Fig. 3: Calculated and calorically measured losses of the inverter (5W control power included)

kungsgrad berechnet. In diesen Versuchen wurde der Umrichter mit einer Kombination aus Leistungswiderständen und Eisenkern-drosseln belastet.

Spätere Tests ergaben, dass der Betrieb an einem 11kW-Induktionsmotor nicht möglich ist, da die hohen Spannungsanstiegsgeschwindigkeiten am Umrichterausgang und die parasitären Kapazitäten des Motors hohe Stromspitzen beim Schalten verursachen, die dann Störungen verursachen. Dieses Problem wird beim Einsatz von geschirmten Motorkabeln noch verschärft. Neben einem hohen kapazitiven Strom verursacht ein solches Kabel Überspannungen am Kabelende, d.h. an den Motorklemmen. Abb. 4 zeigt den steilen Spannungsanstieg mit 15 kV/ $\mu$ s am Wechselrichterausgang und die oszillierende Überspannung am offenen Ende eines 10m langen Motorkabels. Die Strom- und Spannungsverläufe können anhand der Leitungstheorie erklärt werden und wurden mit Hilfe eines selbst erstellten Kabelmodells erfolgreich nachsimuliert.

Um die genannten Probleme zu lösen, werden in einem weiteren Arbeitspaket verschiedene Ausgangsfilter zur Begrenzung der Spannungsanstiegsgeschwindigkeit untersucht, wobei die Minimierung der Verluste das Ziel ist.

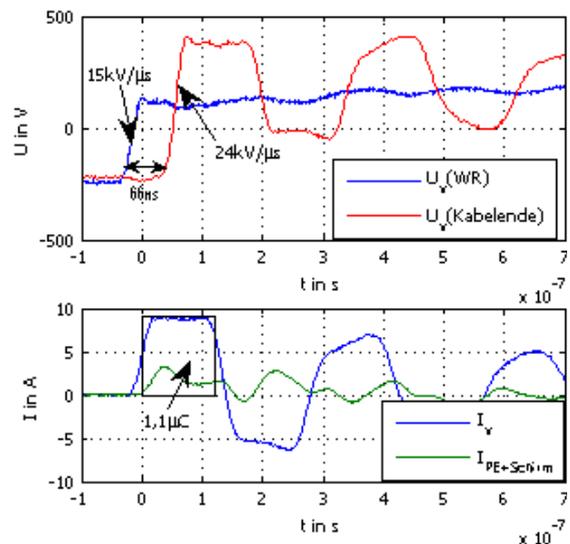


Abb. 4: Spannungen und Ströme im Motorkabel  
 Fig. 4: Voltage and current transients in the motor cable

## Potentiale neuer Leistungshalbleiter für Kfz-Antriebe

von Dipl.-Ing. Arvid Merkert

Im Rahmen des Projektes *Halbleitertechnologien für schnell taktende, hoch effiziente Stromrichter in Anwendungen mit extremen, automotiven Umweltbedingungen* werden am IAL neue Siliziumcarbid (SiC) Leistungshalbleiter untersucht.

Stand der Technik bei Fahrzeugen mit hohem Anteil elektrischer Antriebsleistung (>10kW) und hoher Batteriespannung (>200V) sind Traktionswechselrichter mit bipolaren IGBTs und Dioden aus Silizium (Si).

Im Fokus der Untersuchungen stehen die Potenziale, die der Einsatz der SiC-Halbleiter in Traktionswechselrichtern von Hybrid-Fahrzeugen (HEV) bieten könnte, wie z.B. der Betrieb mit höheren Sperrschichttemperaturen, gesteigerte Effizienz oder erhöhte Schaltfrequenzen.

Zunächst wurden die Einschalt- und Ausschaltverlustenergien von Halbbrücken mit den verfügbaren unipolaren 1,2 kV SiC-MOSFETs, SiC-JFETs und SiC-JBS-Dioden bei Temperaturen von 30 °C bis 180 °C, Schaltspannungen von 200 V bis 600 V und Schaltstromdichten von 12 A/cm<sup>2</sup> bis 260 A/cm<sup>2</sup> bestimmt. Weiterhin wurde die Temperaturabhängigkeit des Durchlasswiderstands der Transistoren durch Messungen am IAL untersucht. Die Messergebnisse (Abb. 1) deuten darauf hin, dass die SiC-PiN-Bodydioden der unipolaren Transistoren im Gegensatz zu Bodydioden unipolarer Si-SJ-MOSFETs dieser Sperrspannungsklasse ein brauchbares Ausschaltverhalten aufweisen.

## Potentials of Novel Power Semiconductors for Vehicle Drives

by Dipl.-Ing. Arvid Merkert

Within the scope of the project *Semiconductor technologies for fast-switching highly efficient power converters with extreme automotive environmental conditions*, novel silicon carbide (SiC) power converters are investigated at IAL.

For vehicles with high electrical driving power (>10kW) and high battery voltages (>200V), traction inverters with bipolar IGBTs and silicon diodes (Si) are state-of-the-art.

The main focus is laid on investigating the potentials offered by the use of SiC semiconductors in traction inverters of hybrid vehicles (HEV), as for example the operation with higher junction temperatures, increased efficiency or higher switching frequencies.

First the switching energy loss of half bridges is determined with commercially available unipolar 1.2 kV SiC-MOSFETs, SiC-JFETs and SiC-JBS diodes at temperatures from 30°C to 180°C, switching voltages of 200 V to 600 V and switching current densities of 12 A/cm<sup>2</sup> to 260 A/cm<sup>2</sup>. Moreover the temperature dependency of the forward resistance of the transistors is investigated by measurements at IAL. The measuring results (fig. 1) prove that the SiC-PiN body diodes of unipolar transistors compared to body diodes of unipolar Si-SJ-MOSFETs of the same voltage class show an appropriate reverse recovery behaviour.

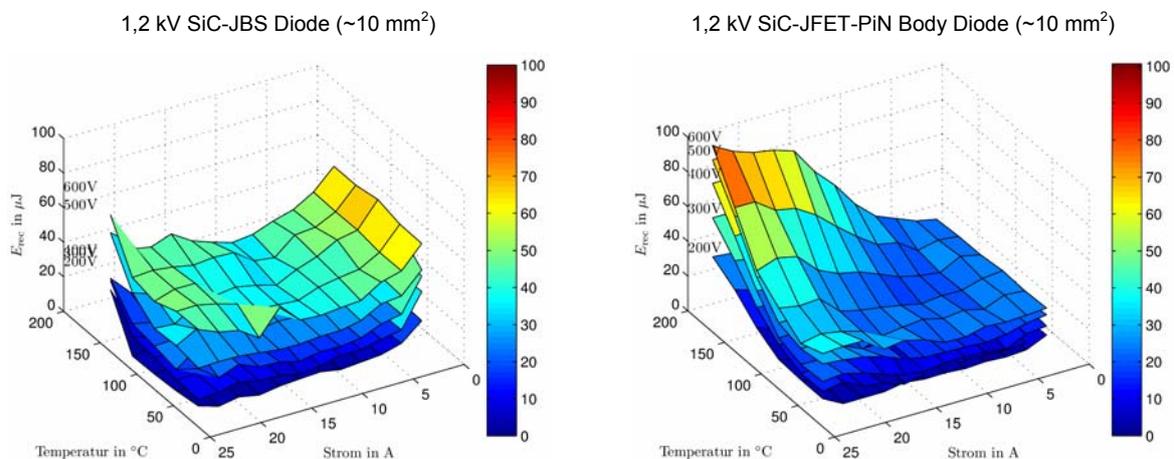


Abb. 1: Verlustenergie beim Ausschalten von SiC-Dioden  
Fig. 1: Reverse recovery energy loss of SiC diodes

In addition, a transient thermal model was derived from the structural design of power modules with water-cooled base plate, which simulates the behaviour of the chips and considers also the heat spreading effects. Based on this and by appropriate analytical description, a loss model was developed, which permits a virtual scaling of the chip area and the number of chips, respectively. In this way, it is possible to model high-power half bridges and traction converters.

Derived from the loss models, fig. 2 shows the minimum total chip area which is thermally permissible for three-phase half bridge inverters for different battery voltages, switching frequencies and technologies.

In this context, an improved system utilisation can be observed for SiC. Compared to IGBTs, unipolar semiconductor switches are suitable for being operated with negative drain-source currents. At regenerative operation, a high amount of losses for IGBT half bridges occurs in the diodes, which must then carry the current during the better part of the switching period. At motor operation, IGBTs are optimally utilised.

The comparison makes clear that thanks to SiC power semiconductors, inverters with a smaller chip area are even possible at low switching frequencies and battery voltages.

Zusätzlich wurde aus dem strukturellen Aufbau von Leistungsmodulen mit wassergekühlter Bodenplatte ein transientes thermisches Modell abgeleitet, welches das Verhalten der Chips abbildet und auch Wärmespreizungseffekte berücksichtigen kann. Auf dieser Grundlage konnte durch geeignete analytische Beschreibung ein Verlustmodell entwickelt werden, welches eine virtuelle Skalierung der Chipfläche bzw. Chipanzahl zulässt, sodass Halbbrücken und Traktionsumrichter für große Leistungen nachgebildet werden können.

Abb. 2 zeigt die mit Hilfe der Verlustmodelle ermittelte thermisch minimal zulässige Gesamtchipfläche beim dreiphasigen Halbbrückenwechselrichter für verschiedene Batteriespannungen, Schaltfrequenzen und Technologien.

Ein starker Effekt in diesem Zusammenhang ist die bessere Systemausnutzung bei SiC. Im Gegensatz zu IGBTs lassen die unipolaren Halbleiterschalter einen Betrieb mit negativen Drain-Source-Strömen zu. Bei IGBT-Halbbrücken entsteht im generatorischen Betrieb ein hoher Anteil der Verluste in den Dioden, welche dann den Großteil der Schaltperiodendauer den Strom führen müssen. Im motorischen Betrieb werden die IGBTs optimal ausgenutzt.

Der Vergleich macht deutlich, dass durch SiC-Leistungshalbleiter Wechselrichter mit geringerer Chipfläche sogar bei niedrigen Schaltfrequenzen und Batteriespannungen möglich sind.

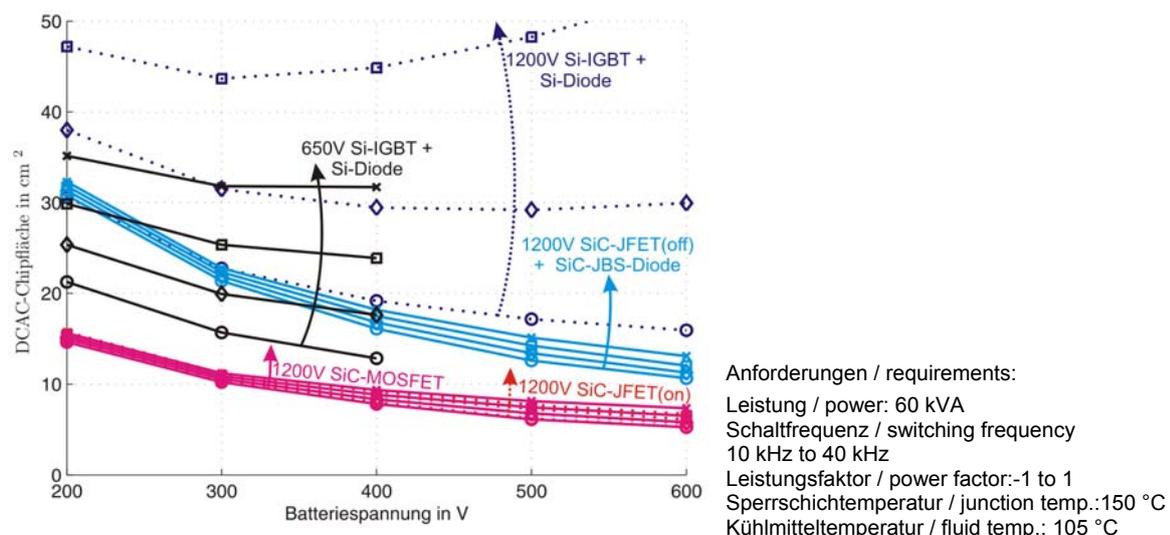


Abb. 2: Minimale Chipfläche beim Traktionswechselrichter  
 Fig. 2: Minimum chip area of traction inverters

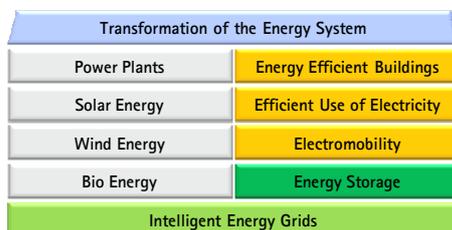
## Forschungsinitiative Energie 2050

von Dr.-Ing. Volker Schöber

Die Transformation des Energiesystems in eine nachhaltige Energieversorgung in wenigen Jahrzehnten stellt die Gesellschaft vor historische Herausforderungen. Bis 2050 – so die Vision – soll dieser Prozess für Deutschland weitgehend vollzogen sein. Die Gewinnung, der Verbrauch sowie Transport und Speicherung von erneuerbaren Energien erfordern dabei neue Vorgehensweisen, um die Energieversorgung lokal und global zu gewährleisten.

Die Leibniz Universität Hannover hat sich zum Ziel gesetzt, diese Transformation des Energiesystems mit ihrer Forschungskompetenz zu unterstützen. Hierzu wurde im November 2010 die Forschungsinitiative „Energie 2050 – Transformation des Energiesystems“ an der LUH gegründet. Vorstufe war der Arbeitskreis Energieforschung, der unter Leitung von Prof. A. Mertens seit 2009 regelmäßig tagte und von Dr. A. Averbeg operativ begleitet wurde. Prof. Mertens ist nun auch Sprecher der Forschungsinitiative Energie 2050. Als neuer Geschäftsführer ab Mai 2011 konnte Dr. V. Schöber gewonnen werden, der aus seiner Tätigkeit im edacentrum e.V. bereits umfangreiche Erfahrung in der Arbeit in Forschungskonsortien und in der Forschungsförderung mitbringt.

Mit der Gründung der Forschungsinitiative im November 2010 wurden Themencluster identifiziert (Abb. 1), die die Forschungsschwerpunkte der Initiative bilden und von Clustersprechern aus 7 von 9 Fakultäten der LUH geleitet werden.



### Value Chain



Abb. 1: Themencluster aus allen Stufen der Verwertungskette der erneuerbaren Energien

Fig. 1: Theme cluster from all stages of the exploitation chain of renewable energies

## Research Initiative Energy 2050

by Dr.-Ing. Volker Schöber

The transformation of the energy system into a sustainable energy supply within a few decades is a historical challenge for the entire society. In Germany, this process shall be completed until 2050. In every respect, the recovery, the consumption as well as the transportation and storage of renewable energies require new approaches, in order to guarantee a sufficient energy supply on a local as well as on a global level.

The aim of Leibniz Universität Hannover (LUH) is to support this transformation of the energy system with its entire research competence. For this purpose, the Research Initiative "Energy 2050 - Transformation of the Energy System" was founded at LUH in November 2010. In a primary stage, the working group "Energy Research" under the direction of Prof. A. Mertens met on a regular basis since 2009 and was operationally accompanied by Dr. A. Averbeg. Prof. Mertens also took over the role as the spokesman of the Research Initiative Energy 2050. Since May 2011, he is assisted by Dr. V. Schöber as the managing director, who can rely on comprehensive expertise in working with research consortia and in the field of research fund raising made during his activities at edacentrum e.V.

With the foundation of the research initiative in November 2010, theme clusters were identified (fig. 1). These are the initiative's major fields of research, which are directed by cluster spokesmen of 7 out of 9 faculties of the LUH.

The initiative aims at bundling the research and educational activities, establishing an interdisciplinary network within the LUH, improving the LUH's external presentation concerning energy research, initiating and supporting collective research concerning all energy-related topics at the LUH (fig. 2). The topics are as versatile as the LUH itself, comprising

- energy generation especially by use of renewable energies, but also by raising the efficiency of conventional power plants;
- transport in energy grids as well as energy storage using thermal, me-

chanical and chemical methods;

- raising efficiency with respect to energy consumption, especially in the field of energy use and energy efficiency in building.

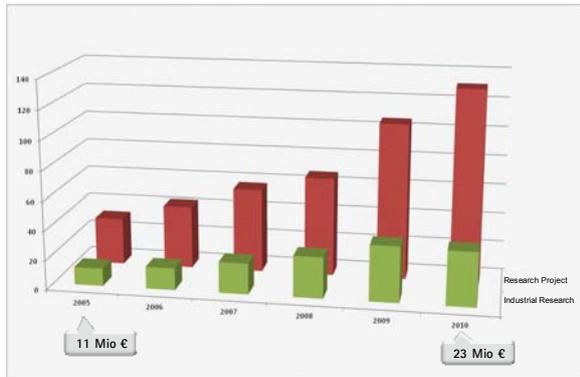


Abb. .2: Drittmittelprojekte zur Energieforschung (Angaben der Mitglieder der Forschungsinitiative)

Fig. 2: Third-party funded energy research projects (data provided by members of the research initiative)

In 2011, the research initiative's activities comprised for example

- the „Energy Fair“ in January, which took place in the canteen Schneiderberg and was organised by Dr. Averbeg;
- the lecture series “Transformation of the Energy System” in summer term 2011, organised by Prof. Brendel;
- the 1<sup>st</sup> Ph.D. colloquium, organised by post graduates of the research initiative;
- as well as the initiation and steering of several project initiatives.

