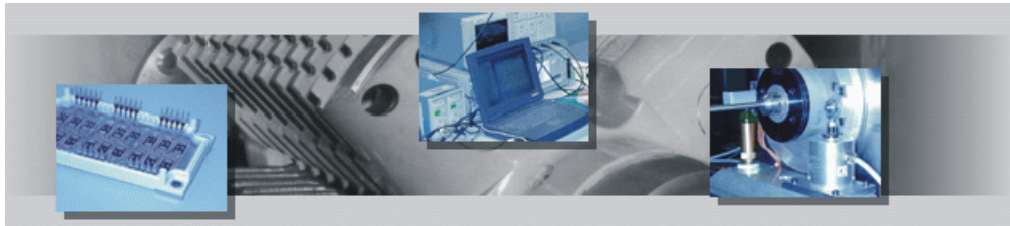


Jahresbericht



Annual Report

2004 / 2005



Institut für
Antriebssysteme
und Leistungselektronik

2004 / 2005

Prof. Dr.-Ing. A. Mertens

Leistungselektronik
Antriebsregelung

Prof. Dr.-Ing. B. Ponick

Elektrische Maschinen
Antriebssysteme

Anschrift

Institut für Antriebssysteme und
Leistungselektronik
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)
Universität Hannover

Redaktion: Dipl.-Fachübers. P. Duensing

Inhaltsverzeichnis ♦ Table of Contents

Vorwort ♦ Preface	4
Forschung am IAL: Projektberichte ♦ Research at IAL: Project Reports	9
Entwurf und Analyse von Wicklungen elektrischer Maschinen	10
Design and Analysis of Windings of Electrical Machines	
Ermittlung der Frequenzabhängigkeit der Impedanz von Synchronmaschinen	15
Determination of the Frequency Dependence of the Impedance of Synchronous Machines	
Berechnung magnetischer Kreise eines Linearmotors anhand der Netzwerkanalyse	18
Calculation of Magnetic Circuits in a Linear Motor by means of Network Analysis	
Spezielle Designregeln für Mikro-Linearmotoren	20
Special Design Rules for Linear Micro Actuators	
Geberlose Lageregelung bei Mikromotoren	23
Sensorless Position Control of Micro Actuators	
Automatisierte Entwicklungsumgebung für Mikrolinearmotoren	24
Automated Design Environment for Linear Micro Actuators	
Untersuchung und Verbesserung von Pulsmodulationsverfahren bei Puls-Wechselrichtern	26
Examination and Improvement of Pulse Modulation Techniques for Three-phase Inverters	
Einsatz von Filtern bei Multi-Level-Umrichtern	27
Use of Filters with Multi-Level Converters	
Energieeinspeisung von Brennstoffzellen in ein Microgrid-Modell	28
Electrical Energy Fed by Fuel Cells into a Microgrid Model	
Prüfstand zur Charakterisierung von Leistungsbauerelementen	30
Test Bench for Characterising Power Electronic Components	
Multilevel-Umrichter	32
Multilevel Converters	
Lehrveranstaltungen am IAL ♦ Lectures at IAL	34
Veranstaltungstabelle	35
Schedule of Lectures	
Grundlagen der elektromagnetischen Energiewandlung	36
Basics of Electromagnetical Power Conversion	
Berechnung elektrischer Maschinen	37
Theory of Electrical Machines	
Elektrische Klein- und Servoantriebe	38
Small Electrical Motors and Servo Drives	
Elektronisch betriebene Kleinmaschinen	38
Small Electronically Controlled Motors	

Elektrische Antriebssysteme	39
Electrical Drive Systems	
Elektrische Antriebstechnik I	40
Electric Drives I	
Elektrische Antriebstechnik II	41
Electric Drives II	
Leistungselektronik I	42
Power Electronics I	
Leistungselektronik II	42
Power Electronics II	
Regelung elektrischer Drehfeldmaschinen.....	43
Control of Electrical Three-phase Machines	
Dynamische Regelantriebe	44
Dynamic Servo Drives	
Elektrische Bahnen.....	45
Electrical Traction	
Kolloquium „Elektrische Antriebssysteme“ und „Berechnung elektrischer Maschinen“	45
Colloquium on „Electrical Drive Systems“ and „Theory of Electrical Machines“	
Labor „Leistungselektronik“	46
Laboratory Exercise on „Power Electronics“	
Labor „Elektrische Maschinen“	46
Laboratory Exercise on „Electrical Machines“	
Labor „Elektrische Antriebssysteme“	47
Laboratory Exercise on „Electrical Drive Systems“	
Studien-, Diplom- und Masterarbeiten 2004/2005	49
Students' Theses 2004/2005	
Das Institut ♦ The Institute	51
Mitarbeiter des IAL	52
Staff of IAL	
Chronik 2004/2005	54
Chronicle 2004/2005	
Veröffentlichungen 2004/2005	60
Publications 2004/2005	
Dissertationen 2004/2005 ♦ Dissertations 2004/2005	61
Beitrag zur Lastabhängigkeit des Luftspaltfeldes der Polpaarzahl 3p bei Käfigläufern	62
Novelties Concerning the Air-gap Field of 3p Pole Pairs in Cage Induction Machines	
Betriebsverhalten von Induktionsmaschinen mit fehlenden Spulen in der Ständerwicklung	63
Performance of Induction Machines Having Dummy Coils in the Stator Winding	
Kraftwirkungen in permanentmagneterregten Maschinen	64
Electromagnetic Forces Acting in Motors with Permanent Magnets	



Vorwort

Liebe Leser,

erstmals halten Sie einen Jahresbericht des IAL in Händen. Wir möchten uns mit diesem Bericht nach außen präsentieren, aktuellen und zukünftigen Partnern des Instituts einen Eindruck unserer Leistungsfähigkeit geben, sowie Kontakt zu Ehemaligen und Freunden des IAL halten.

Die Jahre 2004 und 2005, über die sich unser Bericht erstreckt, waren von Umbruch und Neuanfang geprägt. Die mit der Neugründung des IAL durch Zusammenlegung der Institute für Elektrische Maschinen und Antriebe und für Leistungselektronik im Jahr 2001 begonnene Umstrukturierung fand ihren Höhepunkt in den beiden Neuberufungen: Prof. Ponick als Nachfolger von Prof. Seinsch und Prof. Stölting vom 01.03.2003, Prof. Mertens als Nachfolger von Prof. Nestler zum 01.05.2004. Zusammen mit einigen Veränderungen im Stab der Mitarbeiter kann man berechtigt von einem Generationswechsel sprechen.

Der personelle und organisatorische Neuanfang ging einher mit erheblichen Investitionen in die Infrastruktur, so dass die Räumlichkeiten - sowohl die Labore als auch der Bürobereich - nun modern und großzügig ausgestattet sind. Nicht zuletzt aufgrund der guten Zusammenarbeit der beiden neuen Lehrstuhlinhaber, die auch von unseren Partnern als Stärke des IAL wahrgenommen wird, konnten zudem erhebliche Drittmittel eingeworben werden. Dadurch ist ein Personalaufbau möglich geworden, so dass sich heute die beiden Fachgebiete in etwa gleicher Stärke mit insgesamt 12 wissenschaftlichen Mitarbeitern präsentieren.

Die Fachgebiete haben sich zur Verdeutlichung der Arbeitsteilung neue Namen gegeben: Elektrische Maschinen und Antriebssysteme einerseits, Leistungselektronik und Antriebsregelung andererseits. Die Antriebsregelung schlägt sich nicht nur in mehreren Drittmittelprojekten, sondern auch in einer neuen Vorlesung nieder. Das Lehrangebot wurde auch an anderen Stellen modernisiert und attraktiver gestaltet. Die stark angestiegene Zahl von Studenten, die die Vorlesungen des IAL hören, Studien-, Diplom- oder Masterarbeiten anfertigen oder uns als studentische Hilfskraft unterstützen, führen wir allerdings zuerst auf ein generell gestiegenes Interesse an der Energie- und Automatisierungstechnik zu-

Preface

Dear readers,

for the first time, you are holding an annual report of IAL in your hands. Our goal is to present us to current and future partners, giving a vivid impression of our capacities, as well as to hold contact to former members and friends of our institute.

Our report covers the years 2004 and 2005 which were characterised by radical changes and a fresh start. The reorganization process which started in 2001 with the new foundation of the Institute for Drive Systems and Power Electronics (IAL) by joining the Institute for Electrical Machines and the Institute for Power Electronics, reached its climax in the call of Prof. Ponick as successor of Prof. Seinsch and Prof. Stölting in March 2003, and of Prof. Mertens as successor of Prof. Nestler in May 2004. Together with several changes in the IAL staff, one can talk with good reason of a generational change.

The new start concerning personnel and reorganization also went along with considerable investments into our infrastructure. Meanwhile, the laboratories as well as the office premises are generously equipped and up to date. Last but not least it is thanks to the good cooperation of the two new chair holders - which is also judged by our partners as the strong point of IAL - that considerable third-party funds could be raised. On this background, our personnel could be increased, so that the two chairs are now presented in nearly equal shares by 12 research associates.

The division of work among the two chairs is made clear by the new names „Electrical Machines and Drive Systems“ on the one hand and „Power Electronics and Drive Control“ on the other hand. The Drive Control section is not only reflected in several third-party projects, but also in a new lecture. Other lectures were modernised and made more attractive, too. The increasing number of students visiting our lectures, preparing diploma, master or short theses or working as student assistants at IAL is probably due to a generally increased interest in power and automation engineering. This tendency is also supported by the introduction of Mechatronics, a new course of study, which was highly contributed by the

commitment of Prof. Ponick. It starts with the first term, and in its second year already, more than 50 freshmen have enrolled in this course.

IAL also took measures to improve its network of cooperations. Within the university, we are now a member of the Mechatronics Centre Hannover and of the Laboratory of Nano and Quantum Engineering. Due to our initiative, the Power Engineering Centre Hannover is just about to be developed. At national level, several meetings with neighbouring institutes for power electronics took place. At international level, we made new contacts, among others with Italy and the U.S.A., and refreshed our existing contacts to Czechia. In addition, contributions on conferences like the Actuator 2004 in Bremen and the EPE 2005 in Dresden helped to present IAL on international ground.

In the field of education, it is planned, besides a continuous improvement of all existing lectures, to introduce a new lecture concerning power electronic devices during the next year. With respect to our research activities, we aim at further co-operations with industrial partners, but also with other institutes in Hannover, Germany and abroad. In this way, we are quite confident that IAL will continue its positive development in the year to come.

Hannover, December 2005

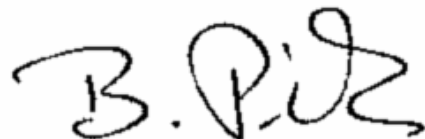


rück. Dazu passt auch der neu eingeführte Studiengang Mechatronik, der mit dem ersten Semester beginnt und zu dessen Zustandekommen Prof. Ponick erheblich beigetragen hat. Hier haben sich im zweiten Jahr bereits über 50 Erstsemester eingeschrieben.

Das IAL hat auch zur Verbesserung seiner Vernetzung einiges getan. Innerhalb der Universität sind wir nun Mitglied im Mechatronik-Zentrum Hannover und im Laboratorium für Nano- und Quanten-Engineering. Auf unsere Initiative hin formiert sich derzeit ein energie-technisches Zentrum Hannover. National wurden mehrere Treffen mit benachbarten Instituten für Leistungselektronik durchgeführt. International wurden neue Kontakte u.a. nach Italien und in die USA geknüpft und die bestehenden Kontakte nach Tschechien aufgefrischt. Zudem sind wir auch durch Konferenzbeiträge, z.B. auf der Actuator 2004 in Bremen und der EPE 2005 in Dresden, international sichtbarer geworden.

Im kommenden Jahr steht in der Lehre neben der laufenden Verbesserung der existierenden Veranstaltungen die Abrundung des Lehrangebots durch eine neue Vorlesung zu Bauelementen der Leistungselektronik an. In der Forschung streben wir weitere Kooperationen mit der Industrie, aber auch mit anderen Instituten in Hannover, in Deutschland und im Ausland an. Wir sind zuversichtlich, dass das IAL damit auch im kommenden Jahr eine positive Entwicklung nehmen wird.