In order to find out the scope and variety of research activities of the currently 49 institutes of 9 faculties with approx. 300 researchers and post graduates, a survey was made in 2011. Based on the results of this survey, the research initiative will be able to support its members in their activities.

#### Contact

Dr. Volker Schöber

Phone +49 (511) 762 4230

Mail [volker.schoeber@energie.uni-hannover.de](mailto:volker.schoeber@energie.uni-hannover.de)

Web [www.energie.uni-hannover.de](http://www.energie.uni-hannover.de)

Ziel der Initiative ist es, die Forschungs- und Lehraktivitäten zu bündeln, ein interdisziplinäres Netzwerk innerhalb der LUH aufzubauen, die Außendarstellung der Energieforschung an der LUH zu verbessern sowie Verbundforschung zur Energie an der LUH zu initiieren und zu unterstützen (Abb. 2). Die Themenfelder sind dabei so vielfältig wie die Leibniz Universität und umfassen

- die Gewinnung von Energie, insbesondere mit Hilfe von regenerativen Energien, aber auch die Effizienzsteigerung konventioneller Kraftwerke;
- den Transport in Energienetzen sowie die Speicherung von Energie mit thermischen, mechanischen und chemischen Verfahren;
- die Effizienzsteigerung beim Verbrauch von Energie, besonders auf den Sektoren Stromnutzung und Gebäudeeffizienz.

Aktivitäten der Forschungsinitiative im Jahr 2011 waren beispielsweise

- „Energiesmesse“ im Januar in der Mensa Schneiderberg, organisiert von Dr. Averbeg;
- eine Ringvorlesung „Transformation des Energiesystems“ im Sommersemester 2011, organisiert von Prof. Seume;
- eine Blockvorlesung „Renewable Energy“ im September, organisiert von Prof. Brendel;
- das 1. Doktorandenkolloquium, organisiert von den Doktoranden der Forschungsinitiative;
- sowie die Initiierung und Begleitung einer Reihe von Projektinitiativen.

Um den Umfang und die Vielfalt der Forschungsaktivitäten der aktuell 49 Institute aus 9 Fakultäten mit ca. 300 Wissenschaftlern und Doktoranden zu erfassen, wurde im in 2011 eine Umfrage durchgeführt. Diese Erfassung der vielfältigen Projekte und Industrieaufträge wird die Forschungsinitiative nutzen, die Mitglieder in ihren Aktivitäten zu unterstützen.

## Die Protolar GmbH – Ein Spin-Off erweitert das Angebot des IAL

Seit November 2011 hat das IAL ein neues Spin-Off Unternehmen: Die Protolar GmbH. Der Name steht für "Prototypen für Leistungselektronik, Ansteuerung und Regelung". Das Geschäftsfeld der neuen Firma umfasst Dienstleistungen rund um die Entwicklung von elektronischen und leistungselektronischen Produkten.

Das Angebot beginnt bei der Beratung und führt über die Entwicklung zum Aufbau, der Programmierung und dem Test einzelner Baugruppen bis hin zu komplexeren Geräten. Hierdurch ergänzt die Protolar GmbH das bestehende Forschungsangebot des IAL um die Möglichkeit, Forschungsergebnisse und Know-How direkt in Produktprototypen umzusetzen. Besonders vorteilhaft ist hierbei die enge Kooperation mit dem IAL.

Das Gründungs-Team besteht aus den drei IAL-Mitarbeitern Lennart Baruschka (Geschäftsführer), Arvid Merkert und Thies Köneke, sowie aus Dipl.-Ök. Sebastian Schott, der die wirtschaftliche Beratung der Firma übernimmt.

Die Kernkompetenzen der Protolar GmbH liegen im Schaltungs- bzw. Layoutentwurf, der Systemdimensionierung und der hardwarenahen Programmierung für leistungselektronische und regelungstechnische Anwendungen. Auf diesem Gebiet existieren bereits mehrjährige Erfahrungen seitens der Gründer sowohl bei kleinen Systemen mit Leistungen im Bereich einzelner Watt, als auch bei größeren und komplexeren Anlagen im dreistelligen kW-Bereich. Die Regelung kann sowohl auf Mikrocontrollern und FPGAs als auch auf PCs mit Echtzeit-Betriebssystem umgesetzt werden, was eine hohe Flexibilität ermöglicht.

Weitere Informationen finden Sie unter [www.protolar.de](http://www.protolar.de) oder im persönlichen Austausch mit den Gründern.

## Protolar GmbH – A Spin-Off extends the range of services offered by IAL

In November 2011, the IAL gained a new Spin-Off company called Protolar GmbH. This name is a short form of "Prototypes for Power Electronics, Drivers and Controls". The new company offers services regarding the development of electronic and power electronic products.

The range of services starts with consulting and includes development as well as assembly, programming and test of prototype groups and complex devices. In this way, the Protolar GmbH complements the IAL's offer for research by providing a possibility to quickly transfer research results and know-how into new products.

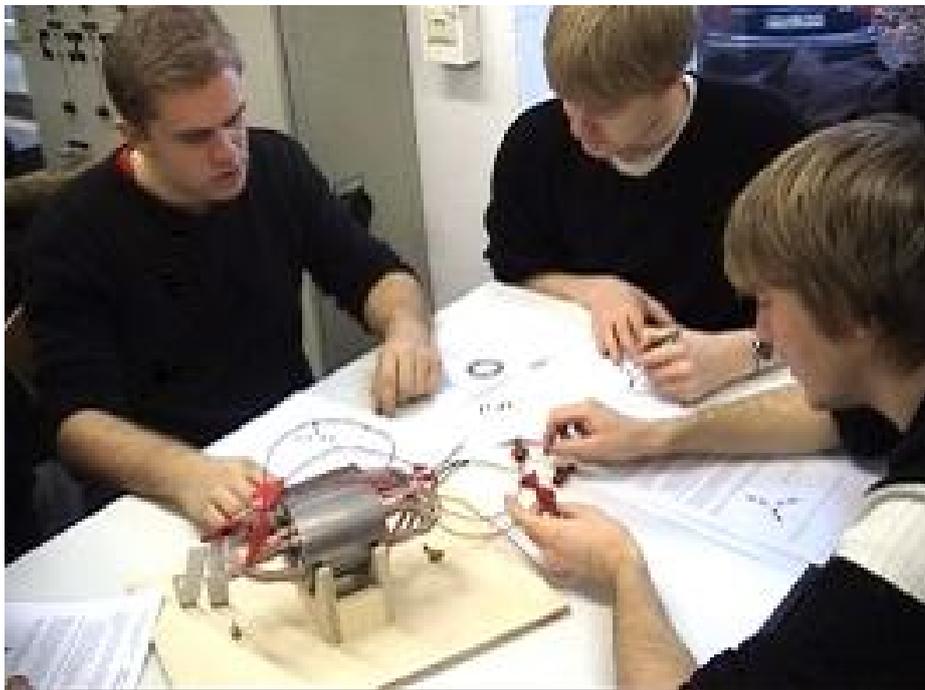
The three IAL staff members Lennart Baruschka (CEO), Arvid Merkert and Thies Köneke form the engineering team, Dipl.-Oec. Sebastian Schott financially guides the company.

The Protolar GmbH core competence comprises the design of schematics and layout, dimensioning of systems and components and low-level programming for power electronic and control systems. In this area, the engineering team has several years of experience with small systems employing powers of a few watts as well as with larger-scale systems in the range of 100 kW. Control systems can be based on microcontrollers and FPGAs as well as on personal computers running a real-time operating system. This ensures high flexibility for the customer.

More information is available on [www.protolar.de](http://www.protolar.de) or in personal discussion with the team.

**Protolar** GmbH

Prototypen: Leistungselektronik | Ansteuerung | Regelung



Praxisübung zum Thema "Wicklungen und Felder"  
der Vorlesung "Grundlagen der elektromagnetischen Energiewandlung"  
Exercise course "Windings and Fields"  
within the lecture "Basics of Electromagnetical Power Conversion"

## Lehrveranstaltungen

Nach den Veränderungen der vergangenen Jahre, die durch die Übernahme der Lehrstühle des IAL durch Prof. Ponick und Prof. Mertens ausgelöst wurden, hat sich in den vergangenen zwei Jahren eine Konsolidierung eingestellt. Die meisten Lehrveranstaltungen wurden unverändert aus den Vorjahren übernommen und lediglich leicht aktualisiert.

Die größten Änderungen bei den Lehrveranstaltungen des IAL sind durch den Wechsel des Lehrauftrags zu Elektrischen Bahnen entstanden. Prof. Bakran wurde auf einen Lehrstuhl für Mechatronik an die Universität Bayreuth berufen. Der Lehrauftrag für die Vorlesung „Elektrische Bahnen und Fahrzeugantriebe“ wurde an Dr. Hofstetter vergeben, der auch bei Siemens die Nachfolge von Prof. Bakran übernommen hat. Wir freuen uns über die Zusage von Dr. Hofstetter.

Zu erwähnen sind außerdem die Projektarbeiten für Erst- und Zweitsemester, die konzipiert wurden, um den Studierenden erste praktische Erfahrungen und Erfolgserlebnisse mit elektrotechnischen Aufgabenstellungen zu verschaffen, in einem sonst durch Grundlagen und Theorie geprägten Umfeld. Darin bauen die Studierenden kleine Geräte selbst auf und bringen sie zur Funktion, z. B. einen drehzahlvariablen Ventilator oder einen selbstgewickelten einfachen Generator für ein kleines Windrad. Für viele stellt das tatsächlich den ersten Kontakt mit dem Lötkolben, mit elektronischen Bauteilen und Schaltungen und anderem Rüstzeug des Elektroingenieurs dar.

In eine ähnliche Richtung zielt auch eine Ringvorlesung im neuen Studiengang Energietechnik. Dort werden in Beiträgen aus den verschiedenen Fachgebieten die Anwendungen beleuchtet, um einen Eindruck von der Vielfalt und Faszination der spannenden Aufgabenstellungen für Ingenieure in der Energietechnik zu vermitteln.

## Lectures

After the last years' changes made under the guidance of Prof. Ponick and Prof. Mertens who took over the two chairs of IAL, the last two years were characterised more as a period of consolidation. Most of the curriculum remained unchanged, except for some minor actualisations.

Since Prof. Bakran as one of our external lecturers was appointed for the Mechatronics Chair at Bayreuth University, the lectureship for "Electrical Traction and Vehicles Drives" was offered to Dr. Hofstetter, Siemens AG, who also succeeded Prof. Bakran at Siemens. We very much appreciate that Dr. Hofstetter accepted the lectureship and are looking forward to a successful cooperation in the years to come.

Worth mentioning is also the introduction of project works for first- and second-term students, intended to provide students with their first practical experiences and feelings of success with regard to electrotechnical tasks, and this in a field which is dominated by a lot of theoretical subjects. Within the scope of these projects, students develop small devices, e.g. a variable speed fan or a self-wound simple generator to run a small wind turbine. For some students, these projects represent their first contact with a soldering gun, electronic components and circuits and other skills needed by electrical engineers.

A specific lecture series in the new curriculum "Power Engineering" aims at the same target. Here presentations from the different sectors focus on application aspects, giving the students an idea on the large variety of fascinating and interesting tasks for engineers in the field of power engineering.

<b>Vorlesungsbezeichnung</b>	<b>Dozent</b>	<b>SS</b>	<b>WS</b>	<b>SWS</b>
Grundlagen der elektromagnetischen Energie-wandlung	Prof. Dr.-Ing. B. Ponick		X	V2, Ü2
Berechnung elektrischer Maschinen	Prof. Dr.-Ing. B. Ponick		X	V2, Ü1
Elektrische Klein- und Servoantriebe	Prof. Dr.-Ing. B. Ponick		X	V2, Ü1
Elektronisch betriebene Kleinmaschinen	Prof. Dr.-Ing. B. Ponick	X		V2, Ü1
Elektrische Antriebssysteme	Prof. Dr.-Ing. B. Ponick	X		V2, Ü1
Elektrische Antriebstechnik I	Prof. Dr.-Ing. A. Mertens		X	V2, Ü1
Leistungselektronik I	Prof. Dr.-Ing. A. Mertens		X	V2, Ü1
Regelung elektrischer Drehfeldmaschinen	Prof. Dr.-Ing. A. Mertens	X		V2, Ü1
Elektrische Antriebstechnik II	Prof. Dr.-Ing. A. Mertens Prof. Dr.-Ing. B. Ponick	X		V2, Ü1
Leistungselektronik II	Prof. Dr.-Ing. A. Mertens	X		V2, Ü1
Leistungshalbleiter und Ansteuerungen	Prof. Dr.-Ing. A. Mertens		X	V2, Ü1
Datenverarbeitungssysteme	Prof. Dr.-Ing. A. Mertens		X	V2, Ü1
Modellierung von elektromechanischen Mikro-systemen	Dr.-Ing. J. Steinbrink Prof. Dr.-Ing. W. Mathis	X		V2, Ü1
Dynamische Regelantriebe	Prof. Dr.-Ing. G. Huth	X		V2
Elektrische Bahnen und Fahrzeugantriebe	Dr.-Ing. M. Hofstetter	X		V2
Kolloquium Elektrische Antriebssysteme	Prof. Dr.-Ing. B. Ponick Wiss. Mitarbeiter	X		
Kolloquium Berechnung elektrischer Maschi-nen	Prof. Dr.-Ing. B. Ponick Wiss. Mitarbeiter		X	
Kolloquium Elektrische Klein- und Servoantrie-be	Prof. Dr.-Ing. B. Ponick Wiss. Mitarbeiter		X	
Labor für Leistungselektronik	Prof. Dr.-Ing. A. Mertens Wiss. Mitarbeiter	X	X	
Labor für Elektrische Maschinen	Prof. Dr.-Ing. B. Ponick Wiss. Mitarbeiter	X	X	
Labor für Elektrische Antriebssysteme	Prof. Dr.-Ing. B. Ponick Prof. Dr.-Ing. A. Mertens Wiss. Mitarbeiter	X	X	

## Grundlagen der elektromagnetischen Energie-wandlung

(3. Semester), V2, Ü2

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

Hörsaalübung: Dipl.-Ing. P. Juris

### 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: Überlagerung der Wechselfelder der einzelnen Stränge, 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, Arten von Stromverdrängungsläufern, Erwärmung der Läufer- und Ständerwicklung während Übergangsvorgängen zwischen verschiedenen Betriebszuständen, Einführung in die Stromrichterspeisung, polumschaltbare Motoren, Anlasshilfen und Einphasen-Motoren.

## Basics of Electromagnetical Power Conversion

(3rd term), V2, U2

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

Exercise: Dipl.-Ing. P. Juris

### Contents

Types of power converters, overview of the different types and the 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, bar-to-bar voltage.

Generalized theory of polyphase machines: superimposed alternating fields of the single phases, 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, types of deep-bar cage motors, heating of rotor and stator windings during changing of operating speed, considerations for power converter supply, introduction to pole-changing motors, single-phase motors and starting methods.

## Theory of Electrical Machines

(5th term), V2, U1

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

Exercise: Dipl.-Ing. F. Quattrone

### Contents

Introduction into the 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).

Design and cooling methods of synchronous machines; performance of salient-pole machines in steady-state operation: phasor diagram, equivalent circuit diagram, locus diagram, voltage equations, Potier diagram, reluctance motors; operation of synchronous generators with unsymmetrical load.

Types of losses; additional losses caused by spatial harmonics.

## Berechnung elektrischer Maschinen

(5. Semester), V2, Ü1

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

Hörsaalübung: Dipl.-Ing. F. Quattrone

### Inhalt

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, 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).

Konstruktiver Aufbau und Kühlmethode von Synchronmaschinen; Betriebsverhalten von Schenkelpolmaschinen im stationären Betrieb: Zeigerdiagramm, Ersatzschaltbild, Strom-ortskurve, Spannungsgleichungen, Potier-Dreiecke, Reluktanzmotoren; Unsymmetrische Belastung von Synchrongeneratoren.

Verlustarten; zusätzliche Verluste durch Oberwellen.

## Elektrische Klein- und Servoantriebe

(5. bzw. 7. Semester), V2, Ü1

Vorlesung\*): Prof. Dr.-Ing. B. Ponick

Übung: Dipl.-Ing. K. Emmrich

### Inhalt

Kostengünstige bzw. hochwertige Ausführungen, Übersicht über fremd- und selbstgeführte Motoren, grundsätzliche Konstruktionsmöglichkeiten.

Permanenterregte Gleichstrommotoren: Ausführungen (Walzen-, Scheiben-, Glockenläufer), Anwendungen, Magnetwerkstoffe, Betriebsverhalten, Drehzahlstellung.