Hannover, Dezember 2005



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



- 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

Curriculum Vitae

Prof. Dr.-Ing. Bernd Ponick

Welfengarten 1

30167 Hannover

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

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

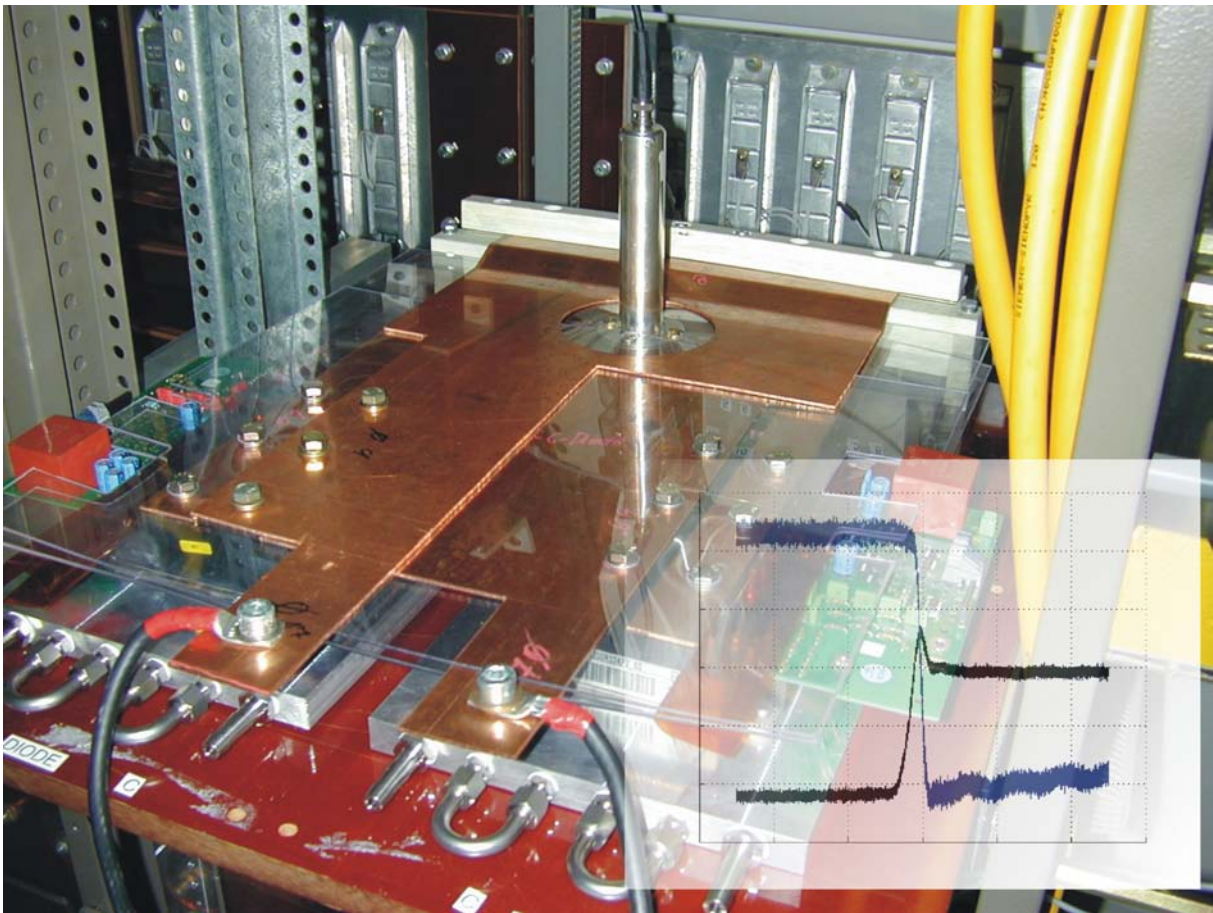
E-mail: ponick@ial.uni-hannover.de



- | | |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 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 – 2003 | Siemens AG in Dynamowerk Berlin as design engineer for large variable speed motors, head of the electrical design department and technical director |
| 2003 | Appointed full professor for Drive Systems at the University of Hannover |

Forschung am IAL: Projektberichte

Research at IAL: Project Reports



IGBT-Prüfstand
IGBT Test Bench

Entwurf und Analyse von Wicklungen elektrischer Maschinen

von Dr.-Ing. Jörn Steinbrink

Der Entwurf dreisträngiger Ganzlochwicklungen ist für Elektromaschinenbauer nicht gerade eine Herausforderung, da als Freiheitsgrade lediglich die Lochzahl und die Spulenweite existieren. Aufwendiger gestaltet sich aber bereits der Entwurf von Bruchlochwicklungen und deren Analyse. Anspruchsvoll sind auch die in letzter Zeit vor allem für permanentmagneterregte Synchronmaschinen eingesetzten Zahnspulenwicklungen, welche aber ebenfalls als – im Allgemeinen symmetrische – Bruchlochwicklungen aufgefasst und damit den selben Methoden für Entwurf und Analyse unterworfen werden können. Diese im Folgenden vorgestellten Methoden sind in dem vom IAL entwickelten Programm WET (Wicklungs-Entwurfs-Tool) umgesetzt.

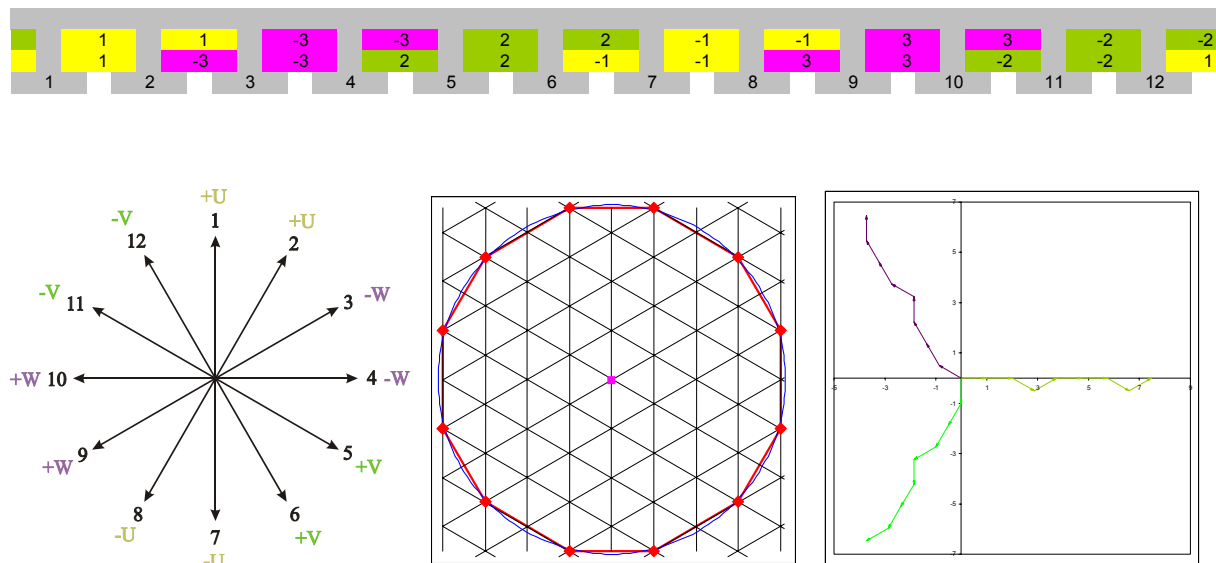
In jeder Spulenseite einer Wicklung wird eine Spannung, die Nutspannung, induziert. Die Zeitzeiger der Nutspannungen einer Wicklung ergeben bei symmetrischer Nutverteilung einen Nutstern, der sich nach einer Urwicklung wiederholt. Die Aufgabe eines automatisierten Wicklungsentwurfs ist es nun, die einzelnen Spulenseiten in Abhängigkeit von der Zahl der Spulenseiten je Nut, der Strangzahl, der Spulenweite und der Polzahl der Maschine den Wicklungssträngen so zuzuordnen, dass sich eine bezüglich der Stränge symmetrische Wicklung mit maximalem Grundfeldwicklungsfaktor und im Allgemeinen mit minimaler doppelt verketteter Streuung ergibt.

Design and Analysis of Windings of Electrical Machines

by Dr.-Ing. Jörn Steinbrink

The design of three-phase integral-slot windings means no great challenge to electrical engineers, because only two features can be varied, the number of slots per pole and per phase and the coil pitch. The design of fractional-slot windings, however, and their analysis is already more complicated. More ambitious are also tooth-wound coils recently used especially in permanent magnet synchronous machines. They are understood as – in general symmetrical - fractional-slot windings which are subject to the same methods of design and analysis. The methods described below have been realized in the program WET (Wicklungs-Entwurfs-Tool = Winding Design Tool) developed by IAL.

The slot voltage is induced in each coil side of a winding. Provided that the slots are distributed symmetrically, the phasors of the slot voltages form the so-called slot star, which may be repeated several times, in case of integral-slot winding $2p$ -times. The major task of an automated winding design is to assign the coil sides to the phases for a given configuration of number of phases, number of poles, number of coil sides per slot and of the coil pitch, so that a symmetrical winding with a maximum winding factor of the fundamental field and with a minimum of differential leakage is achieved.



Beispiel 1: Zonenplan, Nutenstern, GD und Spannungszeiger je Strang einer verteilten Zweischichtwicklung für
 Example 1: Distribution diagram, slot star, GD and voltage phasors per phase of a distributed double-layer winding for

$$N_1 = 12; p = 1; \frac{W}{\tau_p} = \frac{5}{6}; \xi_p = 0,9330; \sigma_d = 2,354\%; \nu = 1 \cdot (1 + 6g) \quad \forall g \in \mathbb{Z}$$

When the phasors of the slot star result in a polygon, the winding factor can easily be derived from the ratio of geometrical and arithmetical sum of the phasors of one phase. The Goerges polygon (GD) allows to evaluate the harmonic content generated by windings. The GD represents the phasor diagram of the ampere turns per slot, which determine the m.m.f. in the air gap between two adjacent slots and consequently the air-gap field itself provided that the air gap is constant. The GD is a simple means to determine the generated field spectrum and the differential leakage as a measure for the spatial harmonic content. It visualizes the deviation of the resulting air-gap field, which contains all spatial harmonics, from the circle representing only the fundamental field. The winding design is exemplarily described for a distributed winding (example 1) and for three windings with tooth-wound coils (ZSW) (examples 2 to 4), i.e. one single-layer winding (ES) and two double-layer windings (ZS). Tooth-wound coils can be understood as a special form of a distributed winding, the coil pitch of which is equal to one slot pitch. For a better illustration, they are located in the schematic layout of the distribution diagram analogously to the real design, that is on the left and right side of a tooth, respectively.

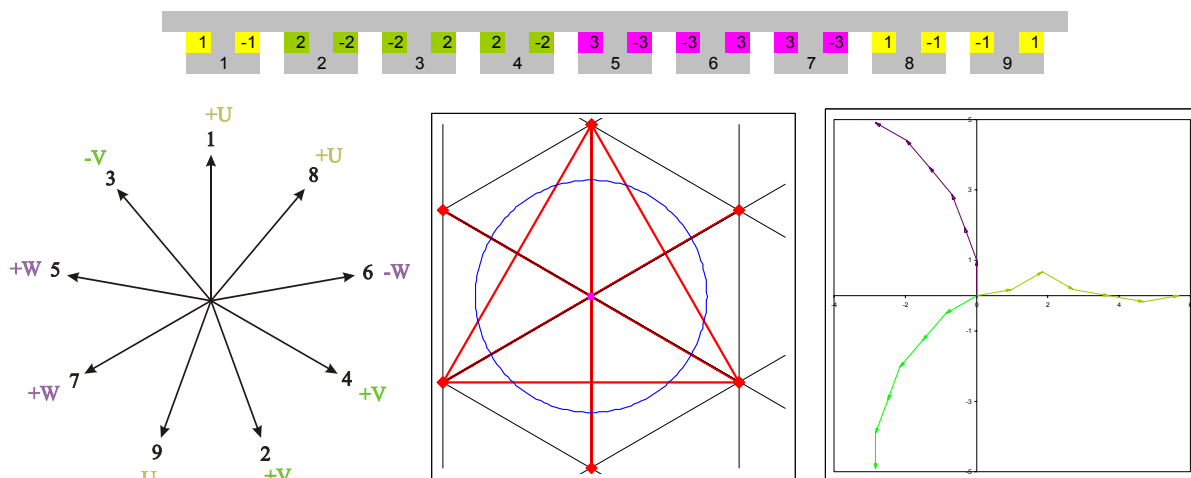
Werden die Zeiger des Nutensterns als Polygon angeordnet, kann in einfacher Weise der Wicklungsfaktor aus dem Verhältnis von geometrischer zu arithmetischer Summe der Zeiger eines Stranges abgelesen werden. Die Beurteilung des von Wicklungen erzeugten Oberwellengehalts erlaubt das Görge-Diagramm (GD). Das GD ist eine besondere Form der Darstellung der Nutdurchflutungen, aus denen sich direkt die magnetischen Spannungen am Luftspalt unter allen Zähnen ergeben und damit bei konstantem Luftspalt auch das Luftspaltfeld ergibt. Aus dem GD kann auf einfache Weise das generierte Feldspektrum und die doppelt verkettete Streuung als Maß für den Oberwellengehalt ermittelt werden. Das Diagramm visualisiert die Abweichung des resultierenden, alle Oberfelder enthaltenden Luftspaltfeldes von dem in der Darstellung des GDs einem Kreis entsprechenden Ideal eines ausschließlich nur das Grundfeld enthaltenden Luftspaltfeldes. Am Beispiel einer verteilten Wicklung (Beispiel 1) und von drei Zahnspulenwicklungen (ZSW) (Beispiele 2 bis 4), davon eine Einschichtwicklung (ES) und zwei Zweischichtwicklungen (ZS), wird der Wicklungsentwurf vorgestellt. Die Zahnspulenwicklungen stellen eine Sonderform der verteilten Wicklungen mit der Spulenweite einer Nutteilung dar und sind aus Anschaulichkeitsgründen in der schemati-

schen Darstellung des Zonenplans analog der tatsächlichen Ausführung jeweils links und rechts eines Zahnes angeordnet.

Des Weiteren können mit WET beliebige unsymmetrische Wicklungen vorgegeben und analysiert werden, wobei das Feldspektrum und die Wicklungsfaktoren für jeden Strang einzeln ermittelt werden und eine Zerlegung in deren symmetrische Komponenten erfolgt. Die Analyse einer komplizierten Wicklung wird am Beispiel einer polumschaltbaren Wicklung nach dem Prinzip der Polamplitudenmodulation (PAM) durchgeführt (Beispiel 5). Aus dem Nutenstern wird zunächst der Zonenplan für eine Schicht bzw. Nutseite abgeleitet und dann die zweite Hälfte der Wicklung um die Spulenweite am Umfang versetzt ergänzt. Im GD, dessen Schwerpunkt im Kreismittelpunkt liegt, entsprechen die dargestellten Punkte den magnetischen Spannungen im Luftspalt unter den jeweiligen Zähnen. Der Kreis repräsentiert die dem Grundfeld entsprechende magnetische Spannung. Aus der Abweichung der Punkte vom Kreis wird die doppelt verkettete Streuung bestimmt. Die Spannungszeiger der Stränge veranschaulichen für jeweils ein Feld, hier ist das Grundfeld dargestellt, den Wicklungsfaktor (Krümmung), die Symmetrie (gegenseitige Lage zueinander) und den Drehsinn (Reihenfolge) des Feldes. Für die Beispiele sind jeweils der Grundwellenwicklungsfaktor, die doppelt verkettete Streuung und das generierte Feldspektrum angegeben. Auf eine Wiedergabe der im Programm berechneten Wicklungsfaktoren und Darstellungen für Oberfelder wird hier verzichtet.