Universalmotoren: Aufbau, Anwendungen, Betriebsverhalten, elektrische und elektronische Drehzahlstellung.

Induktionsmotoren: Drehstrommotor (Aufbau, Anwendungen, prinzipielle Wirkungsweise), Wechselstrom-Induktionsmotor (Kondensator-, Widerstandshilfsstrang-, Spaltpolmotor); Drehzahlstellung.

Wechselstrom-Synchronmaschinen: Aufbau (Ständer mit Nuten, ausgeprägten bzw. Klauen-Polen), Motoren mit Magnet- und Reluktanzläufer; Klauenpol-Generatoren (Fahrrad, Kfz).

Grundlagen der Servoantriebe (Gleichstrom-, Induktions- und Synchron-Servomotoren).

\*) auch für TU Braunschweig

## Small Electrical Motors and Servo Drives

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

Lecture\*): Prof. Dr.-Ing. B. Ponick

Exercise: Dipl.-Ing. K. Emmrich

### Contents

Low-priced and high-quality designs, overview of externally commutated and self-commutated motors, basic design concepts.

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.

Induction motors: three-phase induction motor (design, applications, principle mode of functioning), single-phase induction motor (capacitor motor, resistance and auxiliary winding motor, split-pole motor); speed control.

Single-phase synchronous machines: design (stator with slots, distinct poles or claw poles), motors with permanent-magnet and reluctance rotor; claw-pole generators (for bicycles, motor vehicles).

Basics of servo drives (DC, induction and synchronous servo motors).

\*) also held at TU Braunschweig

## Small Electronically Controlled Motors

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

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

Exercise: Dipl.-Ing. M. Wehner

### Contents

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

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

B.L.D.C. motors: magnet materials; designs for different number of phases, drum-type and disk-type 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 self-commutated 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)

## Elektronisch betriebene Kleinmaschinen

(6. bzw. 8. Semester), V2, Ü1

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

Übung: Dipl.-Ing. M. Wehner

### Inhalt

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

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

Elektronikmotoren: Magnetwerkstoffe; 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, Phasenanschnittsteuerung)

Schutzarten und Normen

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

## Elektrische Antriebs- systeme

(6. Semester), V2, Ü1

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

Hörsaalübung: Dipl.-Ing. F. Boseniuk

### Inhalt

Betriebsarten. Berechnungsverfahren zur Bestimmung des äquivalenten Dauerbetriebs.

Möglichkeiten der Drehzahlstellung bei Induktions- und Synchronmotoren; Vergleich bezüglich zusätzlicher Kosten und Verluste, Erzeugung von Pendelmomenten.

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.

Theorie der stationären Pendelungen von Synchronmaschinen. Stabilitätskriterien und Eintrittsfallen von Synchronmotoren.

Einführung in die Berechnungsverfahren der symmetrischen Komponenten für Augenblickswerte und der Park-Transformation (Spannungsgleichungen, Augenblickswert des elektromagnetischen Drehmomentes) zur Simulation transients Vorgänge. Nachbildung des mechanischen Wellenstranges (mehrgliedrige Schwinger, Betrachtungen zur mechanischen Dämpfung), Berücksichtigung der transienten Stromverdrängung.

Ausgleichsvorgänge in Induktionsmaschinen (Einschalten, symmetrische und unsymmetrische Klemmenkurzschlüsse, Spannungs-Wiederkehr, Netzumschaltungen).

Ausgleichsvorgänge in Synchronmaschinen mit Vollpol- oder Schenkelpol-Läufern (Einschalten von direkt am Netz liegenden Motoren, Einfluss der Dämpferwicklung und von Läufer-Anisotropien, symmetrische und unsymmetrische Klemmenkurzschlüsse aus dem Leerlauf oder einem Lastzustand, Fehlsynchronisation). Reak-

## Electrical Drive Systems

(6th term), V2, U1

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

Exercise: Dipl.-Ing. F. Boseniuk

### Contents

Operating modes. Calculation schemes for determination of the equivalent continuous operation.

Speed control of induction and synchronous machines: comparison with regard to additional costs and losses, generation of pulsation torques.

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.

Theory of oscillations of synchronous machines during steady-state operation, stability criteria and pulling in of synchronous motors.

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.

Transient phenomena in induction machines (starting, symmetrical and unsymmetrical short circuits, voltage recovery, transfer of bus-bar).

Transient phenomena in synchronous machines with cylindrical or salient-pole rotor (starting of directly mains-operated motors, influence of damper winding design and rotor anisotropies, symmetrical and unsymmetrical short circuits at no-load or under load, 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. Calculation scheme for coolant flows and temperature distribution. Studying and evaluation of the generated noise.

tanzen und Zeitkonstanten von Synchronmaschinen.

Konstruktive Einzelheiten: Bauformen und Kühlungsarten, explosionsgeschützte Maschinen, gegenseitige Beeinflussung von Kupplungs- und Lagerungsarten. Verfahren zur Berechnung der Kühlmittelströme und der Temperaturverteilung. Betrachtungen zur Geräusentwicklung und ihrer Beurteilung.

## Elektrische Antriebstechnik I

für Mechatroniker (3. Semester) und Maschinenbauingenieure (5. Semester), V2, Ü1

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

Übung: Dipl.-Ing. F. Fuchs

### Inhalt

Grundlegende Kenntnisse der elektrischen Antriebstechnik, der wesentlichen Normen und Vorschriften sowie der physikalischen Gesetze der elektromagnetischen Energiewandlung. Aufbau, Wirkungsweise und Steuerung von Kommutatormotoren.

Allgemeine Grundlagen der Antriebstechnik: Bewegungsgleichungen; Betriebsarten, Bauformen und -größen; Schutzarten elektrischer Maschinen.

Gleichstrommotoren (GM): Aufbau, Schaltungsarten, Betriebsverhalten, Steuerverfahren (elektrisch, elektronisch).

Kleinmotoren: Permanentmagneterregte GM, bürstenlose GM, Universalmotor; Stellantriebe.

Leistungselektronische Stellglieder für Gleichstromantriebe.

Messwerterfassung in elektrischen Antrieben. Antriebsverhalten mit und ohne Regelung.

**Empfohlene Vorkenntnisse:** Grundlagen der Elektrotechnik

## Electric Drives I

for mechatronics students (3rd term) and mechanical engineering students (5th term), V2, U1

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

Exercise: Dipl.-Ing. F. Fuchs

### Contents

Basic knowledge of electric drive technology, most important standards and regulations as well as physical laws of electromagnetic power conversion. Principles of operation and control of commutator motors.

Basics of electric drives: equations of motion; operating modes, designs and sizes; safety classes of electrical machines.

DC motors: design, modes of operation, performance, control methods (electric, electronic).

Small machines: permanent-magnet DC motors, brushless DC motors, universal motors, servo drives.

Power electronic control elements for DC drives.

Data acquisition in electrical drives. Drive behaviour with and without control.

**Recommended previous knowledge:** Basics of Electrical Engineering.

## Electric Drives II

for mechatronics students (4th term) and mechanical engineering students (6th term), V2, U1

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

Exercise: Dipl.-Ing. B. Ullrich  
M.Sc. E. Brune

### Contents

EC motor: design, functioning, behaviour, control.

Three-phase machines: basic principle of operation.

Synchronous machines: basics, design, performance, salient-pole machine, start-up, braking, speed control, step motors, generators (bike, motor vehicle).

Induction machines: design, mode of operation, performance, start-up, braking, speed control, asynchronous AC motors (capacitor motor, split-pole motor).

Power electronic control elements for three-phase motors.

Recommended previous knowledge: Basics of Electrical Engineering (incl. AC and three-phase systems), Electric Drives I

## Elektrische Antriebstechnik II

für Mechatroniker (4. Semester) und Maschinenbauingenieure (6. Semester), V2, Ü1

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

Übung: Dipl.-Ing. B. Ullrich  
M.Sc. E. Brune

### Inhalt

EC-Motor: Aufbau, Funktion, Betriebsverhalten, Ansteuerung.

Drehfeldmaschinen: Allgemeine Grundlagen.

Synchronmaschinen: Grundlagen, Aufbau, Betriebsverhalten, Schenkelpolmaschine, Anlauf, Bremsen, Drehzahlstellen, Schrittmotoren, Lichtmaschinen (Fahrrad, Kfz).

Asynchronmotoren: (Aufbau, Wirkungsweise, Betriebsverhalten, Anlassen, Bremsen, Drehzahlstellen, Wechselstrom-Asynchronmotoren (Kondensator-, Spaltpolmotor).

Leistungselektronische Stellglieder für Drehstromantriebe.

Empfohlene Vorkenntnisse: Grundlagen der Elektrotechnik (inkl. Wechsel- und Drehstromsysteme), Elektrische Antriebstechnik I

## Leistungselektronik I

(5. Semester), V2, Ü1

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

Übung: Dipl.-Ing. R. Meyer

### Inhalt

Aufgabe und Prinzip der Leistungselektronik (LE), Anwendungsfelder der LE, Bauelemente der LE, Verlustleistung und Kühlung.

Netzgeführte Stromrichter: Gesteuerte und ungesteuerte Gleichrichter für Wechsel- und Drehstromsysteme, Kommutierung, Netzrückwirkungen.

Selbstgeführte Stromrichter: Gleichstromsteller, Puls-Wechselrichter mit eingepprägter Spannung, Steuerverfahren und Modulation.

Stromrichtersysteme: Umkehrstromrichter, höherpulsige netzgeführte Stromrichter, Pulsrichter mit Spannungszwischenkreis.

**Empfohlene Vorkenntnisse:** Grundlagen der Elektrotechnik

## Power Electronics I

(5th term), V2, U1

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

Exercise: Dipl.-Ing. R. Meyer

### Contents

Tasks and principles of power electronics, fields of application, components, power losses and cooling.

Line-commutated power converters: controlled and uncontrolled rectifiers and converters for single and three-phase AC systems, commutation, mains interactions.

Self-commutated power converters: buck and boost DC to DC converters, three-phase voltage-source inverters, pulse with modulation and control.

Power converter systems: cyclo converters, line-commutated converters with higher number of pulses, PWM voltage-source AC to AC converters.

**Recommended previous knowledge:** Basics of Electrical Engineering

## Power Electronics II

(6th term), V2, U1

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

Exercise: Dipl.-Ing. A. Merkert

### Contents

Three-phase voltage-source inverters: space vector representation, space vector modulation, optimized pulse patterns, non-ideal characteristics of voltage-source inverters and corrective measures.

Self-commutated converters for high power: multi-level inverters, current-source inverters.

Oscillating circuits in power electronics: basics, commutation circuits, snubber networks, resonant and quasi resonant converters.

Isolated DC to DC converters: transformers,

forward converter, flyback converter, bridge converter.

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

## Leistungselektronik II

(6. Semester), V2, Ü1

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

Übung: Dipl.-Ing. A. Merkert

### Inhalt

Pulswechselrichter: Raumzeiger-Darstellung, Raumzeigermodulation, Optimierte Pulsmuster, nichtideale Eigenschaften von Pulswechselrichtern und Abhilfemaßnahmen.

Schwingkreise in der Leistungselektronik:

Grundlagen, Kommutierungsschaltungen, Schalentlastungen, Schwingkreiswechselrichter und Quasi-Resonanz-Stromrichter.

Schaltnetzteile: Transformatoren, Durchflusswandler, Sperrwandler.

Selbstgeführte Umrichter für hohe Leistungen: Mehrpunkt-Wechselrichter, Umrichter mit Stromzwischenkreis.

**Empfohlene Vorkenntnisse:** Grundlagen der Elektrotechnik, Leistungselektronik I

## Datenverarbeitungssysteme

(5. Semester), V2, Ü1

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

Übung: Dipl.-Ing. H. Krupp

### Inhalt

Grundlagen: Datenformate in Digitalrechnern, Boolesche Algebra, Logikschaltung, Prozessorarchitekturen und Programmiermodelle

Peripherie: Bussysteme, Schnittstellen, Massenspeicher, Ein-/Ausgabegeräte

Betriebssysteme: Single/Multi User, Multitasking

Echtzeitverarbeitung: Synchronisationsprinzipien, Kontext-Switching, Interruptbehandlung

Vernetzung: Kollisionserkennung/-vermeidung, Routing

## Data Processing Systems

(5th term), V2, U1

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

Exercise: Dipl.-Ing. H. Krupp

### Contents

Basics: data formats in digital computers, Boolean algebra, logic device, processor architectures and programming models

Peripherals: bus systems, interfaces, mass storage, input/output devices

Operating systems: single/multi user, multitasking

Real-time processing: synchronisation principles, context switching, interrupt handling

Networking: collision detection/avoidance, routing

## Power Semiconductors and Gate Drives

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

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

Exercise: Dipl.-Ing. T. Köneke

### Learning target:

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

### Contents:

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

The exercise is partly accompanied by practical experiments.

## Leistungshalbleiter und Ansteuerungen

(5. bzw. 7. Semester), V2, Ü1

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

Übung: Dipl.-Ing. T. Köneke

### Lernziel:

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

### Stoffplan:

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

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

## Regelung elektrischer Drehfeldmaschinen

(7. bzw. 9. Semester), V2, Ü1

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

Übung: Dipl.-Ing. L. Dang Hung

### Lernziel

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

### Stoffplan:

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

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

**Notwendige Vorkenntnisse:** Grundlagen der elektromagnetischen Energiewandlung (Elektrotechniker) oder Elektrische Antriebe I u. II (Mechatroniker)

**Empfohlene Vorkenntnisse:** Leistungselektronik I und Elektrische Antriebssysteme

## Control of Electrical Three-phase Machines

(7th or 9th term), V2, U1

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

Exercise: Dipl.-Ing. L. Dang Hung

### Learning target

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

### Contents:

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

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

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

**Recommended previous knowledge:** Power Electronics I and Electrical Drive Systems

## Dynamic Servo Drives

(6th or 8th term), V2

Lecture: Prof. Dr.-Ing. G. Huth

### Contents

Structure of servo drives, drive components: working process (e.g. tooling machines), motor, sensor, converter, control system.

Classification of dynamic servo drives, requirements for main drives and servo drives.

DC main drives, DC main spindle motors, line-commutated converters, steady-state performance characteristics, control for field weakening, multi-quadrant operation, drive modelling.

AC main drives, AC main spindle motors, vector control of three-phase induction motors, voltage-source converters, pulse inverters and pulse-width modulation, voltage-source converters with and without energy recovery, drive modelling, steady-state performance characteristics.

Development of position-controlled servo drives, configuring of servo drives.

DC servo drives, DC servo motors, 4-quadrant DC controller, steady-state performance characteristics, drive modelling.

AC servo drives, AC servo motors with permanent magnet excitation in block-type current and sinusoidal current technology, AC tachometer system, resolver sensor technology, steady-state performance characteristics, field-oriented operation, drive modelling, dimensioning of permanent magnet excitation, optimum short-circuit braking.

Speed-controlled main drive, position-controlled servo drive. Response characteristic of the linear position servo loop.

## Dynamische Regelantriebe

(6. bzw. 8. Semester), V2

Vorlesung: Prof. Dr.-Ing. G. Huth

### Inhalt

Antriebsstruktur von Regelantrieben, Betrachtung der Antriebskomponenten: Arbeitsprozess (z. B. Werkzeugmaschinen) Motor, Geber, Stromrichter, Leitsystem.

Abgrenzung der dynamischen Regelantriebe, Anforderungen an dynamische Haupt- und Servoantriebe.

DC-Hauptantriebe, DC-Hauptspindelmotoren, netzgeführter Stromrichter, stationäre Betriebskennlinien, Feldschwächregelung, Mehrquadrantenbetrieb, Antriebsmodellierung.

AC-Hauptantriebe, AC-Hauptspindelmotoren, feldorientierte Regelung von Drehstrom-Asynchronmotoren, Spannungszwischenkreis-Umrichter, Pulswechselrichter und Pulsbreitenmodulation, Zwischenkreis-Spannungsquellen ohne und mit Netzurückspeisung, Antriebsmodellierung, stationäre Betriebskennlinien.

Entwicklung der lagegeregelten Servoantriebe, Projektierung von Servoantrieben.

DC-Servoantriebe, DC-Servomotoren, 4-Q DC-Steller, stationäre Betriebskennlinien, Antriebsmodellierung.

AC-Servoantriebe, permanentmagneterregte AC-Servomotoren in Blockstrom- und Sinusstromtechnik, AC-Tachosystem, Resolver-sensorik, stationäre Betriebskennlinien, feldorientierter Betrieb, Antriebsmodellierung, Dimensionierung der Permanentmagneterregung, optimale Kurzschlussbremsung.

Drehzahl geregelter Hauptantrieb, lagegeregelter Servoantrieb. Übertragungsverhalten des linearen Lageregelkreises.

## Elektrische Bahnen und Fahrzeugantriebe

(6. und 8. Semester), V2

Vorlesung: Dr.-Ing. M. Hofstetter

### Inhalt

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

## Electrical Traction and Vehicle Drives

(6th and 8th term), V2

Lecture: Dr.-Ing. M. Hofstetter

### Contents

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

## Modelling of Electro-mechanical Micro Systems

(8th term), V2, U1

Lecture: Dr.-Ing. J. Steinbrink

Prof. Dr.-Ing. W. Mathis

### Contents

Basics of microelectromechanical and nanoelectromechanical systems (MEMS and NEMS), realised by methods based on micro or nano technology.

Introduction by using typical MEMS and NEMS based sensor and actuator systems, basics of mathematical modelling of coupled electromechanical systems, especially with respect to micro and nano technology, origin for numerical simulation methods, multilevel approaches to handle the high complexity of such systems, description of electromechanical models with finite degrees of freedom by means of the Lagrange formalism and models with infinite degrees of freedom using field-theoretical models, consideration of thermal, fluidic, optical and quantum-mechanical aspects, demonstration of the methods by using the examples mentioned above.

Presentation of the functional principles, the rough design, the particularities compared to "macro designs" based on conventional micro actuators, transfer to micro systems, basics of field-theoretical calculation methods (especially electromechanical) including appropriate material description of typical functional materials, determination of the operating behaviour and the control of micro systems by simulation of single examples, discussion of some semiconductor-based MEMS and NEMS sensors and their properties, simulation of the behaviour.

**Recommended previous knowledge:** micro system technology, control systems, electromagnetic fields, electric grids.

## Modellierung von elektromechanischen Mikrosystemen

(8. Semester), V2, Ü1

Vorlesung: Dr.-Ing. J. Steinbrink

Prof. Dr.-Ing. W. Mathis

### Inhalt

Grundzüge mikroelektromechanischer und nanoelektromechanischer Systeme (MEMS und NEMS), deren Realisierung mit Verfahren aus der Mikrotechnologie bzw. Nanotechnologie erfolgt.

Einführung anhand typischer MEMS- und NEMS-basierter Sensor- und Aktuatorssysteme, Grundlagen der mathematischen Modellbildung gekoppelter elektromechanischer Systeme unter besonderer Berücksichtigung der Mikro- und Nanotechnologie, Ausgangspunkte für numerische Simulationsverfahren, Multilevelansätze, um die hohe Komplexität solcher Systeme zu beherrschen, Beschreibung der elektromechanischen Modelle mit endlich vielen Freiheitsgraden mit Hilfe des Lagrangeformalismus und Modelle mit unendlich vielen Freiheitsgraden mit feldtheoretischen Modellen, Berücksichtigung thermischer, fluidischer, optischer und quantenmechanischer Aspekte, Demonstration der Methoden anhand der oben genannten Beispiele.

Darstellung der Funktionsprinzipien, des Grobentwurfs, den Besonderheiten gegenüber "Makroausführungen" ausgehend von konventionellen Mikroaktuatoren, Übergang auf Mikrosysteme, Vermittlung der Grundlagen der feldtheoretischen Berechnungsmethoden (speziell elektromagnetisch) inklusive angemessener Materialbeschreibung der typischen Funktionswerkstoffe, Bestimmung des Betriebsverhaltens und der Ansteuerung von Mikrosystemen durch Simulationen einzelner Beispiele, Diskussion einiger halbleiterbasierte MEMS- und NEMS-Sensoren und deren Eigenschaften, Simulation des Verhaltens.

**Empfohlene Vorkenntnisse:** Mikrosystemtechnik, Regelungstechnik, elektromagnetische Felder, elektrische Netzwerke.

## **Kolloquium „Elektrische Antriebssysteme“, „Berechnung elektrischer Maschinen“ und „Elektrische Klein- und Servoantriebe“**

Das Kolloquium hat das Ziel, die Studenten in den zugehörigen Fächern in der letzten Phase der Prüfungsvorbereitung zu unterstützen. Hierbei wird im Unterschied zu den Übungen auf die Selbständigkeit der Bearbeitung von Fragestellungen besonderer Wert gelegt. In der Regel werden die Lösungen von alten, im Idealfall von den Studenten vorgeschlagenen Übungs- oder Klausuraufgaben in Gruppenarbeit erarbeitet und diskutiert. Die betreuenden Assistenten moderieren den Lösungsweg und unterstützen die Lösung durch Beantwortung von Fragen. Je nach Zusammensetzung und Wissensstand der studentischen Gruppe werden mehrere unterschiedliche Themen aus der gesamten Inhaltspalette der zugeordneten Vorlesungen intensiv behandelt.

## **Colloquium on „Electrical Drive Systems“, „Theory of Electrical Machines“ and “Small Electrical Motors and Servo Drives”**

This colloquium aims at supporting the students in the respective subjects during their last phase of preparation before an exam. Compared to the exercises, strong emphasis is placed in the colloquium on solving problems without any assistance. In general, problems dealt with in former exams or those proposed by the students themselves are solved and discussed in groups. The approach how to solve a problem is presented by the assistants in charge of the colloquium and supported by answering all emerging questions. Depending on the group composition and the students' level of knowledge, several different themes treated in the respective lectures are discussed in detail.

## Laboratory Exercise on “Power Electronics”

**Coordination: Dipl.-Ing. L. Dang**

The power electronics lab consists of 8 experiments which are carried out by the students in small groups. These experiments largely cover the contents of the two lectures Power Electronics I and II. They serve for deepening the theoretical knowledge and learning how to handle converters and measuring tools in practice.

In general, industrial converters are used in these experiments. They are modified in a way that all necessary measuring signals are easily accessible. These signals are used to check various converter properties. Some experiments deal with semiconductors and their behaviour. Other experiments deal with the performance of line-commutated converters, as for ex. AC power controllers or three-phase bridge configurations. Self-commutated converters and their control methods are subject of three further experiments.

Digital simulation systems are used in electrical engineering for examining circuits and components. In one experiment, the students learn step by step about the possibilities of simulation in order to describe electrical processes using a 6-pulse thyristor bridge as an example.

## Labor „Leistungselektronik“

**Organisation: Dipl.-Ing. L. Dang**

Das Leistungselektroniklabor umfasst acht Versuche, die von Studenten in kleinen Gruppen durchgeführt werden. Diese acht Versuche decken einen Großteil der Themengebiete der Vorlesungen Leistungselektronik I und Leistungselektronik II ab. Sie dienen der Vertiefung des theoretisch gewonnenen Wissens und dem Erlernen des praktischen Umgangs mit Umrichtern und Messgeräten.

Bei der im Labor eingesetzten Hardware handelt es sich in der Regel um Industrienumrichter. Diese sind so erweitert worden, dass alle erforderlichen Messsignale leicht zugänglich sind. Mit diesen Signalen können verschiedene Eigenschaften der Umrichter überprüft werden. So werden in einigen Versuchen die Halbleiter und ihr Verhalten untersucht. Andere Versuche beschäftigen sich mit dem Betriebsverhalten von netzgeführten Umrichtern, wie zum Beispiel Wechselstromsteller oder Drehstrombrückenschaltungen. Selbstgeführte Umrichter und deren Steuerverfahren werden in drei Versuchen behandelt.

Digitale Simulationssysteme werden in der Elektrotechnik zur Untersuchung von Schaltungen und Bauelementen verwendet. In einem Versuch werden die Studenten am Beispiel einer sechspulsigen Thyristorbrücke schrittweise an die Möglichkeiten der Simulation zur Darstellung elektrischer Vorgänge herangeführt.

## Labor „Elektrische Maschinen“

Organisation: Dipl.-Ing. A. Brune

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

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

## Laboratory Exercise on „Electrical Machines“

Coordination: Dipl.-Ing. A. Brune

- DC motors
- universal motor
- synchronous motor with cylindrical rotor (operating characteristics)
- salient-pole synchronous machine (reactances and sudden short circuit)
- three-phase induction motor (operating characteristics)
- self-excited three-phase induction generator
- induction motor with stator and rotor unbalance
- single-phase induction motor

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

## Laboratory Exercise on „Electrical Drive Systems“

Coordination: Dipl.-Ing. A. Brune

- series wound DC motor fed by DC pulse-controlled converter (chopper)
- electronically commutated DC machine
- permanent magnet synchronous servo motor
- three-phase cage induction motor fed by pulse-controlled converter
- control methods of pulse-controlled converters for cage induction motor
- variable speed three-phase induction generator with wound rotor
- stepping motor
- digital cyclo converter

The experiments in the lab on „Electrical Drive Systems“ deal with the behaviour of converter-fed and electronically controlled electrical machines. The whole drive system, i.e. the motor and the converter, is examined. The experiments shall prove how the performance of conventional electrical machines can be influenced by modern power electronic components. In addition, modern B.L.D.C. motors and their control system are investigated.

As in the lab “Electrical Machines“, different measuring methods and instruments are used to determine electrical and mechanical characteristics of the drive systems.

## Labor „Elektrische Antriebssysteme“

Organisation: Dipl.-Ing. A. Brune

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

Die Versuche des Labors „Elektrische Antriebssysteme“ befassen sich mit dem Verhalten von stromrichter gespeisten bzw. elektronisch betriebenen elektrischen Maschinen. Es wird das gesamte Antriebssystem bestehend aus Motor und Stromrichter untersucht. Die Versuche sollen zeigen, wie das Betriebsverhalten von klassischen elektrischen Maschinen durch moderne leistungselektronische Komponenten beeinflusst werden kann. Des Weiteren werden moderne elektronisch betriebene Motoren und deren Steuerung bzw. Regelung untersucht.

Wie beim Labor „Elektrische Maschinen“ werden auch hier unterschiedliche Messmethoden und –geräte zur Bestimmung der elektrischen und mechanischen Eigenschaften des Antriebssystems eingesetzt.

## Studentische Arbeiten 2010/2011

### Students' Theses 2010/2011

#### Studienarbeiten

#### Short Theses

#### 2010

##### Benjamin Balke:

Leistungsflussoptimierung einer WEA mit inhärenten Energiespeichern

Power flow optimisation of wind turbines using inherent energy storage

##### Tobias Krone:

Untersuchung neuer Ansätze zur geberlosen Rotorlageerfassung einer permanentmagneterregten Synchronmaschine im Stillstand

Investigation of new approaches for sensorless rotor position control in a permanent magnet synchronous machine at standstill

##### Felix Müller-Deile:

Überarbeitung und Erweiterung eines Programms zur Ermittlung der Wellenspannung in elektrischen Maschinen

Revision and enhancement of a software for shaft voltage prediction in electrical machines

##### Francesco Quattrone:

Analytisch-numerische Berechnung doppeltgespeister Asynchrongeneratoren mit dem analytischen Programm ASYN in Kombination mit der numerischen Software FEMAG

Analytical/numerical calculation of doubly-fed induction generators using the analytical software ASYN combined with the numerical software FEMAG

##### Patrick Tien:

Aufbau eines Lagegebers zur Positionserfassung eines Linearantriebs

Design of a position sensor for the position control of a linear drive

##### Edmond Todem:

Steuerung eines Wicklungsprozesses zur Platzierung dünner Drähte

Control of a winding process for positioning of thin wires

##### Bastian Weber:

Untersuchung eines DC/DC-Wandlers mit großem Eingangsspannungsbereich und sich schnell ändernder Eingangsspannung

Investigation of a DC/DC converter with large input voltage range and quickly changing input voltage

##### Yi Zhu:

Konzeptionierung und Implementierung eines FPGA-basierten Mikrocontrollers mit Ein- und Ausgabeschnittstellen zur Antriebsregelung

Conceptual design and implementation of a FPGA-based micro controller with in/output interfaces for drive control

#### 2011

##### Christian Dick:

Untersuchung eines modularen Multilevel-Frequenzumrichters für Anwendungen im Mittelspannungsbereich

Investigation of a modular multilevel frequency converter for medium-voltage applications

##### Michael Dörbaum:

Numerische und analytische Untersuchung von Wechselstrominduktionsmotoren und Erweiterung um ein thermisches Berechnungsmodell

Numerical and analytical investigation of AC induction motors enhanced by a thermal calculation model

##### Sebastian Heimbürger:

Entwurf und Aufbau eines Pulswechselrichters zum Einsatz in einem Automobil

Design and implementation of a voltage source inverter for use in a car

**Alexander Kirchfeld:**

Auslegung und Entwurf eines Kühlsystems für den Einsatz in einem Elektrorennwagen

Design of a cooling system for the application in an electric race car

**Ulrich Kost:**

Inbetriebnahme und Anpassung eines Lagegebers für einen Linearmotor

Operation and customization of a position sensor for a linear motor

**Onur Misir:**

Untersuchung des Betriebsverhaltens von Induktionsmaschinen mit unterschiedlichen Wicklungswiderständen je Strang im Umrichterbetrieb

Investigation of the performance of converter-fed induction machines with different winding resistances in each phase

**Jan Stempel:**

Konzeption und Entwicklung eines Antriebsmotors für einen Rennwagen der Formula Student Electric

Conceptual design and development of a drive motor for use in a Formula Student Electric racing car

**Malte von Hofen:**

Integrierbarkeit und Vergleich eines switched capacitor DC/DC-Wandlers mit herkömmlichen Spannungsreglern

Integrability and comparison of a switched capacitor DC/DC converter with conventional voltage controllers

**Simon Weber:**

Realisierung und Untersuchung eines DC/DC-Wandlers mit sehr großem Eingangsspannungsbereich für ein Brückenmodul eines modularen Pulswechselrichters

Realisation and investigation of a DC/DC converter with considerably large input voltage range for use in a bridge module of a modular voltage source inverter

**Bachelorarbeiten****Bachelor Theses****2010****Jens Bastian:**

Entwurf und Implementierung einer Regelung für den Antriebsumrichter eines elektrifizierten dreirädrigen Motorrollers

Design and implementation of a control system for the drive inverter of an electrified three-wheel motor scooter

**Boris Meyering:**

Untersuchung von Fehlerfällen bei umrichter-gespeisten elektrischen Maschinen im Einsatz als Traktionsantrieb

Investigation of faults in converter-fed electrical machines used as traction drives

**Xi Zhu:**

Simulation und Implementierung einer Strom/Spannungsregelung für eine H-Brücke unter Verwendung von SB-ZePoC

Simulation and implementation of a current/voltage control for a H bridge using SB-ZePoC

**2011****Stefan Lücke:**

Modellierung von direkt am Netz betriebenen elektrischen Maschinen für ein "Hardware in the Loop" Netzmodell

Modelling of grid-connected electrical machines for a "Hardware in the Loop" grid model

**Malte Ortlieb:**

Berechnung der Spannungsbeanspruchung an den Motorklemmen unter Berücksichtigung der Kabelgeometrie bei Umrichterspeisung

Calculation of the voltage at motor terminals considering the cable geometry in case of converter supply

**Bastian Weber:**

Geberlose Regelung von permanentmagneterregten Synchronmaschinen unter Ausnutzung von Oberharmonischen des Pulswechselrichters

Transducerless control of permanent magnet synchronous machines utilizing higher harmonics of the voltage source inverter

**Arne Schlinker:**

Leistungssteigerung eines planaren 3RRR Parallelroboters durch Implementierung eines redundanten Linearantriebs und optimale Bahnplanung

Increased performance of a planar 3RRR parallel robot via implementation of a redundant linear drive and optimum path planning

**Diplomarbeiten****Diploma Theses****2010****Abdallah Any:**

Untersuchung von MOSFET-Eigenschaften auf ihre Eignung zur Strombestimmung in einem Umrichter

Testing of MOSFET properties concerning their suitability to measure the current in a converter

**Florian Boseniuk:**

Implementierung und Analyse einer Motorsteuerung für einen permanentmagneterregten Motor basierend auf einem inversen Maschinenmodell

Implementation and analysis of a motor control for permanent magnet motors based on an inverse machine model

**Yifeng Chu:**

Entwurf eines Linearantriebs für Förderbänder nach dem Hybrid-Schrittmotor-Prinzip

Design of a linear drive for conveyor belts based on the hybrid stepping motor principle

**Adnan Nuhic:**

Untersuchung magnetischer Sättigungseffekte bezüglich Verfahren zur sensorlosen Regelung von permanentmagneterregten Synchronmotoren

Examination of magnetic saturation effects concerning sensorless position control methods for permanent magnet synchronous motors

**Bernhard Ullrich:**

Untersuchungen zur geberlosen Rotorlagebestimmung von permanenterregten Synchronmotoren in Sternschaltung

Investigations concerning sensorless rotor position control of permanent magnet synchronous motors in star connection

**Özgür Yildirim:**

FEM-gestützte Auslegung, Aufbau und Positionsregelung eines neuartigen pneumatischen Lineardirektantriebs

FEM-assisted design, setup and position control of a novel pneumatic gearless linear drive

**Dammon Ziaian:**

Simulation und Entwicklung einer rückspeisefähigen Leistungselektronik zur Ansteuerung einer elektromagnetischen Dämpfungseinheit

Simulation and development of a regenerative power electronic system to control an electromagnetic damping unit

**2011****Benjamin Balke:**

Untersuchung der Erweiterungsmöglichkeiten des Noise, Vibration, Harshness (NVH)-Tests eines konventionellen Getriebeprüfstands zur Prüfung von Hybridgetrieben

Investigation of possible enhancements of the noise, vibration, harshness (NVH) test carried out on a conventional transmission test bench for hybrid gear drives

**Peter Dück:**

Vorausberechnung von permanentmagneterregten und elektrisch erregten Synchronmaschinen als Traktionsantrieb für Elektrofahrzeuge