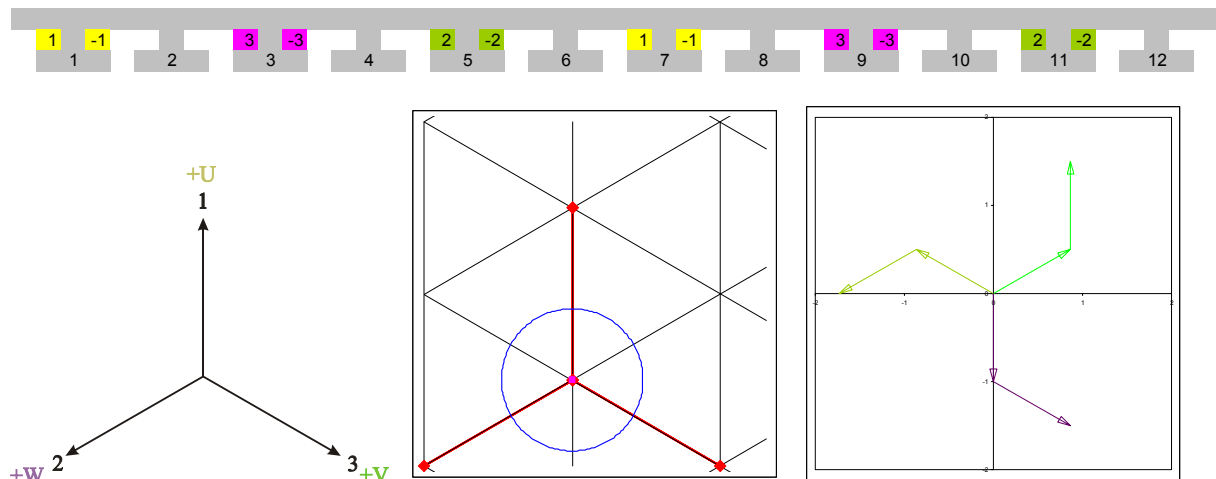
In addition, any unsymmetrical winding can be defined and analysed by WET. The field spectrum and the winding factors are determined separately for each phase analysing their symmetrical components.

As an example for a complicated winding, an analysis is carried out for a pole changing winding based on the principle of a pole amplitude modulation (PAM) (example 5). First of all, the distribution diagram for one layer or coil side is derived from the slot star. Then, the second layer of the winding is completed, shifted around the circumference by the coil pitch. In the GD, the centre of mass of which is equal to the circle centre, the displayed points correspond to the m.m.f. of the air gap between two adjacent slots. The circle represents the m.m.f. corresponding to the fundamental field. The differential leakage is determined by the deviation of the points from the circle. The voltage phasors illustrate for the fundamental field the winding factor (bending), the symmetry (cross position to one another), and the sense of rotation (sequence) of the field. For all examples the winding factor of the fundamental field, the differential leakage and the spatial harmonics generated by the windings are indicated.



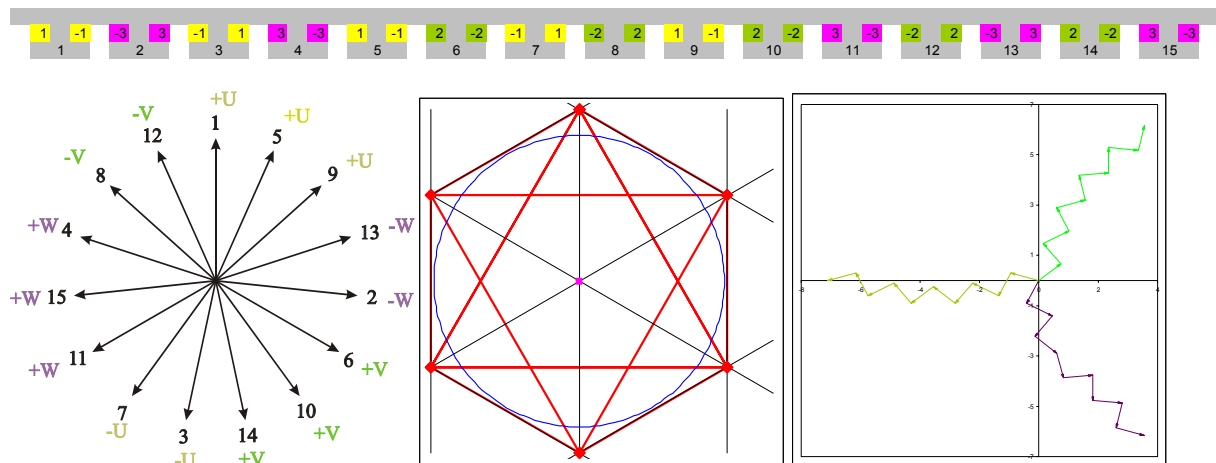
Beispiel 2: Zonenplan, Nutenstern, GD und Spannungszeiger je Strang einer ZS-ZSW für
 Example 2: Distribution diagram, slot star, GD and voltage phasors per phase of a ZS-ZSW for

$$N_1 = 9; p = 4; W = 1; \xi_p = 0,9452; \sigma_d = 118,21\%; \nu = 1 \cdot (4 + 3g) \quad \forall g \in \mathbb{Z}$$



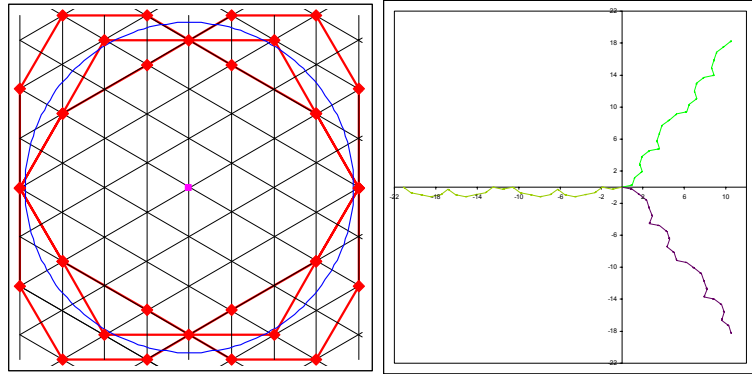
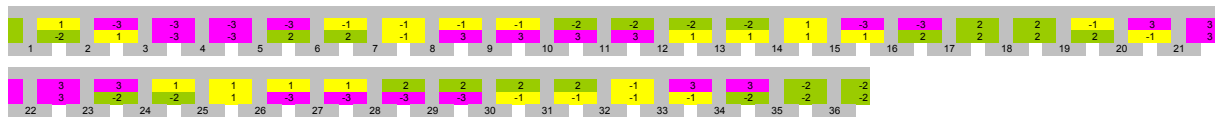
Beispiel 3: Zonenplan, Nutenstern, GD und Spannungszeiger je Strang einer ES-ZSW für
 Example 3: Distribution diagram, slot star, GD and voltage phasors per phase of a ES-ZSW for

$$N_1 = 12; p = 4; W = 1; \xi_p = 0,8660; \sigma_d = 192,433\%; \nu = 2 \cdot (2 + 1g) \quad \forall g \in \mathbb{Z}$$



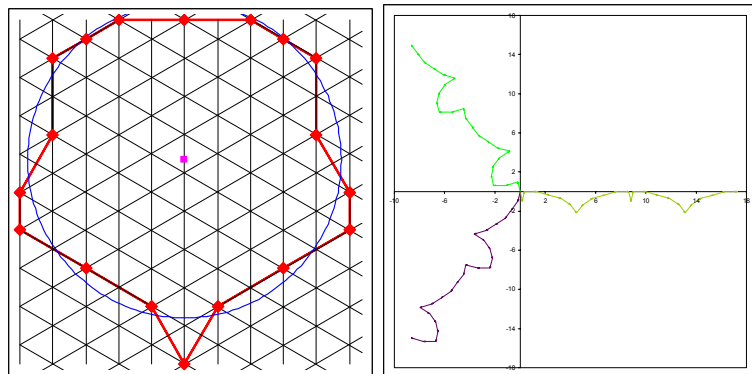
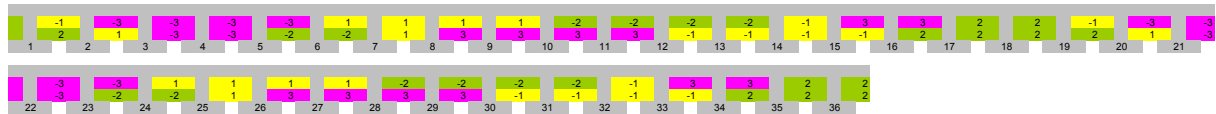
Beispiel 4: Zonenplan, Nutenstern, GD und Spannungszeiger je Strang einer ZS-ZSW für
 Example 4: Distribution diagram, slot star, GD and voltage phasors per phase of a ZS-ZSW for

$$N_1 = 15; p = 4; W = 1; \xi_p = 0,7109; \sigma_d = 38,854\%; \nu = 1 \cdot (4 + 3g) \quad \forall g \in \mathbb{Z}$$



Beispiel 5a: Zonenplan, GD und Spannungszeiger je Strang einer PAM-Wicklung für
 Example 5a: Distribution diagram, GD and voltage phasors per phase of a PAM winding for

$$N_1 = 36; p = 3; \xi_p = 0,8797; \sigma_d = 0,05799\%; \nu = 1 \cdot (3 + 2g) \quad \forall g \in \mathbb{Z}$$



Beispiel 5b: Zonenplan, GD und Spannungszeiger je Strang einer PAM-Wicklung für
 Example 5b: Distribution diagram, GD and voltage phasors per phase of a PAM winding for

$$N_1 = 36; p = 2; \xi_p = 0,7198; \sigma_d = 0,02876\%; \nu = 1 \cdot (2 + 1g) \quad \forall g \in \mathbb{Z}$$

Determination of the Frequency Dependence of the Impedance of Synchronous Machines

by Dipl.-Ing. Rainer Helmer

Introduction:

For high-performance synchronous machines, there are increasing demands on the accuracy of the forecast concerning their steady-state performance as well as concerning their performance under transient and subtransient conditions. Due to the electric and magnetic anisotropy of the rotor on the one hand and the saturation effect on the other hand, such forecasts cannot be obtained by analytical equations only. Therefore, within the scope of a diploma thesis, the model of a hydropower generator has been developed by means of the finite-element program FEMAG, and the simulation results have been compared with existing test results. The aim is to derive a simple transient model from the numerical field calculation.

Modellbildung und Simulationsergebnisse :

Modelling and Simulation Results:

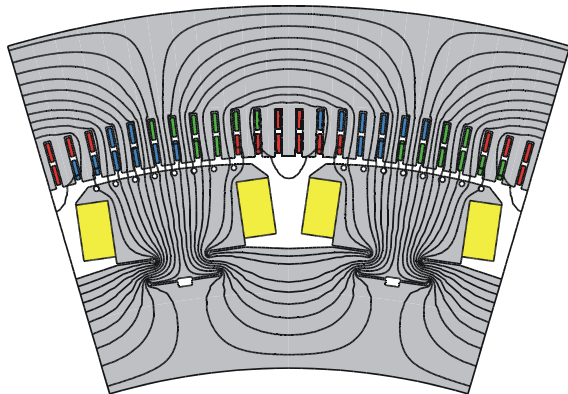


Abbildung 1 - Figure 1

Figure 1 shows the geometry of the simulated hydropower generator and the field distribution when working with no load and no excitation at rated voltage. The generator has a rated power of $P_N = 85$ MW for an outer diameter of $D_A = 6000$ mm.

The number of poles of the generator is $2p = 22$. Due to the periodicity of the fundamental field along the periphery, it is sufficient to calculate the numerical field for two poles only.

Ermittlung der Frequenzabhängigkeit der Impedanz von Synchronmaschinen

von Dipl.-Ing. Rainer Helmer

Einleitung:

Für Synchronmaschinen großer Leistung steigen die Anforderungen an die Vorhersagegenauigkeit sowohl in Bezug auf ihr stationäres Betriebsverhalten als auch auf das Verhalten im transienten und subtransienten Bereich. Aufgrund der elektrischen und magnetischen Anisotropie des Läufers einerseits und des Sättigungseinflusses andererseits sind derartige Vorhersagen auf rein analytischem Weg nicht zu erreichen. Daher wurde im Rahmen einer Diplomarbeit das Modell eines ausgeführten Wasserkraftgenerators mit Hilfe des Finite Elemente Programms FEMAG erstellt und die Simulationsergebnisse mit vorliegenden Messergebnissen verglichen. Ziel der Arbeit ist es, aus der numerischen Feldberechnung ein einfaches transientes Modell abzuleiten.

Abbildung 1 zeigt die erstellte Geometrie des simulierten Wasserkraftgenerators und die Feldverteilung im Leerlauf an Bemessungsspannung ohne Erregerstrom. Der Generator hat eine Bemessungsleistung von $P_N = 85$ MW bei einem Außendurchmesser von $D_A = 6000$ mm.

Die Anzahl der Pole des Generators beträgt $2p = 22$. Aufgrund der Periodizität des Grundfeldes entlang des Umfangs genügt die numerische Feldberechnung von zwei Polen.