Pre-calculation of permanent magnet and electrically excited synchronous machines to be used as traction drives in e-vehicles

**Kacper Emmrich:**

Untersuchung unterschiedlicher Nutzhalkombinationen im Hinblick auf Eisenquerströme bei Induktionsmaschinen

Examination of different combinations of slot numbers with regard to quadrature iron currents in induction machines

**Edmond Joel Feune:**

Entwicklung eines Reglerkonzepts für die aktive Dämpfung von Spindeln

Development of a controller concept for active spindle damping

**Marc Müller:**

Ableitung von Verlustkennziffern aus Wirbelstromberechnungen verschiedener Motoren

Derivation of loss coefficients from eddy-current calculations for different motors

**Peter Markmann:**

Untersuchung von elektromagnetisch angeregten Geräuschen an permanenterregten Synchronmaschinen unter kombinierter Verwendung analytischer und numerischer Modelle

Examination of electromagnetically excited noise in permanent magnet synchronous machines using a combination of analytical and numerical models

**Issa Nemati:**

Einfluss der Strommessung auf den geberlosen Betrieb von Drehfeldmaschinen

Influence of current measurement on sensorless operation of three-phase machines

**Francesco Quattrone:**

Aktive Verlustregelung durch dynamische Nachbildung von Verlusten in elektrischen Maschinen

Dynamic modeling of losses in electrical machines for active loss control

**Jannik Teuber:**

Untersuchung parallel geschalteter dreiphasiger Pulswechselrichter mit Spannungszwischenkreis

Examination of parallel-connected three-phase voltage source inverters with DC link

**Patrick Tien:**

Untersuchung und Entwicklung von direkt digital geregelten Ansteuerungsverfahren für Hochleistungs-IGBTs

Examination and design of direct digital control methods for high-performance IGBTs

**Oliver Wienrich:**

Entwicklung eines Kühl- und Thermomanagementkonzepts für Pkw mit alternativen Antrieben

Development of a cooling and thermal management concept for automobiles with alternative drives

**Jin Zhang:**

Optimierung eines alternativen Verfahrens zur Strombestimmung in einem Umrichter

Optimisation of an alternative method to determine the current in a converter

**Yi Zhu:**

Untersuchung, Aufbau und Regelung von Gleichspannungswandlern zur elektrischen Konditionierung eines SOFC Brennstoffzellen-Systems kleiner Leistung

Investigation, setup and control of DC/DC converters for electrical conditioning of a low-power SOFC fuel cell system

## Masterarbeiten

### Master Theses

2010

**Rami Abusabbah:**

Nichtlineare adaptive Identifikation eines linearen Hybridschrittmotors zur Kompensation der Nut-rastkraft

Adaptive nonlinear identification of a hybrid step-ping motor for cogging force compensation

**Eva-Maria Brune:**

Selbsterregte Schwingungen bei netzgespeisten permanenterregten Synchronmotoren

Self-excited vibrations in line-supplied permanent magnet synchronous motors

**Dong Ding:**

Erstellung und Auslegung eines Simulationsmo-dells für einen Flächenmotor

Dimensioning of a simulation model for a planar motor

**Viet Long Do:**

Implementierung einer Positionsregelung für ei-nen Synchron-Linear-Mikromotor unter Verwen-dung eines analogen linearen Stromreglers

Implementation of a position control for a syn-chronous linear micro motor using an analog linear current controller

**Quang Ha:**

Auslegung, Aufbau und Inbetriebnahme eines stromgeregelten 6-strängigen Switched Capacitor DC/DC-Wandlers für einen Mikrolinearantrieb

Design, implementation and commissioning of a current-controlled 6-phase switched capacitor DC/DC converter for a linear micro drive system

**Manh Linh Le:**

Untersuchung der Interleaving-Technik in drei-phasigen Zwei-Punkt-Wechselrichtern mit Aus-gangfilter

Analysis of interleaving technique in 3-phase 2-level inverters with output filter

**Ajmal Naderi:**

Aufbau und Inbetriebnahme einer Spannungs-versorgung und eines Antriebsumrichters für die Elektrifizierung eines dreirädrigen Motorrollers

Design and implementation of a power supply and of an inverter for the electrification of a three-wheel motor scooter

**Quang Nhu Tran:**

Untersuchung und Implementierung einer sensor-losen Drehzahlregelung für umrichter gespeiste Asynchronmaschinen

Investigation and implementation of a sensorless speed control for converter-fed induction ma-chines

2011

**Dennis Bresemann:**

Entwurf und Implementierung einer Traktionskon-trolle und Torque Vectoring in einem Elektro-rennwagen

Design and implementation of a traction control and torque vectoring in an e-racing car

**Yousef Firouz:**

Analytische Verlustberechnung eines 3-Level-NPC-Umrichters mit LCL-Filter

Analytical loss calculation of a 3-level NPC con-verter with LCL filter

**Luong Thi Thanh Ha:**

Numerische Analyse und Vergleich des Einflus-ses realer Eigenschaften von Elektroblechen auf das Maschinenverhalten von PM-Maschinen mit FEMAG

Numerical analysis and comparison of the influ-ence of real properties of electro sheets on the behaviour of PM machines with FEMAG

**Mohammad Ebrahimi Jamarani:**

Untersuchung der Wärmebelastung von Leis-tungshalbleitern in Windenergieanlagen mit dop-peltgespeistem Asynchrongenerator

Investigation of the thermal load of power semi-conductors used in wind turbines with doubly-fed induction generator

**Michael Koch:**

Analyse von Netzfehlern bei Windenergieanlagen mit permanenterregter Synchronmaschine und NPC-Mittelspannungsumrichter in der Simulation

Analysis of line disturbances in wind energy plants designed with PM synchronous machine and NPC medium-voltage converter in the simulation phase

**Seyyed Kamyar Makinejad:**

Entwicklung, Realisierung und Prüfung eines SoC- und SoH-Überwachungssystems für VRLA-Batterien

Development, realisation and test of a state-of-charge (SoC) and state-of-health (SoH) monitoring system for valve-regulated lead-acid (VRLA) batteries

**Boris Meyering:**

Vergleich und Optimierung verschiedener Maschinentypen für den Einsatz in einem Elektrorennwagen

Comparison and optimisation of different machine types for use in an e-racing car

**Liu Qi:**

Aufbau einer Schnittstelle zwischen den FE-Programmen SEMOFLOR/FEMAG zur elektromagnetischen Berechnung und ABAQUS zur mechanischen Berechnung

Design of an interface between the FEM software SEMOFLOR/FEMAG for electromagnetic calculation and ABAQUS for mechanical calculation

## Mitarbeiter des IAL

Auf den folgenden Seiten präsentieren sich die Mitarbeiter des IAL. Die Zahl der wissenschaftlichen Mitarbeiter ist in den Jahren 2010 und 2011 erneut leicht gestiegen, so dass jetzt über 30 wissenschaftliche Mitarbeiter und Stipendiaten ihre Promotion anstreben. Hinzu kommen 2 Oberingenieure des IAL und 2 aktive sowie 3 emeritierte bzw. pensionierte Professoren und 2 Lehrbeauftragte. Im Bereich des nichtwissenschaftlichen Personals sind nach wie vor 3 Mitarbeiter im technischen sowie 3 Mitarbeiterinnen im Verwaltungsdienst tätig. Sie bilden die stabile Basis und sorgen gemeinsam mit den Oberingenieuren und Professoren für die erforderliche Kontinuität.

Frau Rottländer hat unser Sekretariat verlassen, die Lücke schließt Frau Dipl.-Ing. (FH) Singer.

Im Bereich der wissenschaftlichen Mitarbeiter hat uns eine ganze Reihe von Herren turnusmäßig verlassen (Herren Dempewolf, Ganesan, Garbe, Helmer, Jastrzembski, Kuhn, Nguyen, Rüger).

Herr Gröninger wechselte zum FhG-IFAM, wo Herr Kock bereits seit Dezember 2009 tätig ist.

An Neuzugängen freuen wir uns über Frau Brune sowie über die Herren Boseniuk, Bresemann, Dietz, Dück, Emmrich, Fuchs, Kaczorowski, Koupeny, Krupp, Quattrone und Ullrich, auch hier wieder zu gleichen Teilen für die beiden Fachgebiete des IAL.

Die Erfolge der vergangenen Jahre beruhen maßgeblich auf den hervorragenden Fähigkeiten und dem sehr starken Engagement unserer Mitarbeiter in allen Bereichen. Dafür möchten wir an dieser Stelle unseren besonderen Dank aussprechen.

## Staff of IAL

In the following, we would like to present you our staff members. In 2010 and 2011, the number of research associates increased again. At present, more than 30 research associates and visiting scholars do their PhD at IAL. 2 senior engineers, 2 active and 3 emeritus or retired professors as well as 2 external lecturers complete the scientific staff. 3 administrative and 3 technical staff members represent our solid base and, together with the senior engineers and professors, they provide the necessary continuity.

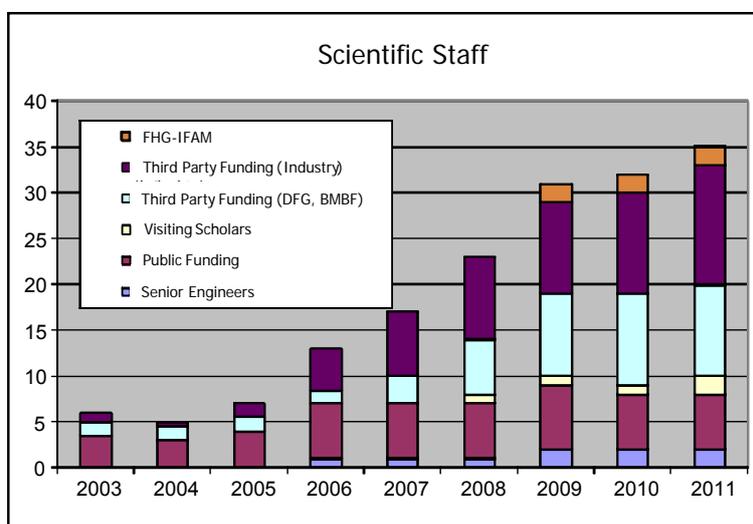
Mrs. Rottländer left the office and was replaced by Mrs. Dipl.-Ing. (FH) Singer.

Among our research associates, quite a number left IAL after four or five years to take over jobs in industry (Messrs. Dempewolf, Ganesan, Garbe, Helmer, Jastrzembski, Kuhn, Nguyen, Rüger).

Mr. Gröninger changed to FHG-IFAM, where Mr. Kock already works since December 2009.

As new research associates, we welcome Mrs. Brune and Messrs. Boseniuk, Bresemann, Dietz, Dück, Emmrich, Fuchs, Kaczorowski, Koupeny, Krupp, Quattrone and Ullrich, equally shared by the two IAL chairs.

The last years' success was mainly achieved thanks to the outstanding skills and the enormous commitment of every single member of our staff. At this point, we would like to thank everybody, hoping for many future years of fruitful cooperation.



Leibniz Universität Hannover  
 Institut für Antriebssysteme und Leistungselektronik  
 Welfengarten 1, 30167 Hannover

Phone +49(0)511-762-2514  
 Fax +49(0)511-762-3040  
[www.ial.uni-hannover.de](http://www.ial.uni-hannover.de)

### Professoren ♦ Professors

Prof. Dr.-Ing. Axel Mertens  
 Fachgebiet Leistungselektronik und Antriebsregelung  
 Power Electronics and Drive Control  
 Phone 762-2471, mertens@ial.uni-hannover.de

Prof. Dr.-Ing. Bernd Ponick  
 Fachgebiet Elektrische Maschinen und Antriebssysteme  
 Electrical Machines and Drive Systems  
 Phone 762-2571, ponick@ial.uni-hannover.de

Prof. i. R. Dr.-Ing. Johannes Nestler  
 Fachgebiet Leistungselektronik  
 Power Electronics

em. Prof. Dr.-Ing. H. O. Seinsch  
 Fachgebiet Elektrische Maschinen  
 Electrical Machines  
 Phone 762-2515, seinsch@ial.uni-hannover.de

Prof. i. R. Dr.-Ing. H.-D. Stölting  
 Fachgebiet Elektrische Kleinmaschinen  
 Small Electrical Machines

### Lehrbeauftragte ♦ Ext. Lecturers

Prof. Dr.-Ing. Gerhard Huth  
 Dynamische Regelantriebe  
 Dynamic Servo Drives

Dr.-Ing. Matthias Hofstetter  
 Elektrische Bahnen und Fahrzeugantriebe  
 Electrical Traction and Vehicle Drives

### Oberingenieure ♦ Senior Engineers

Dr.-Ing. Jörn Steinbrink  
 Phone 762-2864, steinbrink@ial.uni-hannover.de

### Verwaltung ♦ Administration

Dipl.-Fachübers. Petra Duensing  
 Phone 762-2514, duensing@ial.uni-hannover.de

Nina Schulz-Meden  
 Phone 762-2514, schulz-meden@ial.uni-hannover.de

Dipl.-Ing. (FH) Iris Singer  
 Phone 762-2514, iris.singer@ial.uni-hannover.de

### Techn. Angestellte ♦ Technical Staff

Udo Grendler  
 Phone 762-2860, grendler@ial.uni-hannover.de

Dipl.-Ing. (FH) Clemens Larivière  
 Phone 762-2860, lariviere@ial.uni-hannover.de

Carsten Selke  
 Phone 762-2215, selke@ial.uni-hannover.de

### Stipendiaten ♦ Stipendiaries

M.Sc. Jaroslav Koupeny  
 Phone 762-5224, jaroslav.koupeny@ial.uni-hannover.de

M. Eng. Mohamed Shams El-Deen  
 Phone 762-5614, shamseldeem@ial.uni-hannover.de

### Wiss. Mitarbeiter ♦ Scientific Staff

Dipl.-Ing. Lennart Baruschka  
 Phone 762-5616, baruschka@ial.uni-hannover.de

Dipl.-Ing. Florian Boseniuk  
 Phone 762-2896, florian.boseniuk@ial.uni-hannover.de

Dipl.-Ing. Dirk Braunsch  
 Phone 762-2839, braunsch@ial.uni-hannover.de

M.Sc. Dennis Bresemann  
 Phone 762-5224, dennis.bresemann@ial.uni-hannover.de

Dipl.-Ing. André Brune  
 Phone 762-5617, andre.brune@ial.uni-hannover.de

M.Sc. Eva Brune  
 Phone 762-3766, eva.brune@ial.uni-hannover.de

Dipl.-Ing. Lan Dang Hung  
 Phone 762-2829, dang@ial.uni-hannover.de

Dipl.-Ing. René Dietz  
 Phone 762-3758, rene.dietz@ial.uni-hannover.de

Dipl.-Ing. Peter Dück  
 Phone 762-5224, peter.dueck@ial.uni-hannover.de

Dipl.-Ing. Jakob Emmrich  
 Phone 762-3778, emmrich@ial.uni-hannover.de

Dipl.-Ing. Kacper Emmrich  
 Phone 762-2408, kacper.emmrich@ial.uni-hannover.de

Dipl.-Ing. Felix Fuchs  
 Phone 762-5347, felix.fuchs@ial.uni-hannover.de

Dipl.-Ing. Thorsten Getschmann  
 Phone 762-2391, getschmann@ial.uni-hannover.de

M.Sc. Gerd Janssen  
 Phone 762-3767, janssen@ial.uni-hannover.de

Dipl.-Ing. Peter Juris  
 Phone 762-2407, juris@ial.uni-hannover.de

Dipl.-Ing. (FH) Dennis Kaczorowski, phone 762-3765  
 dennis.kaczorowski@ial.uni-hannover.de

Dipl.-Ing. Thies Köneke  
 Phone 762-2863, koeneke@ial.uni-hannover.de

Dipl.-Ing. Michael Kriese  
 Phone 762-5346, kriese@ial.uni-hannover.de

Dipl.-Ing. Henrik Krupp  
 Phone 762-4231, henrik.krupp@ial.uni-hannover.de

Dipl.-Ing. Arvid Merkert  
 Phone 762-2862, merkert@ial.uni-hannover.de

Dipl.-Ing. Robert Meyer  
 Phone 762-5613, meyer@ial.uni-hannover.de

Dipl.-Ing. Francesco Quattrone, phone 762-5224  
 francesco.quattrone@ial.uni-hannover.de

Dr.-Ing. Cornelia Stübig  
 Phone 762-2874, stuebig@ial.uni-hannover.de

Dipl.-Ing. Sebastian Tegeler  
 Phone 762-2891, tegeler@ial.uni-hannover.de

Dipl.-Ing. Bernhard Ullrich  
 Phone 762-2858, Bernhard.ullrich@ial.uni-hannover.de

Dipl.-Ing. Meike Wehner  
 Phone 762-3764, meike.wehner@ial.uni-hannover.de

Dipl.-Ing. Timur Werner  
 Phone 762-2217, werner@ial.uni-hannover.de

Dipl.-Ing. Karsten Wiedmann  
 Phone 762-2510, wiedmann@ial.uni-hannover.de

Dipl.-Ing. Michael Wöhrmann  
 Phone 762-3770, woehrmann@ial.uni-hannover.de

## Mitarbeiter des IAL

### IAL Staff Members



Prof. Dr.-Ing.  
**Axel Mertens**  
Leistungselektronik  
und Antriebsregelung  
Power Electronics and  
Drive Control