Im ersten Schritt werden die charakteristischen Reaktanzen für die Park – Transformation in Läuferlängs- und Querachse X_d und X_q bestimmt. Hierzu wäre idealerweise ein räumlich sinusförmiger Strombelag erforderlich. Die Ungenauigkeit durch Oberwellen wird in Kauf genommen. Es wird einmal ein längs- und ein quermagnetisierender Ständerstrom I_d und I_q in das Ständerwicklungssystem bei nicht durchfluteter Erregerwicklung eingeprägt. Der Feldverlauf bei längsmagnetisierendem Ständerstrom ist identisch mit dem in Abbildung 1 dargestellten. Bei rein quermagnetisierendem Ständerstrom I_q schließen sich die Feldlinien im Läufer nicht über dem Pol, sondern über

die Pollücken. Die charakteristischen Reaktanzen ergeben sich als Quotienten aus Flussverteilung und Strom.

Die Mess- und Simulationsergebnisse für X_d und X_q in p.u. sind in der folgenden Tabelle gegenübergestellt.

Die gesättigten Werte für die Längsreaktanz X_d werden nach DIN EN 60034-4 Teil 4 mit Hilfe der Leerlauf- und Kurzschluß- Kennlinien der Maschine bestimmt, welche mit FEMAG ermittelt werden. Wie aus Tabelle 1 ersichtlich, stimmen Mess- und Simulationsergebnisse bei der Maschine sehr gut überein. Für die Querachse liegen keine Messergebnisse vor.

Reaktanz	Messung	FEMAG
$X_{d, \text{unges}}$ (p.u.)	1,07	1,08
$X_{d, \text{ges}}$ (p.u.)	0,9	0,87
$X_{q, \text{unges}}$ (p.u.)		0,74

Tabelle 1

Um die transienten und subtransienten Reaktanzen der Maschine zu bestimmen, wird die Maschine in FEMAG mit einem 50 Hz Ständerwechselfeld wiederum in d- bzw. q- Achse beaufschlagt. Damit wird der in der Norm DIN EN 60034-4 Teil 4 Abschnitt 44/45 als „Versuch mit angelegter Spannung bei Läuferstellung in Längs- und Querachse“ beschriebene Messaufbau nachempfunden. Die Subtransientreaktanz X_d' beschreibt die kurzschlussstrombegrenzende Wirkung direkt nach Kurzschlusseintritt durch die Parallelschaltung der Hauptreaktanz X_{hd} mit den auf den Ständer umgerechneten Streureaktanzen von Dämpfer und Erregerwicklung in Reihe mit der Ständerstreinduktivität. Ihre Größe wird im Wesentlichen durch die Streureaktanz des Dämpferkäfigs bestimmt. Zur Bestimmung der transienten Reaktanz X_d' wird angenommen, dass die Feldrückwirkung des Dämpferkäfigs bereits abgeklungen ist und nur noch die Ständerwicklung und die Erregerwicklung über das Hauptfeld miteinander gekoppelt sind. Dieser Fall kann in der Realität mit oben beschriebenem Versuch nicht bestimmt werden. In FEMAG kann man die alleinige Kopplung von Erreger- und Ständerwicklung jedoch dadurch berücksichtigen, dass die Leitfähigkeit der Dämpferwicklung zu Null gesetzt wird und die Erregerwicklung kurzgeschlossen wird. Abbildung 2 zeigt die Feldrückwirkung der kurzgeschlossenen Erregerwicklung für diesen Fall.

In a first step, the characteristic reactances of the stator winding in the d- and q-axis X_d and X_q of the rotor are determined. This would ideally require sinusoidal ampere-turns. Inaccuracies caused by spatial harmonics are accepted. A stator current I_d and I_q magnetizing in d- and q-axis direction is once impressed into the stator winding system, the field winding not being energized. The field characteristic of the stator current magnetizing in d-axis direction is identical with the one shown in figure 1. In case of a stator current I_q magnetizing in q-axis direction, the field lines in the rotor do not close through the poles, but via the pole gaps. The characteristic reactances result from the ratio of flux linkage and current.

The test and simulation results for X_d and X_q p.u. are compared with one another in the table shown below.

In accordance with DIN EN 60034-4 part 4, the saturated values for the d-axis reactance X_d are determined on the basis of the no-load and short-circuit characteristics of the machine calculated with FEMAG. As can be seen from table 1, there is a good match of the test and simulation results. There are no test results for the q-axis.

Reactance	Test	FEMAG
$X_{d, \text{unsat}}$ (p.u.)	1,07	1,08
$X_{d, \text{sat}}$ (p.u.)	0,9	0,87
$X_{q, \text{unsat}}$ (p.u.)		0,74

Table 1

In order to determine the transient and subtransient reactances of the machine, the latter is admitted in FEMAG with a 50 Hz alternating stator field in d- or q-axis, respectively. The test set-up is realized as described in the standard DIN EN 60034-4 part 4 para. 44/45 as a „test with applied voltage and the rotor position in d- and q-axis“. The subtransient reactance X_d' describes the effect that the short-circuit current is limited directly after the short circuit occurs by the parallel circuit of the main reactance X_{hd} with the leakage reactances of the damper and the field winding in series with the leakage inductance of the stator. Its value is essentially determined by the leakage reactance of the damper cage. For determining the transient reactance X_d' , it is assumed that the current in the damper cage

has already subsided and that just the stator and the field winding are coupled via the primary field with each other. In reality, this case cannot be determined with the test described above. In FEMAG, the sole coupling of field and stator winding can be taken into account by setting the conductivity of the damper winding to zero and short-circuiting the field winding. Figure 2 shows the field reaction of the short-circuited field winding for this case.

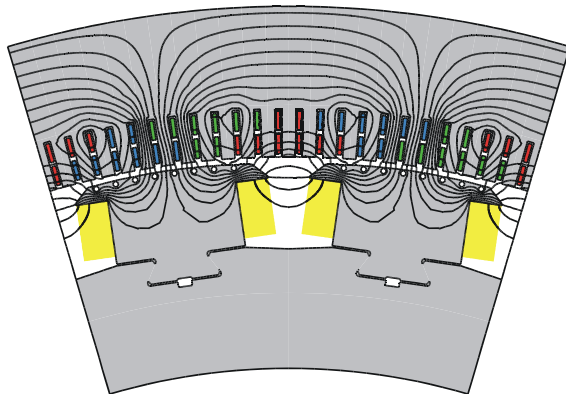


Abbildung 2 - Figure 2

Table 2 compares the test results of transient and subtransient reactances with the simulation results. The values of these reactances determined by FEMAG correspond to the unsaturated test values at $25\% \cdot U_N$. As can be seen, transient reactances of a synchronous machine can also be simulated quite precisely by means of the finite-element calculation. In order to simulate more accurately the field reactions in the d- and q-axis under dynamic conditions, an equivalent circuit with parallel branches for the damper winding is used. In this way, it is possible to consider more profoundly the effect of the current displacement in the damper winding in case of transient phenomena. For this purpose, equivalent circuit elements which simulate the real frequency behaviour of the machine in d- and q-axis, are calculated by means of the complex field damper factor \underline{d} describing the field reaction of the damper cage towards the primary field for frequencies $f \neq 0$ Hz. With four parallel arms consisting of L-R- combinations in parallel to the main inductances X_{hd} or X_{hq} respectively, the frequency behaviour of the damper cage can be simulated quite precisely (error $< 1\%$).

Reactance	Test: $0,25 U_N$	FEMAG
X_d' (p.u.)	0,24	0,236
X_d'' (p.u.)	0,137	0,139

Table 2

In Tabelle 2 sind die Messwerte von transienter und subtransienter Reaktanz den Simulationsergebnissen gegenübergestellt. Die mit FEMAG ermittelten Werte dieser Reaktanzen entsprechen den ungesättigten Werten der Messungen bei $25\% \cdot U_N$. Wie man sieht, können auch die transienten Reaktanzen der Synchronmaschine mittels Finiter Elemente Rechnung recht genau nachgebildet werden. Im weiteren Verlauf der Arbeit wurden die Feldrückwirkungen in d- und q- Achse mit Hilfe dynamischer Ersatzkettenleiter NOCH genauer nachgebildet, um so auch den Einfluss der Stromverdrängung in der Dämpferwicklung bei Ausgleichsvorgängen genauer berücksichtigen zu können. Hierzu werden mit Hilfe des komplexen Felddämpfungsfaktors \underline{d} , der die Feldrückwirkung des Dämpferkäfigs bei Frequenzen $f \neq 0$ Hz auf das Primärfeld beschreibt, Ersatzschaltbildelemente berechnet, die das reale Frequenzverhalten der Maschine in d- und q- Achse nachbilden. Mit vier parallelen Zweigen bestehend aus L-R-Kombinationen parallel zu den Hauptinduktivitäten X_{hd} bzw. X_{hq} kann das Frequenzverhalten des Dämpferkäfigs recht genau (Fehler $< 1\%$) nachgebildet werden.

Reaktanz	Messung: $0,25 U_N$	FEMAG
X_d' (p.u.)	0,24	0,236
X_d'' (p.u.)	0,137	0,139

Tabelle 2

Berechnung magnetischer Kreise eines Linearmotors anhand der Netzwerk-Analyse

von Dipl.-Ing. Anamaria Berardinelli

Zur Berechnung magnetischer Kreise existieren unterschiedlichste Verfahren. Eines davon ist die Netzwerk-Analyse, die sich durch einen äußerst geringen Berechnungsaufwand auszeichnet. Dadurch lassen sich parametrische Berechnungsmodelle realisieren und zeitnah durchrechnen.

Das Industrieprojekt beinhaltet die Berechnung magnetischer Kreise in permanentenerregten Linearmotoren (Bild 1) anhand der Netzwerk-Analyse.

Der magnetische Kreis des Linearmotors wird durch ein grobes Netzwerk (siehe Bild 2) modelliert, das aus der Verbindung zwischen aktiven und passiven Schaltelementen besteht. In diesem Fall sind die aktiven Schaltelemente die magnetischen Spannungsquellen von Primär-, und Sekundärteil, d.h. die Permanentmagneten und die Nutdurchflutungen. Zu den passiven Schaltelementen gehören die magnetischen Widerstände. Für die Ermittlung der auftretenden Radialflüsse (in Zähnen, Magneten und im Luftspalt) und Tangentialflüsse (in Jochen, Magnetlücken und Nutschlitz) wird ein Gleichungssystem aufgestellt und gelöst.

Im Bild 3 ist der Vorschubkraftverlauf in Abhängigkeit von der Läuferposition bei konstanter Stromeinprägung dargestellt. Die Ergebnisse der Netzwerk-Analyse wurden mit dem Programm MATLAB berechnet und mit dem Ergebnis einer Finite-Element-Analyse verglichen.

Der Vergleich des groben Modells mit der Netzwerk-Analyse zeigen, dass eine ausreichende Übereinstimmung mit dem FEM-Modell erreicht wurde.

Im nächsten Schritt werden die Berechnungsergebnisse durch Messungen überprüft.

Calculation of Magnetic Circuits in a Linear Motor by means of Network Analysis

by Dipl.-Ing. Anamaria Berardinelli

There exist various methods for calculating magnetic circuits. One method is the network analysis which is favourable because easy to calculate. In this way, parametric calculation models can be realized and calculated within a minimum of time.

This industrial project comprises the calculation of magnetic circuits in permanent magnet linear motors (figure 1) using network analysis.

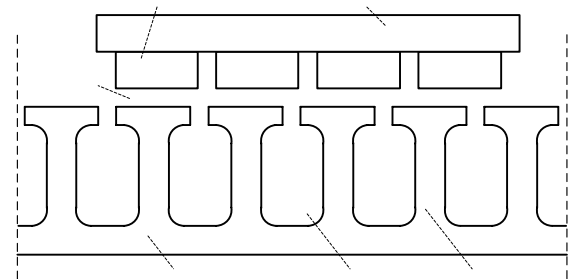


Bild 1: Ausschnitt eines Linearmotors

Figure 1: Part of a Linear Motor

The magnetic circuit of the linear motor is modelled by a rough network (see figure 2), where active and passive switching elements are connected to each other. In this case, the active switching elements are the magnetic voltage sources of the primary and secondary part, i.e. the permanent magnets and the ampere turns in the slot. The passive switching elements are the magnetic resistances. For determining the occurring radial flux (in the teeth, magnets and air gap) and the tangential flux (in the yokes, magnet gaps and slot openings), an equation system is set up and solved.

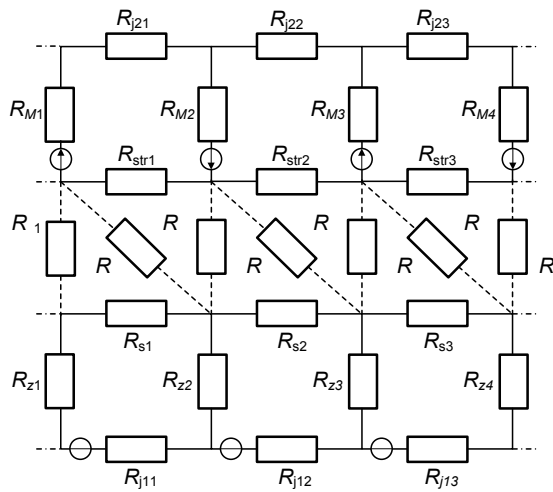


Bild 2: Grobes Netzwerk des Linearmotors

Figure 2: Rough Network of the Linear Motor

Figure 3 shows the driving force characteristic depending on the secondary position with constant impressed current. The results of the network analysis have been calculated with the program MATLAB and compared to the results of a finite-element analysis.