Prof. Dr.-Ing.  
**Bernd Ponick**  
Elektrische Maschinen  
und Antriebssysteme  
Electrical Machines  
and Drive Systems



Prof. i.R. Dr.-Ing.  
**Johannes Nestler**  
Leistungselektronik  
Power Electronics



em. Prof. Dr.-Ing.  
**H. O. Seinsch**  
Elektrische Maschinen  
Electrical Machines



Prof. i.R. Dr.-Ing.  
**H.-D. Stöltzing**  
Elektrische  
Kleinmaschinen  
Small Electrical  
Machines



Dr.-Ing  
**Jörn Steinbrink**  
Oberingenieur  
Senior Engineer



Dipl.-Ing.  
**Karsten Wiedmann**  
Oberingenieur  
Senior Engineer



Dr.-Ing  
**Volker Schöber**  
Geschäftsführer  
„Energie 2050“  
Managing Director  
„Energy 2050“



Prof. Dr.-Ing.  
**Gerhard Huth**  
Gastdozent  
External Lecturer



Dr.-Ing.  
**M. Hofstetter**  
Gastdozent  
External Lecturer



Dipl.-Fachübers.  
**Petra Duensing**  
Verwaltung  
Administration



Betriebswirtin  
**N. Schulz-Meden**  
Verwaltung  
Administration



Dipl.-Ing. (FH)  
**Iris Singer**  
Verwaltung  
Administration



MSR-Techniker  
**Udo Grendler**  
Tech. Angestellter  
Lab Assistant



Dipl.-Ing. (FH)  
**Clemens Larivière**  
Tech. Angestellter  
Lab Assistant



Industriemeister  
**Carsten Selke**  
Werkstatt  
Shop Technician

### Stipendiaten und externe Mitarbeiter ♦ Stipendiaries and External Associates



M. Sc.  
**M. Shams El-Deen**  
Stipendiat  
Stipendiary



M. Sc.  
**Jaroslav Koupény**  
Stipendiat  
Stipendiary



Dipl.-Ing.  
**Michael Gröninger**  
IFAM



Dipl.-Ing.  
**Alexander Kock**  
IFAM

## Wissenschaftliche Mitarbeiter ♦ Research Associates



Dipl.-Ing.  
**Lennart Baruschka**



Dipl.-Ing.  
**Florian Boseniuk**



Dipl.-Ing.  
**Dirk Braunsch**



M. Sc.  
**Dennis  
Bresemann**



Dipl.-Ing.  
**Andre Brune**



M. Sc.  
**Eva Brune**



Dipl.-Ing.  
**Lan Dang Hung**



Dipl.-Ing.  
**René Dietz**



Dipl.-Ing.  
**Peter Dück**



Dipl.-Ing.  
**Jakob Emmrich**



Dipl.-Ing.  
**Kacper Emmrich**



Dipl.-Ing.  
**Felix Fuchs**



Dipl.-Ing.  
**Thorsten  
Getschmann**



M. Sc.  
**Gerd Janssen**



Dipl.-Ing.  
**Peter Juris**



Dipl.-Ing. (FH)  
**Dennis  
Kaczorowski**



Dipl.-Ing.  
**Thies Köneke**



Dipl.-Ing.  
**Michael Kriese**



Dipl.-Ing.  
**Henrik Krupp**



Dipl.-Ing.  
**Arvid Merkert**



Dipl.-Ing.  
**Robert Meyer**



Dipl.-Ing.  
**Francesco  
Quattrone**



Dr.-Ing.  
**Cornelia Stübzig**



Dipl.-Ing.  
**Sebastian Tegeler**



Dipl.-Ing.  
**Bernhard Ullrich**



Dipl.-Ing.  
**Meike Wehner**



Dipl.-Ing.  
**Timur Werner**



Dipl.-Ing.  
**Michael Wöhrmann**

**Ehemalige Mitarbeiter 2010/2011 ♦ Former Staff Members 2010/2011**



Dr.-Ing.  
**Andreas  
Averberg**  
Oberingenieur  
Senior Engineer



Prof. Dr.-Ing.  
**Mark Bakran**  
Gastdozent  
External Lecturer



Dipl.-Ing.  
**Kay-Horst  
Dempewolf**  
wiss. Mitarbeiter  
Research ass.



M. Sc.  
**Vijay Anantham  
Ganesan**  
wiss. Mitarbeiter  
Research ass.



Dipl.-Ing.  
**Eike Garbe**  
wiss. Mitarbeiter  
Research ass.



Dipl.-Ing.  
**Rainer Helmer**  
wiss. Mitarbeiter  
Research ass.



Dipl.-Ing.  
**J.-P. Jastrzembki**  
wiss. Mitarbeiter  
Research ass.



Dr.-Ing.  
**Harald Kuhn**  
wiss. Mitarbeiter  
Research ass.



M. Sc.  
**Chinh Nguyen**  
wiss. Mitarbeiter  
Research ass.



Hotelfachfrau  
**Nicole Rottländer**  
Verwaltung  
Administration



Dipl.-Ing.  
**Niklas Rüger**  
wiss. Mitarbeiter  
Research ass.

## Chronik 2010/2011

### Chronicle 2010/2011

#### Januar 2010

**01.01.**

André Brune beginnt als Assistent am IAL.

**06.01.**

Exkursion zur Fa. Bosch, Hildesheim

**14.-17.01.**

Betriebsausflug zum verlängerten Skiwochenende in Marianska (Erzgebirge) (Erholungsheim der Tschechischen Akademie der Wissenschaften Prag)

**29.01.**

Letzter Arbeitstag von Nicole Rottländer

#### Februar 2010

**08.02.**

Ausrichtung des ETG-Workshops „Stromrichtergespeiste Elektromaschinen“ in den Räumen der LUH mit über 100 Teilnehmern aus Forschung und Industrie und Vorträgen von Prof. Mertens und Prof. Ponick

#### März 2010

**11.03.**

Alexander Kock erhält den vom BMBF in Nürnberg verliehenen DRIVE-E-Studienpreis für Innovationen im Bereich der Elektromobilität.

**16.-18.03.**

Vortrag von Thies Köneke auf der CIPS 2010 in Nürnberg

**18.03.**

Institutsbowlingabend

**18./19.03.**

Vortrag von Prof. Ponick auf dem Kleinmaschinenkolloquium in Ilmenau

**22.-24.03.**

Vorträge von Prof. Ponick auf einem Symposium der Fa. WEG in Jaragua do Sul, Brasilien

#### April 2010

**01.04.**

Felix Fuchs beginnt als Assistent am IAL.

**12.04.**

30. Geburtstag von Dirk Braunsch

**14.04.**

Vortrag am IAL von Dr. Jurisch, Vacuumsmelze GmbH

**19.- 23.04.**

Aussteller auf der Hannover Messe Industrie im Rahmen des Gemeinschaftsstands der LUH zum Themengebiet "Transformation des Energiesystems"

Vortrag von Prof. Mertens auf dem Energieforum "Life Needs Power"

**30.04.**

Letzter Arbeitstag von Rainer Helmer

#### Mai 2010

**01.05.**

Eva Maria Brune beginnt als Assistentin am IAL.

**06.05.**

Vortrag am IAL von Dr. Alexander, Robert Bosch GmbH

**07.05.**

Hochzeit von Meike Wehner (geb. Kriegesmann)

**19.05.**

Kolloquium „Netzanbindung regenerativer Energien“ mit anschließender Einweihung der institutseigenen Photovoltaik-Anlage

**29.04.**

Vortrag von Prof. Mertens zum Thema "E-Mobility" auf dem parlamentarischen Abend des Landes Niedersachsen in Hannover

## Juni 2010

**01.06.**

Iris Singer beginnt als Sekretärin am IAL.

**07.06.**

Vortrag am IAL von Dr. Wiebicke, E+A Elektromaschinen und Antriebe AG (CH)

**08.06.**

30. Geburtstag von Timur Werner

Vortrag am IAL von Herrn R. Meyer, Robert Bosch GmbH

Eva Maria Brune erhält den Zonta-Preis für Nachwuchswissenschaftlerinnen, verliehen durch den Zonta-Club Hannover.

**16.06.**

Rainer Helmer und Peter Dück stellen auf der SPEEDAM-Konferenz in Pisa ein Verfahren zur schnellen und automatisierten Berechnung transienter Reaktanzen mit FEMAG vor.

**23.06.**

Exkursion zum Siemens Generatorenwerk in Erfurt

**24.06.**

Andreas Averberg ist mit einem Poster zum Thema „Speisung eines 750 V Zwischenkreises aus einer SOFC bei der IPEC ECCE-Asia in Sapporo, Japan vertreten.

**29.06.**

E-Mobility-Day@IAL mit einer Vortragsreihe zum Thema E-Mobilität und verschiedenen E-Fahrzeugen vom E-Scooter bis zum Tesla Roadster



**30.06.**

Gastvorlesung von Dr. Schacht, DIN Software GmbH

Letzter Arbeitstag von Kay-Horst Dempewolf

## Juli 2010

**15.07.**

Hochzeit von Kay-Horst Dempewolf

Exkursion im Rahmen der Bahnenvorlesung zur Fa. Siemens nach Nürnberg

**30.07.**

Letzter Arbeitstag von Harald Kuhn

## August 2010

**04.08.**

Cornelia Stübig wird Mutter.

**07.08.**

Hochzeit von Karsten Wiedmann

**12.08.**

Betriebsausflug zum Straßenbahnmuseum in Sehnde



**13.08.**

30. Geburtstag von Jakub Emmrich

**22.08.**

30. Geburtstag von Vijay Ganesan

## September 2010

**01.09.**

Bernhard Ullrich beginnt als Assistent am IAL.

**06.-08.09.**

Vorträge und Poster von André Brune und Michael Kriese auf der ICEM 2010 in Rom, Italien

**23.09.**

Vorträge von Prof. Ponick, Gerd Janssen und Cornelia Stübig auf der 8. ETG/GMM-Fachtagung "Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik" in Würzburg

**28./29.09.**

Vortrag von Prof. Mertens auf dem ECPE-Workshop "Advanced Multilevel Converter Systems" in Västerås, Schweden

**30.09.**

Letzter Arbeitstag von Vijay Ganesan, Niklas Rüger und Chinh Qui Nguyen

**Oktober 2010****06.-08.10.**

Beteiligung des IAL mit einem Gemeinschaftsstand mit anderen Unis auf der Internationalen Zuliefererbörse in Wolfsburg

**28.10.**

Prof. Mertens und Prof. Ponick halten das HDT-Seminar "Wechselwirkungen Motor – Frequenzumrichter".

**30.10.**

Beteiligung an der Nacht der Wissenschaft

**November 2010****08.-10.11.**

Vorträge von Jan-Peter Jastrzembski und Niklas Rüger auf der IECON 2010 in Phoenix, Arizona, USA

**15.11.**

Vortrag von Prof. Mertens zur Elektromobilität im Rahmen der Vortragsreihe "Energie und Innovation" der Stadt Hannover

**16.11.**

Konzeptwettbewerb des HorsePower-Teams um das VW-Sponsoring 2010/2011

**29.11.**

Vorträge von Prof. Ponick und Prof. Mertens auf dem 9. Internationalen CTI Symposium in Berlin

**Dezember 2010****01.12.**

Florian Boseniuk beginnt als Assistent am IAL.

**02./03.**

FEMAG-Anwendertreffen bei Fa. Wittenstein/Igersheim mit ca. 120 Teilnehmern zahlreicher Firmen, Vorträgen von Prof. Ponick, Dr. Steinbrink, Sebastian Tegeler und Peter Juris zu allgemeinen FEMAG-Themen

**03.12.**

Tag der Fakultät

**13.12.**

Weihnachtsfeier mit aktiven und einigen ehemaligen Mitarbeitern sowie den Studenten des Instituts

**Januar 2011****01.01.**

10jähriges Bestehen des IAL

**13.01.**

Exkursion zur Unternehmensgruppe Partzsch in Döbeln

**13.-16.01.**

Betriebsausflug zum verlängerten Skiwochenende in Marianska (Erzgebirge) (Erholungsheim der Tschechischen Akademie der Wissenschaften Prag)

**19.01.**

Dr. Averbeg organisiert eine Posterausstellung der Forschungsinitiative Energie 2050.

**23.01.**

60. Geburtstag von Udo Grendler

**26.01.**

Exkursion im Rahmen der Vorlesung Elektrische Antriebstechnik I zu Fa. Helmke

**31.01.**

Ausrichtung der Sitzung des ETG-Fachbereichs Q1 "Leistungselektronik und Systemintegration"

## Februar 2011

**01.02.**

Henrik Krupp und Dennis Kaczorowski beginnen als Assistenten am IAL.

Prof. Mertens hält das HDT-Seminar "Umrichter für Windenergieanlagen".

**19.02.**

Hochzeit von Sebastian Tegeler

**24.02.**

Ausrichtung der FVA-Projektausschusssitzung "Geregelte Antriebe" zu e-motive-Förderprojekten

**28.02.**

30. Geburtstag von Karsten Wiedmann

## März 2011

**01.03.**

Institutsbowlingabend

**02.03.**

30. Geburtstag von Michael Gröninger

**08.03.**

Exkursion zur Volkswagen AG, Werk Wolfsburg

**12.03.**

Hochzeit von Eike Garbe

**14.03.**

Eva Maria Brune erhält den Studienpreis 2010 des VDE Hannover für ihre technisch-wissenschaftliche Arbeit.

**21.-23.03.**

Vorträge von Prof. Ponick auf einem Symposium der Fa. WEG in Jaragua do Sul, Brasilien

**31.03.**

Letzter Arbeitstag von Dr. Averbeg und Eike Garbe

## April 2011

**01.04.**

Dr. Matthias Hofstetter von der Siemens AG, Nürnberg, übernimmt ab dem Sommersemester 2011 als externer Lehrbeauftragter die Vorlesung "Elektrische Bahnen und Fahrzeugantriebe".

Kacper Emmrich und René Dietz beginnen als Assistenten am IAL.

Wahl von Prof. Mertens zum Prodekan der Fakultät Elektrotechnik und Informatik

**13./14.04.**

Prof. Mertens leitet die ETG-Fachtagung "Bauelemente der Leistungselektronik" in Bad Nauheim mit ca. 160 Teilnehmern.

## Mai 2011

**01.05.**

Dr. Volker Schöber beginnt als Geschäftsführer der Forschungsinitiative Energie 2050.

**03./04.05.**

Prof. Ponick und Prof. Mertens leiten den ECPE-Workshop "eDrives: Motor – Converter Interactions". Vorträge halten Prof. Ponick, Prof. Mertens, Herr Kriese und Herr Köneke.

**04.05.**

30. Geburtstag von Sebastian Tegeler

**08.-10.05.**

Vortrag von Thies Köneke auf der PCIM in Nürnberg

**09.-11.05.**

Vortrag von Felix Fuchs auf der EPE Wind 2011 in Trondheim, Norwegen.

**11.05.**

Sebastian Tegeler wird Vater.

**13.05.**

André Brune erhält den Studienpreis 2010 der SEW-EURODRIVE-Stiftung für seine hervorragende Diplomarbeit.

**27.05.**

Institutskolloquium und 10jährige Jubiläumsfeier des IAL



## Juni 2011

**02.06.**

Mohamed Shams wird Vater.

**07.06.**

Posterbeitrag von Lennart Baruschka auf der CIREC 2011 in Frankfurt/Main

**17./18.06.**

Exkursion zur Fa. Continental AG in Korbach

**21.06.**

Rollout des Elektrorennwagens EH11 des hannoverschen Teams "HorsePower Hannover e.V."

**22.06.**

Teilnahme des IAL am Fußballturnier des Hochschulsportfests der LUH

**23.06.**

Teilnahme am Tech-Buffer 2011

**29.06.**

Vortrag von Lan Dang beim ECPE Workshop in Ismaning-München

## Juli 2011

**03-06.07.**

Vortrag von Jan-Peter Jastrzembski auf der LDIA 2011 in Eindhoven, Holland

**18.07.**

Doktorprüfung von Harald Kuhn

**25./26.07.**

Exkursion im Rahmen der Bahnenvorlesung zur Fa. Siemens nach Nürnberg und München

**30.07.**

Karsten Wiedmann wird Vater.

## August 2011

**01.08.**

Im Rahmen eines von der VolkswagenStiftung geförderten Forschungsvorhabens beginnen Dr. Bobojanov und F. Tuychiev von der Universität Taschkent/Usbekistan ihre zweimonatige Forschungstätigkeit als Gastwissenschaftler am IAL.

**02.08.**

Hochzeit von Jakub Emmrich

**25.08.**

Vortrag auf dem Deutsch-Koreanischen DFG-Workshop zur Leistungselektronik

**30.08.**

Vortrag von Lennart Baruschka und Posterbeitrag von Felix Fuchs auf der EPE ECCE Europe 2011 in Birmingham, UK

## September 2011

**01.09.**

Dennis Bresemann und Francesco Quattrone beginnen als Assistenten am IAL.

**03.09.**

Hochzeit von Thies Köneke

**08.09.**

Vortrag von Prof. Mertens auf der "E-Motive"-Tagung in Aachen

**13.09.**

Beteiligung des IAL an den Hochschulinformationstagen HIT

**15.09.**

Betriebsausflug mit Paddeltour auf der Örtze



**18.09. – 22.09.**

Vortrag und Posterbeitrag von Lennart Baruschka sowie Vortrag von Lan Dang auf der ECCE 2011 in Phoenix, Arizona, USA

**22.09.**

Lennart Baruschka erhält auf der ECCE 2011 in Phoenix, Arizona, USA, einen "Best Student Presentation Award".

**23.09.**

Doktorprüfung von Cornelia Stübig

**26.-30.09.**

Besuch von Prof. Mertens bei WEMPEC, Madison, USA, mit Vortrag

**27./28.09.**

Vortrag von Prof. Ponick auf dem 10. Technischen Tag der VEM-Gruppe in Wernigerode

**27.09. – 30.09.**

Vortrag von Dirk Braunisch sowie Posterbeitrag von Jörn Steinbrink auf der EDPC 2011 in Nürnberg

**30.09.**

Letzter Arbeitstag von Jan-Peter Jastrzembki

**Oktober 2011****01.10.**

Jaroslav Koupený beginnt am IAL als DAAD-Forschungs-Stipendiat im Bereich Leistungselektronik.

**13.10.**

Kacper Emmrich erhält für seine hervorragenden Studienleistungen den Förderpreis der Stiftung NiedersachsenMetall 2011.

**14.10.**

30. Geburtstag von Thies Köneke

Hochzeit von Michael Kriese

**24./25.10.**

Vortrag von Lan Dang auf dem 40. Kolloquium für "Halbleiter-Leistungs-Bauelemente und ihre Systemtechnische Integration" in Freiburg

**27./28.10.**

Prof. Mertens, Prof. Ponick und Prof. Stölting halten das HDT-Seminar "Grundlagen elektrischer Antriebe".

**November 2011****01.11.**

Peter Dück beginnt als Assistent am IAL.

**08./09.11.**

Vorträge von Prof. Mertens, Prof. Ponick, Eva Brune, Lennart Baruschka, Thies Köneke und Robert Meyer auf dem ETG-Kongress in Würzburg

Prof. Mertens leitet die ETG-Fachtagung "Leistungselektronik in Netzen".

**11.11.**

Beteiligung des IAL am Mädchen und Technik-Kongress 2011

**17./18.11.**

FEMAG-Anwendertreffen in Muldingen mit ca. 145 Teilnehmern zahlreicher Firmen, Vorträgen von Prof. Ponick, Dr. Steinbrink und Dirk Braunisch zu allgemeinen FEMAG-Themen

**24.11.**

Prof. Seinsch wird für besondere Verdienste bei der Bearbeitung aktueller Normungsprojekte mit dem IEC-Award ausgezeichnet.

**24./25.11.**

Prof. Mertens und Prof. Ponick halten das HDT-Seminar "Wechselwirkungen Motor - Frequenzumrichter".

**Dezember 2011****05.12.**

Vorträge von Prof. Ponick und Prof. Mertens auf dem 10. Internationalen CTI Symposium in Berlin

**15.12.**

Weihnachtsfeier mit aktiven und ehemaligen Mitarbeitern sowie den Studenten des Instituts

**22.12.**

Doktorprüfung von Rainer Helmer

**31.12.**

Letzter Arbeitstag von Thorsten Getschmann

## Veröffentlichungen 2010/2011

### Publications 2010/2011

#### Aufsätze in Fachzeitschriften 2010

##### Journal Articles 2010

**Ponick, B.**

*Energieeffizienz – Welche Technologien bringen wirklich etwas?*  
eta [energie], Volume 04, 2010, pp. 26-29

**Tegeler, S.; Quattrone, F.; Ponick, B.**

*Windgeneratoren effizient berechnen - Kopplung analytischer und numerischer Berechnungsverfahren für doppelt gespeiste Asynchrongeneratoren*  
Antriebstechnik, Volume 11, 2010, pp. 82-84

#### Konferenzbeiträge 2010

##### Conference Articles 2010

**Averberg, A.; Tran, H. N.; Nguyen, C. Q. ; Mertens A.**

*Two-Stage Interleaved Power Conditioner for Connecting a 5 kW el. SOFC with a 750 V DC Link*  
The 2010 International Power Electronics Conference - ECCE Asia (IPEC 2010), Sapporo, Japan, pp. 2621-2628

**Brune, A.; Dempewolf, K.-H.; Ponick, B.**

*Modelling and FE Parameter Identification of Permanent Magnet Synchronous Machines in Consideration of Spatial Harmonics*  
XIX International Conference on Electrical Machines ICEM 2010, Rom, Italien

**Helmer, H.; Dück, P.; Ponick, B.**

*Determination of Transient Reactances of Salient Pole Synchronous Machines with Analytical and Numerical Methods*  
Speedam 2010, Pisa, Italien, pp. 1587-1590

**Jastrzembki, J.-P.; Ponick, B.**

*Different Methods for Reducing Detent Force in a Permanent Magnet Linear Synchronous Motor*  
IECON 2010, Phoenix, USA, pp. 817-822

**Köneke, T.; Merkert, A.; Mertens, A.**

*System based optimization of the chip size and the thermal path for Si and SiC semiconductors*  
6th International Conference on Integrated Power Electronic Systems, Nürnberg, 2010, pp. 221-226

**Kriese, M.; Wittek, E.; Tischmacher, H.; Gattermann, S.; Poll, G.; Ponick, B.**

*Prediction of Motor Bearing Currents for Converter Operation*  
XIX International Conference on Electrical Machines ICEM 2010, Rom, Italien

**Rüger, N.; Schnick, O.; Mertens, A.; Mathis, W.**

*Novel PWM Modulation Strategy for 3-phase Inverters with Reduced Distortion at Low Switching Frequency*  
IECON 2010, Phoenix, USA, pp. 607-612

**Stübig, C.; Ponick, B.**

*Berechnung von Hybridschrittmotoren*  
8. ETG/GMM-Fachtagung Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik, Würzburg, 2010

**Tischmacher, H.; Gattermann, S.; Kriese, M.; Wittek, E.**

*Bearing Wear Caused by Converter-Induced Bearing Currents*  
IECON 2010, Phoenix, USA, pp. 778-785

**Wittek, E.; Kriese, M.; Tischmacher, H.; Gattermann, S.; Ponick, B.; Poll, G.**

*Capacitances and lubricant film thicknesses of motor bearings under different operating conditions*

XIX International Conference on Electrical Machines ICEM 2010, Rom

## Aufsätze in Fachzeitschriften 2011

### Journal Articles 2011

**Denkena, B.; Bickel, W.; Ponick, B.; Emmrich, J.**

*Dynamic analysis of a motor-integrated method for a higher milling stability*  
Production Engineering, Volume 5, Number 6, pp. 691-699, 2011

**Ganesan, V.; Wiedmann, K.; Janssen, G.; Ponick, B.; Mertens, A.**

*Development of Drive Systems Based on Electromagnetic Microactuators*  
IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011

**Ponick, B.**

*Miniaturisation of electrical machines*  
COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, Vol. 30 Iss: 4, pp.1139 – 1147, 2011

## Konferenzbeiträge 2011

### Conference Articles 2011

**Al Nahlaoui, M.; Braunisch, D.; Eichinger, B.; Kulig, S.; Ponick, B.; Werner, U.**

*Calculation Methods for Electromagnetically Exited Noise in Induction Motors*  
EDPC 2011, Nürnberg, 2011

**Baruschka, L.: Mertens, A.**

*A New 3-Phase Direct Modular Multilevel Converter, EPE European Conference on Power Electronics and Applications*  
14th European Conference on Power Electronics and Applications 2011, EPE 2011, September 2011, Birmingham, United Kingdom

**Baruschka, L.; Mertens, A.**

*Comparison of Cascaded H-Bridge Converters and Modular Multilevel Converters for the use in Medium Voltage Grid Connected Battery Energy Storage Systems*

The 21st International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2011), Frankfurt/Main, 2011

**Baruschka, L.; Mertens, A.**

*Untersuchung Modularer Multilevel-Topologien zur Netzanbindung von Batteriespeichern*  
ETG-Kongress 2011, Würzburg, 2011

**Baruschka, L.; Mertens, A.**

*A New 3-Phase AC/AC Modular Multilevel Converter with Six Branches in Hexagonal Configuration*

IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE 2011), Phoenix, USA

**Baruschka, L.; Mertens, A.**

*Comparison of Cascaded H-Bridge and Modular Multilevel Converters for BESS Application*  
IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE 2011), Phoenix, USA

**Brune, E.; Stübig, C.; Tegeler, S.; Wehner, M.; Ponick, B.**

*Kopplung numerischer und analytischer Verfahren zur Berechnung von permanentenerregten Synchronmaschinen mit Anlaufkäfig*  
ETG-Kongress Würzburg, 2011

**Dang, L.; Kuhn, H.; Mertens, A.:**

*Digital adaptive driving strategies for high-voltage IGBTs*

IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE 2011), Phoenix, USA

**Fuchs, F.; Mertens, A.**

*Steady State Lifetime Estimation of the Power Semiconductors in the Rotor Side Converter of a 2 MW DFIG Wind Turbine via Power Cycling Capability Analysis*

14th European Conference on Power Electronics and Applications 2011, EPE 2011, September 2011, Birmingham, United Kingdom

**Gröniger, M.; Horch, F.; Kock, A.; Pleiteit, H.; Ponick, B.; Schmidt, D.; Wöstmann, F.-J.**

*Casting Production of Coils for Electrical Machines*

EDPC 2011, Nürnberg, 2011

**Janssen, G.; Wiedmann, K.; Mertens, A.; Ponick, B.**

*Entwicklung von Antriebssystemen basierend auf elektromagnetischen Mikromotoren*  
Kolloquium Mikroproduktion und Abschlusskolloquium SFB 499, Karlsruhe, 2011

**Jastrzembki, J.-P.; Ponick, B.**

*Design of a Conveyor Directly Driven by a Hybrid Linear Motor following FEM and Reluctance Network Approach*

LDIA 2011, Eindhoven, Holland

**Köneke, T.; Mertens, A.; Domes, D.; Kanschhat, P.**

*Highly Efficient 12kVA Inverter with Natural Convection Cooling Using SiC Switches*  
PCIM Europe 2011, Nürnberg, pp. 457-463

**Köneke, T.; Mertens, A.**

*Umsetzungskonzepte nachhaltiger Energiesysteme - Erzeugung, Netze, Verbrauch*  
ETG-Kongress 2011, Würzburg, 2011

**Meyer, R.; Mertens, A.**

*Auslegung eines LCL Filters für Umrichter mit niedriger Schaltfrequenz in dezentralen Erzeugungsanlagen*  
ETG-Kongress 2011, Würzburg, 2011

**Radosavac, M.; Froböse, T.; Overmeyer, L.; Jastrzembki, J.-P.; Ponick, B.**

*Lineardirektantrieb für Transportbänder*  
WGTL Kolloquium 2011, Hannover

**Steinbrink, J.**

*Applicable Finite Meshes*  
EDPC 2011, Nürnberg, pp. 225-227

## Sonstige Publikationen 2011

### Other Publications 2011

**Ganesan, V.; Wiedmann, K.; Berardinelli, A.; Demmig, S.; Stölting, H.-D.; Mertens, A.**

*Drive Systems Based on Electromagnetic Microactuators*

in: *Design and Manufacturing of Active Microsystems*

Springer Verlag Heidelberg Dordrecht London New York, ISBN978-3-642-12902-5, Part 1, pp. 29-47

**Janssen, G.; Gehrking, R.; Edler, J.; Ponick, B.; Stölting, H. D.**

*Electromagnetic Design of Microactuators*, in: *Design and Manufacturing of Active Microsystems*

Springer Verlag Heidelberg Dordrecht London New York, ISBN978-3-642-12902-5, Part 1, pp. 11-28

**Janssen, G.; Ponick, B.**

*Kleine Motoren, große Möglichkeiten*  
Unimagazin 01/02, H12467, Zeitschrift der Leibniz Universität Hannover, pp. 32-34

**Stölting, H.J.; Kallenbach, E.; Amrhein, W.**

*Handbuch Elektrische Kleinantriebe*  
Carl Hanser Verlag München, 4. neu bearbeitete Auflage, 2011

## Veranstaltungen 2010/2011

### Events 2010/2011

#### 2010

**08.02.**

ETG-Workshop "Stromrichtergespeiste Elektromaschinen"

**19.05.**

Kolloquium "Netzanbindung regenerativer Energien"

**29.06.**

E-Mobility-Day@IAL mit einer Vortragsreihe zum Thema E-Mobilität

**02./03.12.**

FEMAG-Anwendertreffen 2010 mit folgenden Vorträgen:

**Jurczys, P.**

Berechnung von Kennfeldern zur Optimierung von Fahrzeugantrieben

**Ponick, B.**

Berechnung und Analyse von Magnetgeräuschen in elektrischen Maschinen

**Steinbrink, J.**

Ld-Lq Identifikation, verschiedene Verfahren im Vergleich

**Tegeler, S.**

Kopplung analytischer und numerischer Berechnungswerkzeuge am Beispiel der Berechnung von Asynchronmaschinen

#### 2011

**27.05.**

Institutskolloquium mit folgenden Vorträgen:

**Baruschka, L.**

Modulare Multilevel-Wechselrichter zur Energiespeicheranbindung ans Mittelspannungsnetz

**Braunisch, D.**

Geräuschberechnung unter Nutzung von Modellwertmatrizen

**Dang, L.**

Digitale adaptive Ansteuerungsverfahren für HV-IGBTs

**Jurczys, P.**

Vergleich hochdrehender und radnaher Fahrmotoren

**Kriese, M.**

Vorausberechnung von Lagerströmen

**17./18.11.**

FEMAG-Anwendertreffen 2011 mit folgenden Vorträgen:

**Braunisch, D.**

Kombinierte analytische und numerische Geräuschberechnung mittels Modalanalyse

**Brune, A.; Steinbrink, J.**

Vorstellung und Schulung in der Bedienung von FEMAG-angebundenen Programmen

**Ponick, B.**

Simulation transienter Vorgänge auf Basis numerisch identifizierter Ersatzparameter

**Steinbrink, J.**

Analyse von Verlustmodellen und Eigenschaften weichmagnetischer Werkstoffe und deren Einfluss auf die Betriebseigenschaften von PM-Maschinen

## Auszeichnungen 2010/2011

### Awards 2010/2011

#### 2010

##### 11.03.

Alexander Kock erhält den vom BMBF in Nürnberg verliehenen DRIVE-E-Studienpreis für Innovationen im Bereich der Elektromobilität.

##### 08.06.

Eva Maria Brune erhält den Zonta-Preis für Nachwuchswissenschaftlerinnen, verliehen durch den Zonta-Club Hannover.

#### 2011

##### 14.03.

Eva Maria Brune erhält den Studienpreis 2010 des VDE Hannover für ihre technisch-wissenschaftliche Arbeit.

##### 13.05.

André Brune erhält den Studienpreis 2010 der SEW-EURODRIVE-Stiftung für seine hervorragende Diplomarbeit.

##### 22.09.

Lennart Baruschka erhält auf der ECCE 2011 in Phoenix, Arizona, USA, den Best Student Presentation Award.

##### 13.10.

Kacper Emmrich erhält für seine bisherigen hervorragenden Leistungen den Förderpreis der Stiftung NiedersachsenMetall 2011.

##### 24.11.

Prof. Seinsch wird für besondere Verdienste bei der Bearbeitung aktueller Normungsprojekte mit dem IEC-Award ausgezeichnet.



## Dissertationen 2010/2011

### Dissertations 2010/2011



Digitale Ansteuerung von Hochleistungs-IGBTs  
Digital Control of High-power IGBTs

## **Adaptive Ansteuerverfahren für Hochleistungs-IGBTs mit einer digitalen Treibereinheit**

**von Dipl.-Ing. Harald Kuhn**

Treibereinheiten stellen in der Leistungselektronik die Schnittstelle zwischen der Regelung und dem Leistungsteil dar. Die Ein- und Ausschaltbefehle der Halbleiter werden durch ein Regelungskonzept und ein geeignetes Modulationsverfahren bestimmt. Auf der Treibereinheit wird der Schaltbefehl in eine Steuerspannung für die Halbleiterbauelemente, z. B. Insulated Gate Bipolar Transistors (IGBT), umgewandelt. Nimmt die Steuerspannung z. B. -15 V an, so ist das Bauelement ausgeschaltet, bei +15 V befindet sich der IGBT im leitenden Zustand. In Hochleistungsanwendungen für Traktionsantriebe oder Antriebsumrichtern werden Schaltfrequenzen bis zu 1 kHz erreicht. Über die Kontrolle des transienten Verlaufes der Steuerspannung – im Falle des IGBTs ist das die Gate-Emitter-Spannung – kann das Ein- und Ausschaltverhalten des Halbleiterelementes beeinflusst werden. Die Verluste in den Halbleitern, die Schaltgradienten von Strom und Spannung und damit verbundene Schaltcharakteristika sind somit kontrollierbar.