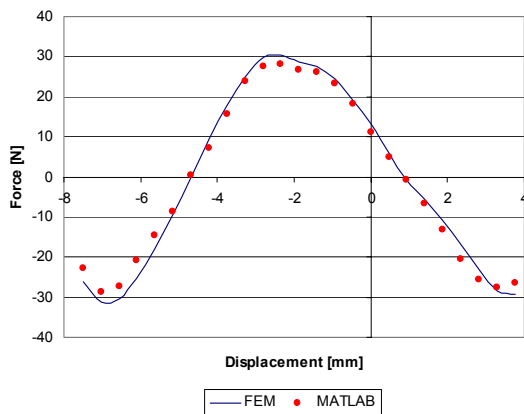


Bild 3: Vorschubkraftverlauf

Figure 3: Driving Force Characteristic

The comparison shows that there is a sufficient match with the FEM model.

In the next step, the calculation results will be verified by tests.

Spezielle Designregeln für Mikro-Linearmotoren

von Dipl.-Ing. Ralf Gehrking

Im Sonderforschungsbereich 516 „Konstruktion und Fertigung aktiver Mikrosysteme“ (SFB 516) werden elektromagnetische Linearmotoren entwickelt, die Gesamtabmessungen im Bereich weniger Millimeter und Detailabmessungen von wenigen Mikrometern besitzen. Dadurch können Schrittweiten von wenigen Mikrometern erreicht werden. Motoren dieser Größe können nur in Dünnschichttechnik hergestellt werden. Die Anwendung dieser Fertigungstechniken, wie z. B. Galvanik, Gasflusssputtern und Lithografie, erfordert neue Regeln für den Entwurf solcher Mikromotoren, die sich von denen für konventionell hergestellte Motoren unterscheiden.

Im SFB 516 wurden verschiedene Motorkonzepte untersucht und aufgebaut. Einer der im SFB 516 entwickelten Mikromotoren ist der so genannte Horizontalaktor. Der Horizontalaktor ist ein sechs-strängiger Schrittmotor nach dem Reluktanzprinzip. Im Gegensatz zu den anderen im SFB 516 entwickelten Motorkonzepten wird der magnetische Fluss beim Horizontalaktor parallel zur Waferebene, also horizontal, geführt. Der Vorteil dieses Konzeptes ist, dass sich die in jedem elektromagnetischen Motor auftretenden Maxwell'schen Normalkräfte zu Null kompensieren. Hieraus resultieren in Verbindung mit dem geringen Läufergewicht sehr kleine Reibkräfte. Das wiederum erlaubt es, den Motor mit einer rein tribologischen Führung auszurüsten, bei der der Läufer auf einer reibungs- und verschleißarmen Schicht gleitet.

Die Herstellung von Mikromotoren in Dünnschichttechnik eröffnet neue Möglichkeiten für die Geometrie und das elektromagnetische Design. Durch den schichtweisen Aufbau können Geometrien hergestellt werden, die mit klassischen feinwerktechnischen Fertigungsverfahren nicht oder nur mit sehr großem Aufwand realisiert werden können. Allerdings existieren auch technologische Grenzen für die ausführbaren Geometrien und für die eingesetzten Materialien, die beim Entwurf solcher Mikromotoren berücksichtigt werden müssen. Dies schränkt die Flexibilität beim elektromagnetischen Entwurf stark ein und erfordert eine enge Abstimmung mit den die Fertigungsverfahren entwickelnden Mikrotechnologien. So ist z. B. die Permeabilität der einge-

Special Design Rules for Linear Micro Actuators

by Dipl.-Ing. Ralf Gehrking

The Collaborative Research Centre 516 „Design and Manufacturing of Active Micro Systems“ (SFB 516) develops electromagnetic linear motors with total dimensions in the range of a few millimetres and detail dimensions of a few micro metres. In this way, step sizes of a few micro metres can be achieved. Motors of this size can only be manufactured applying thin-film technology. The use of manufacturing methods like electroplating, gas-flow sputtering and lithography requires new rules for the design of such micro actuators, unlike those valid for conventionally manufactured actuators.

In the SFB 516, different motor concepts were tested and constructed. One micro actuator developed within SFB 516 is the so-called horizontal actuator. This is a 6-phase stepping motor based on the reluctance principle. Compared to other motor concepts developed within SFB 516, the magnetic flux in the horizontal actuator is guided horizontally, i.e. in parallel to the wafer surface. The advantage of this concept is that the Maxwell normal forces occurring in all electromagnetic motors are compensated to zero. Together with the traveller's low weight, this results in very small friction forces. This on the other hand permits a motor design providing a purely tribological guide, where the traveller slides on a layer with very low friction and wear.

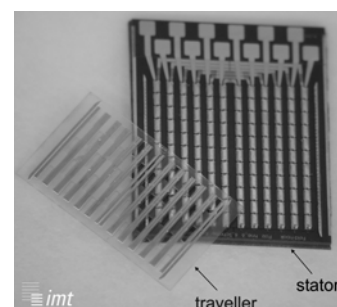


Bild 1: Der Horizontalaktor

Figure 1: Horizontal Actuator

Manufacturing of micro actuators applying thin-film technology presents new possibilities with respect to their geometry and electro-

magnetic design. The layer structure permits geometries which cannot be achieved (or only under unreasonable efforts), when traditional precision-engineering manufacturing methods are applied. Nevertheless, there exist technological limits for the possible geometrical structures as well as for the materials used in this context. This has to be considered when designing micro actuators of that kind, as it considerably restricts the flexibility of the electromagnetic design and requires a close co-operation with the micro technologists developing the manufacturing methods. The permeability of soft magnetic materials for example strongly depends on the structure height (figure 2), which has to be taken into consideration when designing the magnetic flux guides.

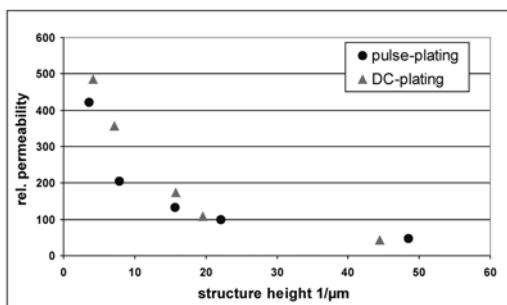


Bild 2: Gemessene relative Permeabilität in Abhängigkeit von der Schichthöhe

Figure 2: Relative permeability as a function of the structure height

For the different concepts of linear micro actuators, parametric FEM models were developed in order to calculate the magnetic field, thus allowing to modify the geometrical and material data as flexible as possible. By this way, the design can be adapted quickly and with small efforts to the technological progress, i.e. improved material properties, enhanced technological limits etc.. By means of FEM simulations, the influence of various geometrical and material data was investigated with respect to the driving force. It was proven that the optimum design, e.g. the optimum number of teeth per stator pole, considerably depends on the permeability of the soft magnetic flux guide. In addition, it was revealed that there is an optimum structure height of the soft magnetic flux guide, having a strong influence on the permeability. This is a decisive difference compared to the design of conventional motors. Since the permeability does not depend on dimensions in traditional motors, the driving force is nearly proportional to the air gap area between stator and traveller. Doubling the air gap area

setzten weichmagnetischen Materialien stark von der Schichthöhe abhängig (Bild 2), was beim Design der magnetischen Flussführungen berücksichtigt werden muss.

Zur Berechnung des magnetischen Feldes wurden für die unterschiedlichen Konzepte der Mikro-Linearmotoren parametrische FEM-Modelle erstellt, mit denen die Geometrie- und Materialdaten möglichst flexibel variiert werden können. Dieses bietet die Möglichkeit, das Design an die technologischen Fortschritte - verbesserte Materialeigenschaften, erweiterte technologische Grenzen - schnell und ohne großen Aufwand anpassen zu können. Mit Hilfe der FEM-Simulationen wurde der Einfluss verschiedener Geometrie- und Materialdaten auf die Höhe der Vorschubkraft untersucht. Dabei zeigte sich, dass das optimale Design - z. B. die optimale Anzahl von Zähnen je Statorpol - stark von der Permeabilität der weichmagnetischen Flussführung abhängt. Des Weiteren stellte sich heraus, dass sich insbesondere für die Schichthöhe der weichmagnetischen Flussführung ein Optimum ergibt, da durch sie die Permeabilität stark beeinflusst wird. Dieses ist ein wesentlicher Unterschied zum Design herkömmlicher Motoren. Da bei diesen die Permeabilität unabhängig von den Dimensionen ist, ist die Vorschubkraft in etwa proportional zur Luftspaltfläche zwischen Ständer und Läufer. Eine Verdoppelung der Luftspaltfläche verdoppelt auch die Vorschubkraft. Dieses ist jedoch für den dünnfilmtechnisch hergestellten Horizontalaktor nicht der Fall. Bild 3 zeigt, dass die Erhöhung der Flussführungen, d. h. die Vergrößerung der Luftspaltfläche, sogar zu einer Reduzierung der Vorschubkraft führen kann.

Zur Vereinfachung des Fertigungsprozesses wurde die Flussführung des Läufers bisher 20 μm höher als die Flussführung des Stators ausgeführt. Für diesen Fall beträgt die optimale Statorhöhe 20 μm . Eine wesentliche Erhöhung der Vorschubkraft kann erreicht werden, wenn die Flussführungen von Ständer und Läufer gleich hoch sind. Dieses muss jedoch mit einem aufwendigeren Fertigungsprozess erkauft werden.

Derartige Untersuchungen sind jedoch nur möglich, wenn genaue Informationen über die mikrotechnisch erzeugten Materialien und deren Eigenschaften vorhanden sind. Dies ist zwar aufgrund der geringen Abmessungen z. T. mit erheblichem Aufwand verbunden. Aber nur auf dieser Basis können für Mikromotoren

zutreffende Designregeln erarbeitet und so die Eigenschaften von Mikromotoren wesentlich verbessert werden.

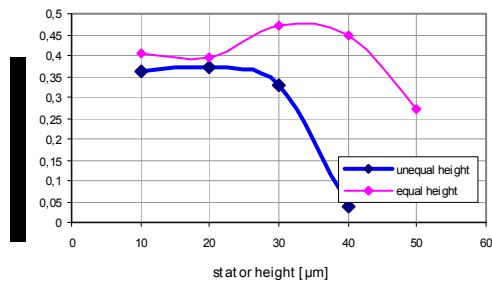


Bild 3: Vorschubkraft in Abhängigkeit von der Statorhöhe
Figure 3: Driving force as a function of the stator height

consequently implies a doubling of the driving force. This is not the case for the horizontal actuator manufactured in a thin-film technology process. Figure 3 shows that an increased height of the flux guides, i.e. an increased air gap area, can even lead to a smaller driving force.

To simplify the manufacturing process, the flux guide of the traveller was so far designed 20 μm larger than the one of the stator. For this case, the optimum stator height is 20 μm. The driving force can considerably be increased for equal heights of stator and traveller. This, however, requires a more sophisticated manufacturing process.

Investigations of that kind are only possible, if detailed information on the micro-technologically manufactured materials and their properties are available. Due to the small dimensions of micro actuators, this is partly connected with considerable efforts, but it is the only way to elaborate appropriate design rules and with this improved properties for micro actuators.

Sensorless Position Control of Micro Actuators

by MSc Vijay Ganesan

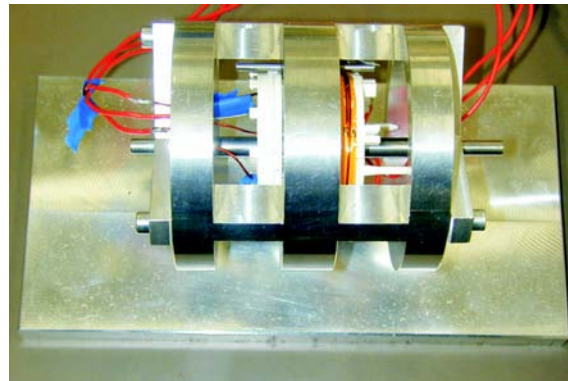
The elimination of the position sensors reduces both cost and size as well as improves the reliability of low-cost servo drives. Hence an attempt is made to eliminate the position sensors and instead to determine the position from the measured electrical quantities like current and voltage. The dependence of the inductance on the rotor position is being exploited to estimate the rotor position. This principle is valid for many of the actuators with different working principles, like brushless DC motors, reluctance motors etc.

The concept explained above has been investigated based on FEM calculations and circuit simulation, and has been validated through a macroscopic demonstrator. It is now attempted to extend this technique also to micro actuators. This project is part of the Collaborative Research Centre 516 (A6).

Geberlose Lageregelung bei Mikromotoren

von MSc Vijay Ganesan

Der Verzicht auf Lagegeber reduziert sowohl die Kosten als auch die Größe von Stellantrieben und erhöht gleichzeitig die Zuverlässigkeit. Aus diesem Grund wird stattdessen versucht, die Position anhand von elektrischen Messgrößen wie Strom und Spannung zu bestimmen. Die Abhängigkeit der Induktivitäten von der Läuferposition soll hier Rückschlüsse über die Läuferposition ermöglichen. Dieses Prinzip kann für viele Kleinmotoren unterschiedlichster Arbeitsprinzipien angewendet werden, wie z.B. bürstenlose Gleichstrommotoren, Reluktanzmotoren etc.



Reluktanz-Motor (SRM): Makroskopischer Demonstrator, entwickelt vom IAL

Switched Reluctance Motor (SRM): Macroscopic Demonstrator designed at IAL

Das oben beschriebene Konzept wurde mit Hilfe von FEM-Berechnungen und Simulationen untersucht und anhand eines makroskopischen Demonstrators verifiziert. Im nächsten Schritt wird versucht, dieses Verfahren auf Mikromotoren auszuweiten. Dieses Projekt ist Teil des Sonderforschungsbereichs (SFB) 516 (A6).

Automatisierte Entwicklungsumgebung für Mikrolinearmotoren

von Dipl.-Ing. Sven Demmig

Mikrolinearmotoren sind Aktoren, deren kleinste Abmessungen im Mikrometerbereich liegen und folglich mit mikrotechnischen Verfahren, wie z.B. Sputtering und Lithographie gefertigt werden. Innerhalb dieses Forschungsprojektes werden Motoren unterschiedlicher Bauart nach dem elektromagnetischen Prinzip untersucht.

Die Fertigungszeiten in der Mikrotechnik sind sehr lang und mit hohen Kosten verbunden. Außerdem kommen neu entwickelte Materialien zum Einsatz, deren Parameter stark von denen bei makroskopischen Motoren abweichen können. Zusätzlich werden Aktivteile mit verschiedener Flussführung nach dem Hybrid- und Reluktanzschrittmotorprinzip, sowie verschiedene Führungen eingesetzt, die innerhalb der Entwicklungsumgebung einfach austauschbar sein müssen. Deshalb ist es sinnvoll eine modularisierte Entwicklungsumgebung zu schaffen, deren Schnittstellen vollständig automatisiert sind.

Bild 1 zeigt den Aufbau der Entwicklungsumgebung mit den Schnittstellen der einzelnen Module. Das magnetische Modell beinhaltet die Ergebnisse der FEM-Berechnungen der Aktoren. Es wurde ein Tool geschaffen, mit dessen Hilfe die Kräfte in Abhängigkeit der Position und Stromstärke automatisch aus den FEM-Ergebnissen berechnet und in Polynome der Vorschub- und Normalkräfte für die kleinste symmetrische Einheit, d.h. eine halbe Zahnteilung, überführt werden.

Im dynamischen Modell ist die Reibcharakteristik der Führung hinterlegt. Momentan sind Führungen mittels Kugeln oder Tribologie im Einsatz und zukünftig soll das System um Führungen auf elektromagnetischer und aerostatischer Basis erweitert werden. Der Block „Controller“ simuliert die auf einem Mikrocontroller zu implementierenden Bestandteile, wie die Regelung und Steuerung des Aktors. Sehr gut geeignet für den Einsatz mit Mikrolinearmotoren hat sich zur Positionsregelung der Sliding-Mode-Regler herausgestellt. Der Regler ist für nicht lineare Systeme geeignet und sehr robust, d.h. er ist in der Lage, auf große Parameterschwankungen und große Störkräfte schnell zu reagieren. Zukünftig soll

Automated Design Environment for Linear Micro Actuators

by Dipl.-Ing. Sven Demmig

Linear micro motors are actuators where the smallest dimensions are in the range of micro metres and which are manufactured applying micro technological manufacturing methods, like for ex. sputtering and lithography. Within the scope of this research project, various types of actuators are examined based on the electromagnetic principle.

Times for manufacturing in micro technology processes are very long and connected with high costs. In addition, new materials especially developed for this purpose are applied, the parameters of which can largely differ from those typical for macroscopic motors. Moreover, active parts are employed based on the hybrid and reluctance stepping motor principle, as well as different guides all of which must be easily exchangeable within the design environment. For these reasons, it makes sense to design a modular environment with fully automated interfaces.

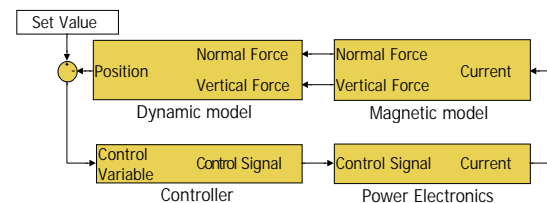


Bild 1: Schematische Darstellung der Entwicklungsumgebung

Figure 1: Schematic diagram of the design environment

Figure 1 shows the design environment with the interfaces of the single modules. The results obtained from the FEM calculations of the actuators are implemented in the magnetic model. A tool has been developed which allows an automated calculation of the forces, based on the FEM results and dependent on the position of the traveller and the intensity of the current. The forces are then transformed into polynomials for both thrust and vertical forces.

The dynamic model is based on the friction characteristic of the guide. So far, ball or tribological guides are used; the future system

shall include guides based on electromagnetic and aerostatic principles. The “Controller“ block represents the components to be implemented on a micro controller, as for. ex. the actuator control equipment. In this context, the sliding-mode controller has proved to be highly suitable for position control applied with linear micro actuators. The controller is suitable for non-linear systems being very robust, i.e. able to react quickly on considerable parameter changes and disturbances. Subject of a future project is to develop a power electronic system which shall be adapted to the motors and integrated in the simulation environment.

In order to experimentally verify the control algorithms, even before prototypes of the micro linear actuators are available, a test stand with a linear stepping motor has been set up (figure 2). Implementation and test of the control using a micro controller and this test stand are presently in progress.

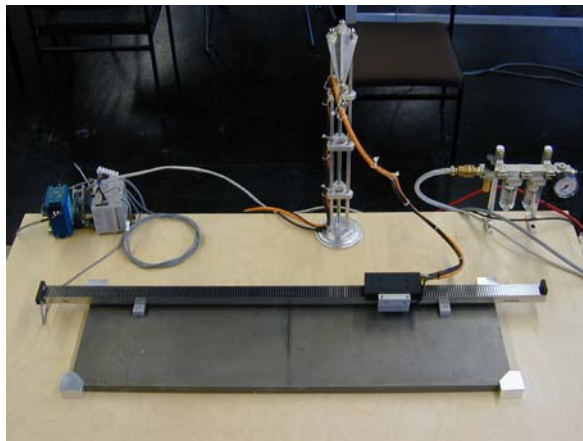


Bild 2: Linear-Schrittmotor

Figure 2: Linear stepping motor

A simulation environment for linear micro actuators has been designed which permits simple integration of new developments and very quick parameter changes. Moreover, the simulation environment contains interfaces between different simulation programs, like for ex. MATLAB Simulink[®] and the FEM software ANSYS.

noch eine an die Motoren angepasste Leistungselektronik entwickelt und in die Simulationsumgebung integriert werden.

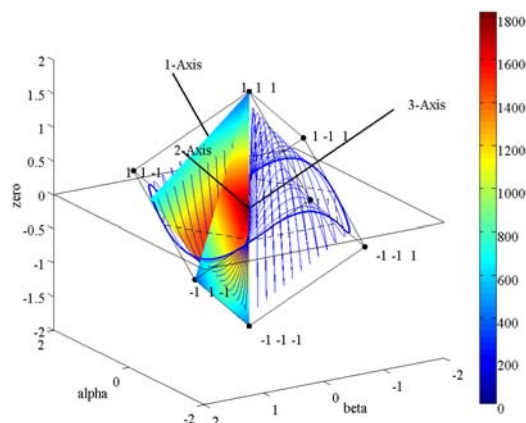
Um bereits vor der Verfügbarkeit von Prototypen der Mikrolinearmotoren die experimentelle Verifikation der Regelung zu ermöglichen, wurde ein Linear-Schrittmotor angeschafft (Bild 2). Implementierung und Test der Regelung an diesem Versuchsmodell sind Gegenstand aktueller Arbeiten.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass eine Simulationsumgebung für Mikrolinearmotoren zur Verfügung steht, in die Neuentwicklungen leicht integriert und Änderungen in den Parametern sehr schnell umgesetzt werden können. Darüber hinaus stellt die Simulationsumgebung Schnittstellen zwischen verschiedenen Simulationsprogrammen wie z.B. MATLAB Simulink[®] und der FEM-Software ANSYS zur Verfügung.

Untersuchung und Verbesserung von Pulsmodulationsverfahren bei Puls-Wechselrichtern

von MSc Vijay Ganesan

Das Modulationsverfahren hat großen Einfluss auf das Betriebsverhalten des Wechselrichters, wie z.B. den Ausgangs-Verzerrungsstrom, die Bemessung des Effektivstroms am Gleichstrom-Zwischenkreis-Kondensator und die Gesamtverluste der Halbleiterbauelemente. Neben der Simulation kommen analytische und grafische Tools zur Untersuchung und Bewertung des Betriebsverhaltens zum Einsatz. Die grafische Darstellung dieser oft multivariablen Funktionen beschleunigt den Erkenntnisgewinn und erleichtert das Verständnis für das Verhalten von Pulsmodulationsverfahren.



Verteilung der Gesamtverluste im Wechselrichter bei Sigma-Delta-Modulation (SDM)

Distribution of the total device losses for Sigma Delta modulation (SDM)

Die Abbildung zeigt als Beispiel den Einfluss der Nullkomponente der drei Modulator-Eingangssignale bei Sigma-Delta-Modulation. Es werden die Auswirkungen auf die Kenngrößen des Modulators im Hinblick auf eine Verbesserung des Betriebsverhaltens untersucht. Die analytisch gewonnenen Ergebnisse wurden durch Simulationen und geeignete Versuche verifiziert.

Examination and Improvement of Pulse Modulation Techniques for Three-phase Inverters

by MSc Vijay Ganesan

The modulation strategy has a large influence on the performance of the inverter such as output distortion current, rms current rating of the dc link capacitor and the total semiconductor device losses. Besides simulation, analytical calculations and 3D graphics are used for the study and performance evaluation. The graphical illustration of these often multivariable functions accelerates the learning process and helps to understand the behaviour of pulse modulation techniques in all points of operation.

In the example depicted in the figure, a zero-sequence component of the three input signals to a Sigma Delta modulator is taken into account, and its effect on the modulator characteristics is examined for the possibility to improve their performances. The analytical results have been verified through simulations and suitable experiments.

Use of Filters with Multi-Level Converters

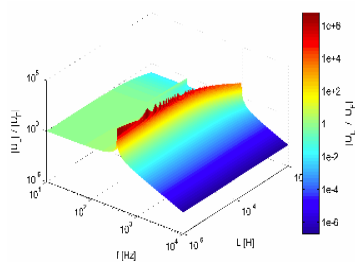
by Dipl.-Ing. Stefan Pöhler

Common mains-operated motors cannot be fed directly by converters due to pulsed output voltage. This effect can be reduced by using low-pass filters, so that feeding via converters is made possible. Filters used with multi-level converters have to meet specific requirements. An analytical study of the system including the load enables the use of filters which are matched to an optimum.

The modelled system comprises a converter, different filters and a motor load. The converter generates a voltage containing - besides the fundamental component - several harmonics. Depending on the frequency, the filter either amplifies or dampens the voltage fed to the motor. The influence of the filter considerably depends on the respective load. The load itself changes its behaviour depending on the fundamental component and the speed which have been chosen.

Splitting the filter transfer function into the common-mode and differential-mode component provides the possibility to independently examine the filter without earth connection and the earth connection itself. The harmonics with switching frequency have to be dampened by a certain factor. This leads to the minimum switching frequency which is applicable, and which shall be as low as possible.

It is seen that the use of larger inductors has a negative effect on the fundamental component, but on the other hand, it allows a lower switching frequency of the converter. Here, an optimum has to be found.



Übertragungsfunktion eines Filters mit $f_0 = 350$ Hz bei Abschluss mit einem Motor (Schlupf $s = 0$).

Transfer function of a filter with $f_0 = 350$ Hz when terminated by a motor (slip $s = 0$).

Einsatz von Filtern bei Multi-Level-Umrichtern

von Dipl.-Ing. Stefan Pöhler

Gewöhnliche Netzmotoren können auf Grund der pulsformigen Spannungen nicht direkt aus Umrichtern gespeist werden. Um Umrichterbetrieb zu ermöglichen, werden Tiefpassfilter eingesetzt, die die Oberschwingungen reduzieren. Der Einsatz von Multi-Level-Umrichtern stellt besondere Anforderungen an das Filter. Durch eine analytische Betrachtung des Systems unter Berücksichtigung der Last ist es möglich, ein optimal angepasstes Filter einzusetzen.

Das modellierte System besteht aus einem Umrichter, verschiedenen Filtern und einer motorischen Last. Der Umrichter erzeugt eine Spannung, die neben einer Grundschwingung mehrere Oberschwingungen enthält. Diese Spannung wird von dem Filter abhängig von der Frequenz verstärkt oder abgedämpft dem Motor zugeführt. Der Einfluss des Filters ist stark von der eingesetzten Last abhängig. Die Last selbst verändert ihr Verhalten in Abhängigkeit von der eingesetzten Grundschwingung und der eingestellten Drehzahl.

Die Zerlegung der Übertragungsfunktion des Filters in die Gleichtaktkomponente und die Gegentaktkomponente ermöglicht die getrennte Untersuchung des Filters ohne Erdanbindung und der Erdanbindung selbst. Die Anforderung der Abdämpfung der Oberschwingung mit Schaltfrequenz liefert die minimal einsetzbare Schaltfrequenz. Diese soll so klein wie möglich gehalten werden.

Der Einsatz einer größeren Induktivität führt zu einem negativen Einfluss auf die Grundschwingung. Jedoch ist mit einer größeren Induktivität eine niedrigere Schaltfrequenz des Umrichters möglich. Hier gilt es ein Optimum zu finden.