In der Dissertation wurde eine neuartige, flexible Treibereinheit entwickelt, die das Schaltverhalten von IGBTs über einen weiten Arbeitsbereich optimiert. Möglichst wenig Vorwissen über das Schaltverhalten des Bauteils soll in die Auslegung dieser digitalen Treibereinheit einfließen, damit sie für eine Vielzahl von Bauteilen verschiedener Hersteller und unterschiedlicher IGBT-Typen eingesetzt werden kann.

Als neuer Ansatz wird in dieser Arbeit eine "Digitale Gate Unit" (DGU) vorgestellt. Durch Signalanpassung und schnelle Analog-Digital-Wandler werden die relevanten Signale des IGBTs, die Gate-Emitter-Spannung, die Kollektor-Emitter-Spannung und der Kollektorstrom einem digitalen Bauteil, einem FPGA/Mikrocontroller, zugeführt. Über eine programmierte Zustandsmaschine erkennt die DGU, in welchem Schaltzustand sich der IGBT aktuell befindet. Der detektierte Zustand löst nun die Ausführung von verschiedensten FPGA-Funktionen (Gradientenbildung, Zeitmessung, Temperaturmessung usw.) aus, die benötigt werden, um die zu optimierenden Parameter und Regelgrößen zu berechnen. Das neue optimierte Stellgrößenprofil, d. h. der

## **Adaptive Driving Scheme for High-power IGBTs Using a Digital Gate Unit**

**by Dipl.-Ing. Harald Kuhn**

In power electronic applications, gate units represent the interface between the control and the power stage. The turn-on and turn-off commands are determined by a control method and an adequate modulation strategy. The gate unit translates this information into the corresponding control voltage for the semiconductor, e.g. Insulated Gate Bipolar Transistors (IGBT). In the case of -15 V, the device is in the off-state, whereas at +15 V, the device is in the conducting mode. In high power applications used for traction or industrial drives, the switching frequency can go up to 1 kHz. By influencing the transient of the control voltage – the gate-emitter voltage when using an IGBT – the switching behaviour of the semiconductor can be influenced. Losses, switching gradients of voltage and current and correlated switching characteristics can be controlled.

In this doctoral thesis, a new digital gate drive is developed, that allows to control the switching behaviour in a wide operation range. Preferably a minimum of information on the switching behaviour should be used in the design of this gate unit in order to be flexible in the use of devices of different suppliers and different types of IGBTs.

As a new approach, a "digital gate unit" is presented. By signal conditioning and using fast analog-digital converters, the important information concerning the switching transients are collected. The gate-emitter voltage, the collector-emitter voltage and the collector current are fed into a digital device, an FPGA/microcontroller combination.

In the following process, these data are used to detect the actual switching state with a programmable state machine. Depending on the state, several functionalities in the FPGA are triggered (counters, derivations, temperature measurements) that are used to optimise the switching curves in an adaptive manner. An optimised profile, i. e. the gate current, is calculated to impress the designated behaviour.

The figure shows the control of the maximum

current (load current including the reverse recovery current) when turning on the IGBT. Beginning at the starting point (gate current 3.84 A, deviation to the control value +129 A) in the operation point (1000 V, 500 A, 30 °C), the control reduces step by step the gate current to 1.5 A, until the error is 0 A (solid line). The black dotted trajectory shows the behaviour of the control after applying a step in the reference value. The control identifies an error instantly and raises the gate current to 2.27 A, until the error is at 0 A again. Changing the operation point, raising the load current from 500 A to 700 A, again, an error of -240 A is calculated. The grey dotted path shows how the gate current is reduced to less than 0.71 A, while reducing the deviation to 0 A.

With the proven method of the adaptive control, it is possible to control the switching behaviour of the IGBTs without having deep a-priori knowledge. Losses and the gradients of current and voltage consequently are under control. For a given operation point, the losses could be reduced by approx. 30% compared to a reference driver.

Gatestrom, wird mit dem Mikrocontroller durch einen adaptiven Algorithmus berechnet.

Die Abbildung zeigt die Regelung des maximalen Stromes (Laststrom mit Rückstromspitze) beim Einschalten des IGBTs. Ausgehend vom Startpunkt (Gatestrom ca. 3,84 A, Differenz zum Sollstrom ca. +129 A) im Betriebspunkt (1000 V, 500 A, 30 °C) wird durch die Regelung sukzessive der Gatestrom auf ca. 1,5 A reduziert, bis der Fehler 0 A beträgt (durchgezogene Linie). Die schwarz gestrichelte Trajektorie zeigt dann das Verhalten der Regelung bei einem Sollwertsprung, der Fehler wird sofort detektiert und die Stellgröße auf 2,27 A erhöht, bis der Fehler wieder auf 0 A ausgeregelt wurde. Durch einen Betriebspunktwechsel, einen Laststromwechsel von 500 A auf 700 A, entsteht erneut ein Fehler von -240 A. Die grau gestrichelte Trajektorie zeigt, wie der Gatestrom auf kleiner 0,71 A und der Fehler auf 0 A reduziert wird.

Mit dem gezeigten Verfahren zur adaptiven Regelung ist es möglich, ohne A-priori-Wissen das Schaltverhaltens von IGBTs und somit die Verluste und Gradienten von Strom und Spannung zu kontrollieren. Für einen ausgewählten Betriebspunkt konnten die Verluste gegenüber einem Referenztreiber um ca. 30 % reduziert werden.

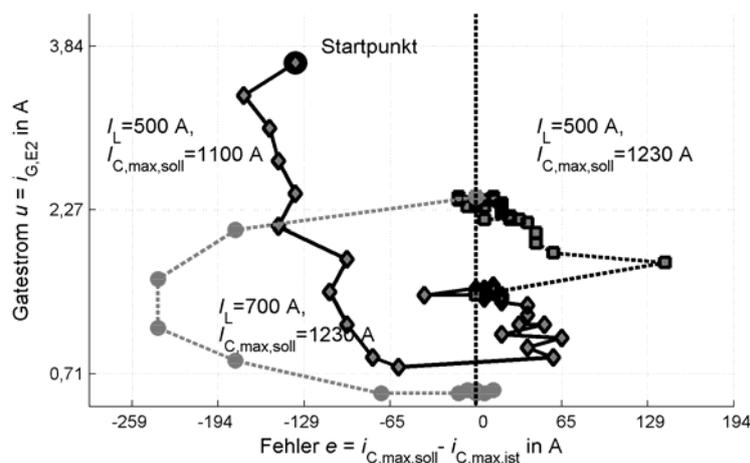


Fig.: Control of the maximum current in the turn-on transient of the IGBT. Step in the reference value from 1100 A to 1230 at iteration 40; change of the operation point by changing the load current from 500 A to 700 A at iteration 78. Measurement done at 30 °C, 1000 V.

Abb.: Regelung des maximalen Stromes beim Einschalten des IGBTs. Sollwertsprung von 1100 A auf 1230 bei Iterationsschritt 40; Laststromsprung von 500 A auf 700 A bei Iterationsschritt 78. Messung bei 30 °C, 1000 V.

## Kopplung numerischer und analytischer Verfahren zur Berechnung des Betriebsverhaltens von Synchronmaschinen

von Dipl.-Ing. Rainer Helmer

In dieser Arbeit werden analytische Ansätze zur Berechnung des Betriebsverhaltens permanentmagnet- und elektrisch erregter Synchronmaschinen hergeleitet. Die analytische Berechnung bietet den Vorteil sehr kurzer Berechnungszeiten und wird mittels numerischer Vergleichsrechnungen und Messungen auf Plausibilität geprüft.

Bei der analytischen Magnetkreisrechnung von Schenkelpol-Synchronmaschinen ist die Anwendung sättigungsabhängiger Polformkoeffizienten seit vielen Jahren ein Standardverfahren. Mit Hilfe der Polformkoeffizienten kann das Hauptwellenbetriebsverhalten dieses Maschinentyps in guter Näherung berechnet werden. Bei stark gesättigten Schenkelpol-Synchronmaschinen oder zusätzlichen Luftspalten im Rotorjoch, die z. B. bei einer Schwalbenschwanzauflagerung der einzelnen Pole entstehen, kann es hingegen zu Abweichungen zwischen numerischer und analytischer Berechnung sowie Messungen kommen. Daher wird im Rahmen dieser Arbeit zunächst ein bestehendes analytisches Programm für Schenkelpol-Synchronmaschinen mittels numerischer Vergleichsrechnung überprüft. Daran anschließend werden für alle gängigen permanentmagneterregten Synchronmaschinen sättigungsabhängige Polformkoeffizienten mittels numerischer Feldberechnung ermittelt, mit deren Hilfe eine sehr schnelle, analytische Vorausberechnung des Betriebsverhaltens der Maschinen durchgeführt werden kann. Die Polformkoeffizienten können mit geringem Zeitaufwand ermittelt werden.

Permanentmagneterregte Maschinen werden im Stator sowohl mit verteilten als auch mit Zahnspulenwicklungen mit prinzipbedingt höherem Oberwellengehalt ausgestattet. Die Möglichkeiten und Grenzen der Modellierung permanentmagneterregter Maschinen, insbesondere mit Zahnspulenwicklungen, durch ein reines Hauptwellenmodell werden dargestellt und anhand zahlreicher untersuchter Maschinen ausführlich analysiert.

Ein weiterer Anwendungsfall, wo die rein analyti-

## Coupling of Numerical and Analytical Methods for Calculating the Operating Behaviour of Synchronous Machines

by Dipl.-Ing. Rainer Helmer

In this thesis, analytical methods to calculate the operating behaviour of permanent magnet excited and electrically excited synchronous machines are derived. The analytical calculation is advantageous due to very short simulation times and is checked by numerous comparisons between calculations and measurements.

For the analytical magnetic circuit calculation of salient-pole synchronous machines, the use of saturation-dependent pole form coefficients has been a standard method for many years. Based on the pole form coefficients, the fundamental operating behaviour of this machine type can be calculated in good approximation. In case of highly saturated salient-pole synchronous machines or additional air gaps in the rotor yoke, e.g. due to a dove tail suspension of the poles, deviations between numerical and analytical calculation as well as measurements might occur. Therefore, first an existing analytical program for salient-pole synchronous machines is reviewed. Afterwards, saturation-dependent pole form coefficients for all common permanent magnet synchronous machines are determined using finite element analysis. Based on the pole form coefficients, a very fast analytical calculation of the operating behaviour of the machines is then possible. For different permanent magnet machine types, the pole form coefficients can be determined automatically with a minimum of time.

Permanent magnet synchronous machines can be equipped either with a distributed or a concentrated winding in the stator. A concentrated winding generates, inherent to its design, a higher amount of spatial harmonics. The feasibility and limitations when modeling a machine with a concentrated winding by a fundamental wave model are analysed and illustrated by numerous investigated machines of that type.

A further focus of this thesis is the analytical calculation of the transient reactances of salient-pole synchronous machines. The compli-

cated field conditions at a three-phase sudden short circuit can hardly be calculated just analytically. As some parts of the machines are highly saturated, the analytical methods proposed in literature often lead to unacceptable deviations between measurement and calculation. Therefore, a well-known method to evaluate the saturated transient reactances has been adapted to the special design of salient-pole synchronous machines. In spite of using numerical field simulation, the method is very fast and precise. In this thesis saturation-dependent coefficients are introduced which allow to predict the transient reactances of salient-pole synchronous machines analytically. Many different types of salient-pole synchronous machines have been investigated by comparisons between calculations with the proposed method and measurements. Due to the proposed saturation-dependent coefficients, the analytical calculation can be significantly improved.

For the determination of all saturation-dependent coefficients, finite element analysis is used. Not only the longer simulation time, but also the time-consuming generation of finite element models including mesh generation, winding definition, magnetising curves, boundary conditions for the magnetic vector potential etc. often exclude this calculation method in industrial practice. This is why for all presented types of synchronous machines, routines for an automated finite element model generation have been developed.

sche Berechnung an ihre Grenzen stößt, sind die gesättigten Übergangsreaktanzen von Schenkelpol-Synchronmaschinen. Die komplizierten Feldverhältnisse beim dreipoligen Stoßkurzschluss sind analytisch kaum fassbar. Die in der Literatur vorgeschlagenen Berechnungsmethoden führen aufgrund stark veränderlicher Induktivitätswerte bei gesättigten Maschinen häufig zu nicht mehr akzeptablen Abweichungen zwischen Messung und Rechnung. Daher wird ein bekanntes numerisches Verfahren für die speziellen Ausführungen von Schenkelpol-Synchronmaschinen erweitert, welches die gesättigten Übergangsreaktanzen trotz numerischer Feldberechnung sehr schnell und genau berechnen kann. Die mit diesem Verfahren an zahlreichen Synchronmaschinen durchgeführten numerischen Vergleichsrechnungen und der Vergleich mit Messergebnissen dienen anschließend zur Ermittlung sättigungsabhängiger Koeffizienten für die analytische Berechnung der transienten Reaktanzen von Schenkelpol-Synchronmaschinen.

Für die Ermittlung aller genannten sättigungsabhängigen Koeffizienten wird die Finite-Elemente-Rechnung benutzt. Nicht nur die in der Regel längere numerische Berechnungsdauer, sondern vor allem der mühsame und zeitaufwendige Aufbau von Finite-Elemente-Modellen inkl. Vernetzung, Wicklungsdefinition etc. führen in der industriellen Praxis häufig zum Ausschluss dieser Berechnungsmethode. Daher werden für alle vorgestellten Synchronmaschinentypen Routinen zum automatisierten FEM-Modellaufbau entwickelt.

## Effiziente Berechnungsverfahren für Hybridschrittmotoren

von Dipl.-Ing. Cornelia Stübig

Analytische Berechnungen von Hybridschrittmotoren gestalten sich aufgrund der komplizierten Geometrie und der dreidimensionalen Anordnung des elektromagnetischen Feldes innerhalb des Motors als schwierig. Die Auslegung dieser Motoren erfolgt daher bisher aufgrund von Überschlagungsrechnungen und Erfahrungswerten.

Im Mittelpunkt der vorliegenden Arbeit steht ein analytisches Verfahren zur Berechnung von Hybridschrittmotoren. Dieses basiert auf der Berechnung des magnetischen Kreises der Motoren. Abhängig von Geometrie- und Wicklungsdaten sowie der Rotorposition werden magnetische Flüsse und Widerstände innerhalb des Motors berechnet. Aus diesen Werten werden Drehmomente, induzierte Spannungen und Flussverkettenungen bestimmt.

Das verwendete Verfahren koppelt analytische und numerische Berechnungsverfahren, indem das Verhalten der Luftspaltregion mit Hilfe einer zweidimensionalen numerischen Simulation bestimmt wird. Zur Verifikation des analytischen Verfahrens dienen Messungen an Hybridschrittmotoren.

Als ein weiteres Verfahren zur Verifikation des Modells wird ein Hybridschrittmotor mittels einer dreidimensionalen Finite-Elemente-Simulation untersucht. Die Ergebnisse beider Berechnungsverfahren werden gegenübergestellt. Beide Verfahren liefern sehr ähnliche Ergebnisse, die bei den untersuchten Motoren innerhalb der erlaubten Genauigkeit gut mit Messungen übereinstimmen. Das analytische Verfahren bietet jedoch gegenüber dem numerischen einen großen Zeitvorteil.

## Efficient Strategies to Calculate Hybrid Stepping Motors

by Dipl.-Ing. Cornelia Stübig

Analytical modelling of hybrid stepping motors proves to be difficult due to the motor's complex geometry and the three-dimensional distribution of the electromagnetic field. In the past, motor development therefore relied on rough calculations and was based on the developers' experience.

This thesis deals with an analytical method for the calculation of the behaviour of hybrid stepping motors. This method is based on the calculation of the motor's magnetic circuit. Input parameters of the calculation are geometry and winding data. Magnetic flux and permeances inside the motor are calculated dependent on the rotor position. These values are used to calculate torque, induced voltage and flux linkage.

The analytical model provides a coupled approach as so far, as air gap region permeances are calculated based on a two-dimensional finite element simulation. Measurements on existing motors prove the model's validity.

Three-dimensional finite element simulation provides another approach to calculating the behaviour of hybrid stepping motors and therefore verifying the analytical model. The models' results are similar, however the analytical approach has the advantage of a much shorter calculation time.



## Anschrift:

---

Institut für Antriebssysteme und Leistungselektronik  
Leibniz Universität Hannover

## Postanschrift:

---

Postfach 6009  
30060 Hannover

## Paketanschrift:

---

Welfengarten 1  
30167 Hannover



## Kontakt:

---

Telefon: 0511 / 762 - 2514  
Fax: 0511 / 762 - 3040  
E-Mail: [info@uni-hannover.de](mailto:info@uni-hannover.de)  
Homepage: [www.ial.uni-hannover.de](http://www.ial.uni-hannover.de)