Energieeinspeisung von Brennstoffzellen in ein Microgrid-Modell

von Dipl.-Ing. Andreas Averberg

Die Brennstoffzelle gilt als wichtige Energieoption für die Zukunft. Am IAL wird derzeit an einem Umrichtersystem gearbeitet, mit dessen Hilfe die Energieeinspeisung eines am Institut vorhandenen Brennstoffzellenstacks von 1,2 kW Leistung in ein Microgrid-Modell ermöglicht werden soll. Da eine einzelne Zelle eine Ausgangsspannung von ca. einem Volt besitzt, haben auch in Reihe geschaltete Module oft Leerlaufspannungen, die in einem Bereich von unter 100 V liegen. Für die Einspeisung in ein 400 V-Netz ist jedoch eine Zwischenkreisspannung von ca. 600 V erforderlich. Des Weiteren haben Brennstoffzellen eine stark lastabhängige Kennlinie der Ausgangsspannung. Das am IAL vorhandene Brennstoffzellensystem weist eine Nennleistung von 1,2 kW auf. Die Ausgangsspannung bewegt sich je nach Lastfall in einem Bereich von 30 V bis 50 V. In untenstehender Grafik ist die vorgeschlagene Topologie der Leistungselektronik zu erkennen. Sie besteht aus einem erzeugerseitigen Gleichspannungswandler (DC/DC 1) und aus einem lastseitigen, dreiphasigen Wechselrichter (DC/AC 1). Um das Brennstoffzellensystem (FC) mit einer gleichmäßigen Belastung im optimalen Arbeitspunkt zu betreiben, ist ein zusätzlicher Energiespeicher im Zwischenkreis erforderlich. Hier könnte ein Doppelschichtkondensator (EDLC) zum Einsatz kommen. Diese Kondensatoren besitzen Kapazitätswerte bis zu mehreren 1000 F, sind allerdings nur mit Nennspannungen bis zu 100 V erhältlich. Daher ist auch hier der Einsatz eines Gleichspannungswandlers erforderlich (DC/DC 2).

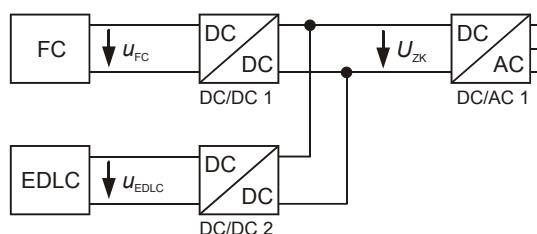


Bild 1: Übersicht der Gesamtopologie
Figure 1: Overview of Total Topology

Aus den oben genannten Eigenschaften des Brennstoffzellensystems ergeben sich vor allem für den erzeugerseitigen Gleichspannungswand-

Electrical Energy Fed by Fuel Cells into a Microgrid Model

by Dipl.-Ing. Andreas Averberg

Fuel cells are considered as one important future energy option. The IAL is presently working on a converter system by means of which a fuel cell stack shall supply electrical power into a microgrid model. Since each cell has an output voltage of approx. one volt, even modules switched in series often have no-load voltages below 100 V. To supply a 400 V grid, a voltage of approx. 600 V is required in the DC link. Moreover, the output voltage in fuel cells is strongly dependent on the load. The fuel cell system used at IAL has a nominal power of 1,2 kW. Depending on the load, the output voltage ranges from 30 V to 50 V. The figure on the left shows the proposed power electronics topology. It consists of a DC/DC converter (DC/DC 1) on the fuel cell side and a three-phase inverter (DC/AC 1) on the supply side. In order to operate the fuel cell system (FC) under constant load at its optimum operating point, an additional energy store is needed in the DC link. For this purpose, an electric double-layer capacitor (EDLC) could be used. These capacitors have capacities of up to several 1000 F, but with nominal voltages of up to 100 V only. Here too, the use of a DC/DC converter (DC/DC 2) is required.

The properties of the fuel cell system mentioned above imply special requirements for the DC/DC converter (DC/DC 1) on the fuel cell side. First of all, it must be capable to increase the output voltage of the fuel cell u_{FC} by a factor of approx. 20. In addition, the load-dependent voltage u_{FC} must be adjusted to the constant value of the DC link voltage U_{ZK} . For this purpose, a voltage-fed full bridge with a switching frequency of 25 kHz is used (see figure below). The wide voltage range is bridged by using a HF transformer; the rectifier consists of a SiC diode bridge (photo). A state space control has been developed as the control method, being currently implemented on a micro processor.

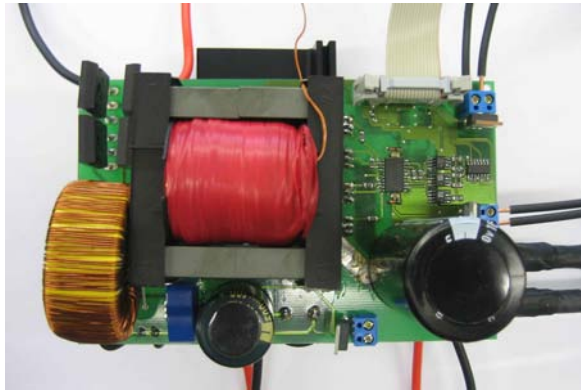


Bild 2: Laboraufbau des Gleichspannungswandlers
Figure 2: Laboratory set-up of a DC/DC converter

ler (DC/DC 1) besondere Anforderungen. Zunächst muss er in der Lage sein, die Ausgangsspannung der Brennstoffzelle u_{FC} um einen Faktor von ca. 20 hochzusetzen. Des Weiteren muss diese lastabhängige Spannung u_{FC} auf den konstanten Wert der Zwischenkreisspannung U_{ZK} geregelt werden. Hier kommt eine spannungsgespeiste Vollbrücke mit einer Schaltfrequenz von 25 kHz zum Einsatz. Über einen HF-Transformator wird der weite Spannungsbereich überbrückt, der Gleichrichter besteht aus einer SiC-Dioden Brückenschaltung (Foto). Als Regelverfahren wurde eine Zustandsregelung entwickelt. Diese Regelung wird derzeit auf einem Mikroprozessor implementiert.

Prüfstand zur Charakterisierung von Leistungsbau-elementen

von Dipl.-Ing. Harald Kuhn

Moderne Hochspannungs-IGBT-Module (HV-Insulated Gate Bipolar Transistor) besitzen eine Kollektor-Emitter-Sperrspannung bis zu maximal 6,5 kV. Durch Serienschaltung von mehreren dieser Bauteile lässt sich das Sperrvermögen eines Umrichterzweiges erheblich erhöhen. Bei der Reihenschaltung von mehreren Bauteilen ist jedoch zu jedem Zeitpunkt, d.h. im Sperrzustand (statisch) und in der Ein- und Ausschaltphase (dynamisch), darauf zu achten, dass sich die zu sperrende Spannung symmetrisch auf die einzelnen Halbleiterschalter aufteilt. Aus diesem Grund spielt bei der Reihenschaltung die Ansteuereinheit (Gate-Unit) eine große Rolle. Sie muss in der Lage sein, im statischen und dynamischen Fall eine unsymmetrische Spannungsaufteilung an den Bauelementen zu erkennen und aktiv einzugreifen, um die Zerstörung des Bauelementes zu verhindern.

Mit dem am IAL entstehenden Prüfstand wird es möglich sein, verschiedene Kombinationen von Halbleiterschalter und Ansteuereinheit in Abhängigkeit von Temperatur und Schaltstrom bei der entsprechenden Bemessungsspannung zu untersuchen. Die Ansteuereinheiten der verschiedenen Hersteller unterscheiden sich unter anderem in der Steuerspannungsform. Diese Steuerspannung beeinflusst in erheblichem Maße das dynamische Schaltverhalten der IGBTs. Die verschiedenen Kombinationen von Steuereinheiten und Leistungsschaltern lassen sich somit im Hinblick auf die Schaltverluste und Durchlassverluste charakterisieren und vergleichen.

Am Institut sind momentan zwei Prüfstände im Aufbau:

- Prüfstand 1:
max. Zwischenkreiskapazität $C_{\max} = 2320 \mu\text{F}$
max. Zwischenkreisspannung $U_{z\max} = 6 \text{ kV}$
- Prüfstand 2:
max. Zwischenkreiskapazität $C_{\max} = 1800 \mu\text{F}$
max. Zwischenkreisspannung $U_{z\max} = 10 \text{ kV}$

Durch Messungen können in Zukunft am IAL Kombinationen von Leistungsbau-elementen und Gate-Units zunächst charakterisiert und dann durch Variation der unterschiedlichen Parameter optimiert werden.

Test Bench for Characterising Power Electronic Components

by Dipl.-Ing. Harald Kuhn

Modern HV IGBT modules (HV Insulated Gate Bipolar Transistors) have a collector-emitter reverse voltage of max. 6,5 kV. When connecting several of these components in series, the blocking capability of one converter arm can considerably be increased. It must be ensured, however, that the voltage to be blocked is distributed symmetrically among the single semiconductor switches at any time, i.e. in the off-state (static) as well as during switching on and off (dynamic). For this reason, the gate unit is of high importance in all serial connections. In both cases (static and dynamic), the gate unit must be able to verify, if the voltage is distributed symmetrically, interfering, if required, to avoid the destruction of the component.

The test bench which is under development at IAL allows to examine different combinations of semiconductor switches and gate units dependent on the temperature and the switching current for the respective rated voltage. The gate units of the different manufacturers differ among others with respect to the shape of control voltage. This control voltage has a large effect on the dynamic switching behaviour of the IGBTs. In this way, the various combinations of gate units and power electronic switches can be characterised and compared considering the switching losses and forward power losses.

At the moment, our institute has two test benches under construction:

- test bench 1:
max. DC link capacity $C_{\max} = 2320 \mu\text{F}$
max. DC link voltage $U_{z\max} = 6 \text{ kV}$
- test bench 2:
max. DC link capacity $C_{\max} = 1800 \mu\text{F}$
max. DC link voltage $U_{z\max} = 10 \text{ kV}$

In future, various combinations of power electronic components and gate units can here be tested, characterised and finally optimised by modifying the different parameters.

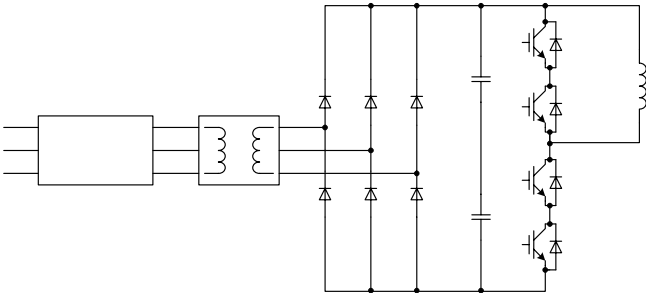


Bild 1: Topologie des Prüfstandes zur Untersuchung von IGBT-Serienschaltungen
Figure 1: Test bench topology for examination of IGBT serial connections



Bild 2: Prüfstand mit Gleichrichterdioden und Zwischenkreiskondensatoren
Figure 2: Test bench with rectifier diodes and DC link capacitors

Multilevel-Umrichter

von Dipl.-Ing. Harald Kuhn

Das Interesse an Mittelspannungs- und Hochleistungsanwendungen der Umrichtertechnologie ist in der letzten Zeit deutlich gestiegen. In Mittelspannungsanwendungen gibt es einige Methoden, das Spannungsniveau eines Umrichtersystems zu steigern. Es gibt die Möglichkeit, mehrere Halbleiterschalter in Serie zu schalten, um in Summe die gewünschte Sperrspannung zu erreichen (siehe Prüfstand zur Charakterisierung von Leistungsbau-elementen) oder aber der Einsatz von Multilevel-Umrichtern. Bei dieser Topologie liegt an den einzelnen Ventilen nur ein Teil der Zwischenkreisspannung an. Durch diese Eigenschaft ergeben sich einige Vorteile: geringere Bauteilbelastung und bessere Spannungs- und Stromqualität am Ausgang (total harmonic distortion - THD). Es ist zu erwarten, dass durch das Modulationsverfahren noch ein erheblicher Einfluss auf das Spektrum der Klemmengrößen ausgeübt werden kann.

In der Literatur findet man zahlreiche Topologien, von denen die populärsten Diode Clamped, Capacitor Clamped und die Kaskadierte H-Brücke (siehe Bild 1) sind.

Ein „low-power“ Prototyp eines kaskadierten H-Brücken Multilevel-Umrichters wurde realisiert. Die Steuer- und Regelalgorithmen können in der Simulationssoftware Matlab programmiert werden und dann sehr einfach in einen Mikrocontroller überführt werden (siehe Bild 2).

Darüber hinaus ist geplant, am IAL einen 200 kVA Umrichter aus autarken, modularen Vollbrücken zu errichten. Jede Vollbrücke besitzt einen Zwischenkreiskondensator mit ca. 600 V Zwischenkreisspannung und ist für ca. 16 kW ausgelegt. Die Energie für Treiber, Sensoren und Logik wird über einen DC/DC-Wandler aus dem Zwischenkreis bereitgestellt.

In Zukunft können somit an Kaskadierten H-Brücken Umrichtern bekannte Regelstrategien untersucht und verglichen werden. Neue Regelstrategien für diesen Typ von Multilevel-Umrichter werden dann auf Basis der gewonnenen Erfahrungen entwickelt werden.

Multilevel Converters

by Dipl.-Ing. Harald Kuhn

In recent time, the interest in MV and high-power applications in the field of converter technology has considerably increased. In MV applications, there exist several methods to rise the voltage level of a converter system. On the one hand, several semiconductor devices can be connected in series, in order to obtain the intended blocking voltage (see „Test Bench for Characterising Power Electronic Components“). On the other hand, multilevel converters can be used; in this case, only a fraction of the total DC link voltage is applied to the single valves. This has some advantages: less stress on the components and a better voltage and current quality at the output (total harmonic distortion - THD). Refining the modulation method, further improvements concerning the spectrum of the output variables seem possible.

In literature, various topologies are described; the most popular ones are diode clamped inverter, capacitor clamped inverter and the cascaded H-bridge (see figure 1).

A low-power prototype of a cascaded H-bridge multilevel converter was realized at IAL. The control algorithms can be programmed in the simulation software Matlab and then easily be implemented in a microcontroller (see figure 2).

Moreover, IAL plans to install a 200 kVA converter consisting of autonomous modular full bridges. Each full bridge has a DC link capacitor with approx. 600 V DC link voltage and is designed for approx. 16 kW. The drivers, sensors and logic components are fed by the DC link via DC/DC converter.

Using these prototypes of cascaded H-bridge converters, testing and comparing existing control strategies with one another can be carried out in near future, and new control strategies for this type of multilevel converter can be developed.

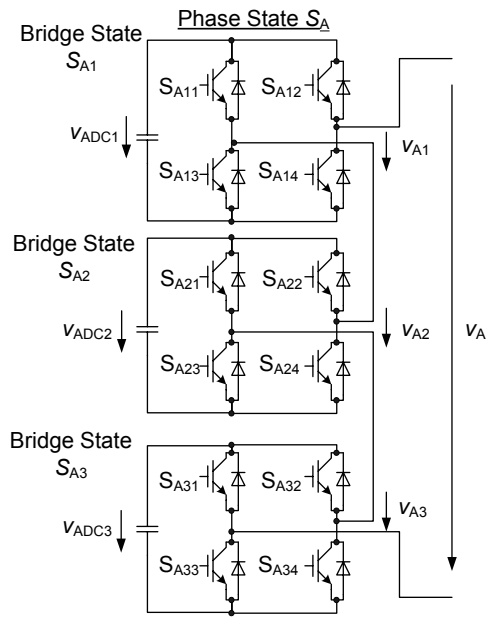


Bild 1: Topologie einer kaskadierten Multilevel-Umrichter-Phase
 Figure 1: Topology of a cascaded multilevel converter phase

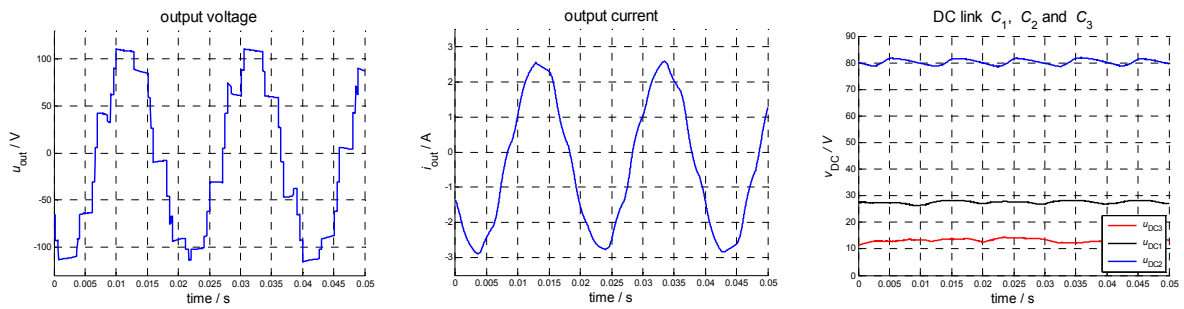


Bild 2: Messungen am low „low-power“ Prototyp mit 10 V, 30 V und 90 V Zwischenkreisspannung. Verzerrung in Ausgangsspannung entsteht im Stromnulldurchgang.
 Figure 2: Measurements at low „low-power“ prototype with 10 V, 30 V and 90 V DC link voltage. Distortion at current zero.

Lehrveranstaltungen

Die Lehrveranstaltungen des IAL wurden in den vergangenen beiden Jahren neu geordnet.

Da das Gebiet der elektrischen Maschinen nun nicht mehr von zwei Professoren vertreten wird, musste auch das Vorlesungsangebot etwas gestrafft werden. Neben den *Grundlagen der elektromagnetischen Energiewandlung*, die nach wie vor Pflichtvorlesung für Drittsemester sind, gibt es vier Vorlesungen für das Hauptstudium: *Berechnung elektrischer Maschinen* vereint Teile der bisherigen Vorlesungen *Elektrische Maschinen* und *Oberwellenverhalten von Drehfeldmaschinen*. Im Mittelpunkt stehen Maschinen- und Wicklungsentwurf sowie die Erklärung technisch wichtiger Parasitäreffekte mit Hilfe der Drehfeldtheorie. Aus den Vorlesungen *Elektrische Antriebe* und *Ausgleichsvorgänge bei elektrischen Antrieben* ist die Vorlesung *Elektrische Antriebssysteme* entstanden. Auf dem Gebiet der Kleinmaschinen werden *Elektrische Klein- und Servoantriebe* (entstanden aus *Elektrische Kleinmaschinen* und *Stellantriebe kleiner Leistung*) und *Elektronisch betriebene Kleinmaschinen* angeboten, erstgenannte auch als Lehrauftrag an der TU Braunschweig. Abgerundet wird das Angebot durch zwei Vorlesungen von Lehrbeauftragten: Prof. Huth liest über *Dynamische Regelantriebe* und Dr. Bakran über *Elektrische Bahnen*.

Die Inhalte der *Leistungselektronik I* wurden so verändert, dass sie nun die Grundlagen für die wichtigsten in der Praxis verwendeten Stromrichter vermittelt. Die *Leistungselektronik II* wurde fast völlig neu gestaltet und enthält die Grundzüge der wichtigsten Steuerverfahren für Frequenzumrichter, zudem moderne Funktionsprinzipien und Schaltungen für weitere Anwendungen der Leistungselektronik. Neu ist die Vorlesung zur *Regelung elektrischer Drehfeldmaschinen*, die den Hörer in die Lage versetzen soll, die feldorientierten Regelverfahren zu verstehen und ihre Eigenschaften einzuschätzen. Die Vorlesungen *Elektrische Antriebstechnik I* und *II*, die zunächst unverändert von Prof. Stölting übernommen wurden, werden nicht nur von Maschinenbauern im Hauptstudium, sondern nun auch von Mechatronik-Studenten im Grundstudium gehört und bedürfen daher einer Neustrukturierung im kommenden Jahr.

Bis vor zwei Jahren wurden je zwei Labore zu Maschinen und zur Leistungselektronik angeboten. Die Labore wurden dahingehend umgestal-

Lectures

All lectures at IAL were rearranged during the last two years.

As the chair of Electrical Machines is no longer represented by two professors, the number of lectures had to be tightened. Besides the *Basics of Electromagnetic Power Conversion*, which is still a compulsory lecture for third term students, there exist four lectures for the main study period: *Theory of Electrical Machines* unites parts of the former lectures *Electrical Machines* and *Effects of Spatial Harmonics in Three-phase Machines*. Here, the focus is on the design of machines and windings as well as on the explanation of technically important parasitic effects by means of the rotating field theory. The lectures *Electrical Drives* and *Transient Phenomena in Electrical Drives* were changed into the lecture *Electrical Drive Systems*. The field of small machines is covered by the lectures *Small Electrical Motors and Servo Drives* (formerly *Small Electrical Machines and Actuators*) and *Small Electronically Controlled Motors*, the latter also as a guest lecture at TU Braunschweig. The variety of lectures is completed by two guest lectures held by Prof. Huth lecturing *Dynamic Servo Drives* and by Dr. Bakran for *Electrical Traction*.

The contents of *Power Electronics I* was changed and now comprises the basics of the most current power converters used in practice. *Power Electronics II* was nearly completely redesigned and now contains the basics of the most important modulation methods for frequency converters, modern functional principles and circuits for further applications in power electronics. Moreover, we introduced a new lecture called *Control of Electrical Three-phase Machines*, enabling the students to understand field-oriented control methods and estimate their characteristics. The two lectures *Electric Drives I* and *II* were first adopted from Prof. Stölting without any changes. As they are not only frequented by mechanical engineering students during their main study period, but also by mechatronic students during their basic studies, these two lectures need to be redesigned next year.

Until two years ago, two labs were offered, one for machines and another one for power electronics. The labs were modified in a way

that the most important tests of the second parts are now comprised in one lab which is offered commonly by both chairs as a lab for drive systems dealing with converter-fed drives.

tet, dass nun die wichtigsten Versuche der zweiten Teile in einem gemeinsam von beiden Fachgebieten angebotenen Labor für Antriebssysteme zusammengefasst wurden, das sich mit stromrichter-gespeisten Antrieben beschäftigt.

Vorlesungsbezeichnung	Dozent	SS	WS	SWS
Grundlagen der elektromagnetischen Energie-wandlung	Prof. Dr.-Ing. B. Ponick		X	V2, Ü1
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
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
Elektrische Antriebstechnik II	Prof. Dr.-Ing. A. Mertens	X		V2, Ü1
Leistungselektronik II	Prof. Dr.-Ing. A. Mertens	X		V2, Ü1
Dynamische Regelantriebe	Prof. Dr.-Ing. G. Huth	X		V2
Elektrische Bahnen	Dr.-Ing. M. Bakran	X		V2
Kolloquium Elektrische Antriebssysteme und Berechnung elektrischer Maschinen	Prof. Dr.-Ing. B. Ponick Wissenschaftlicher Mitar- beiter	X	X	
Labor für Leistungselektronik	Prof. Dr.-Ing. A. Mertens Wissenschaftlicher Mitar- beiter	X	X	
Labor für Elektrische Maschinen	Prof. Dr.-Ing. B. Ponick Wissenschaftlicher Mitar- beiter	X	X	
Labor für Elektrische Antriebssysteme	Prof. Dr.-Ing. B. Ponick Prof. Dr.-Ing. A. Mertens Wissenschaftlicher Mitar- beiter	X	X	

Grundlagen der elektromagnetischen Energiewandlung

(für 3. Semester), V2, U1

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

Hörsaalübungen: Dipl.-Ing. R. Gehrking

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 Electromagnetic Power Conversion

(3rd term), V2, U1

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

Exercise: Dipl.-Ing. R. Gehrking

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: Dr.-Ing. J. Steinbrink

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

(für 5. Semester), V2, U1

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

Hörsaalübung: Dr.-Ing. J. Steinbrink

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, Görge-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 Kühlmethoden von Synchronmaschinen; Betriebsverhalten von Schenkelpolmaschinen im stationären Betrieb: Zeigerdiagramm, Ersatzschaltbild, Stromortskurve, Spannungsgleichungen, Potier-Dreiecke, Reluktanzmotoren; Unsymmetrische Belastung von Synchrongeneratoren.

Verlustarten; zusätzliche Verluste durch Oberwellen.

Elektrische Klein- und Servoantriebe

(5. bzw. 7. Semester), V2, U1

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

Übung: Dipl.-Ing. S. Demmig

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).

Elektronisch betriebene Kleinmaschinen

(für 6. bzw. 8. Semester), V2

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

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, Wal-

Small Electrical Motors and Servo Drives

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

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

Exercise: Dipl.-Ing. S. Demmig

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).

Small Electronically Controlled Motors

(6th or 8th term), V2

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

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

zen- 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

Electrical Drive Systems

(6th term), V2, U1

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

Exercise: Dipl.-Ing. R. Helmer

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,

Elektrische Antriebssysteme

(für 6. Semester), V2, U1

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

Hörsaalübung: Dipl.-Ing. R. Helmer

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). Reaktanzen 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

(Früher: Elektrische Steuer- und Antriebstechnik I)

für Mechatroniker (3. Semester) und Maschinenbauingenieure (5. Semester), V2, U1

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

Übung: Dipl.-Ing. A. Berardinelli

Inhalt

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

instantaneous value of electromagnetic torque) for simulation of transient phenomena. Simulation of mechanical shafting, influence of mechanical damping, modelling 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.

Electric Drives I

(formerly: Electric Control and Drives I) for mechatronics students (3rd term) and mechanical engineering students (5th term), V2, U1

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

Exercise: Dipl.-Ing. A. Berardinelli

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 and electronically commutated 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.

Recommended previous knowledge: Basics of Electrical Engineering.

Electric Drives II

(formerly: Electric Control and Drives II) for mechatronics students (4th term) and mechanical engineering students (6th term), V2, U1

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

Exercise: Dipl.-Ing. H. Kuhn

Contents

Transformers: basics, AC transformer, three-phase transformer (design, star, delta and zigzag connection, parallel connection of transformers), autotransformers and small transformers

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).

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

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

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.

Empfohlene Vorkenntnisse: Grundlagen der Elektrotechnik

Elektrische Antriebs-technik II

(Früher: Elektrische Steuer- und Antriebstechnik II)

für Mechatroniker (4. Semester) und Maschinenbauingenieure (6. Semester), V2, U1

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

Übung: Dipl.-Ing. H. Kuhn

Inhalt

Transformator: Grundlagen, Wechselstrom-Transformator, Drehstrom-Transformator (Aufbau, Stern-, Dreieck-, Zick-Zack-Schaltung, Parallelschalten von Transformatoren), Spar- und Kleintransformatoren.

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).

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

Leistungselektronik I

(5. Semester), V2, U1

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

Übung: Dipl.-Ing. S. Pöhler

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, Netzurückwirkungen.

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

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

Empfohlene Vorkenntnisse: Grundlagen der Elektrotechnik

Leistungselektronik II

(6. Semester), V2, U1

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

Übung: Dipl.-Ing. A. Averbeg

Inhalt

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

Schwingkreise in der Leistungselektronik:

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

Schaltnetzteile: Transformatoren, Durchflußwandler, Sperrwandler.

Power Electronics I

(5th term), V2, U1

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

Exercise: Dipl.-Ing. S. Pöhler

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. Averbeg

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

Control of Electrical Three-phase Machines

(7th or 9th term), V2

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

Contents

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
- Current control loop of a chopper
- Torque and speed control of DC machines
- Positioning control
- Dynamic model of three-phase machines
- Current control loop for voltage source inverters in a rotating coordinate system
- 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

This lecture is method-oriented and focusses on the field-oriented control of asynchronous machines, but deals also with other types of machines. The lecture "Dynamic Servo Drives" (lectureship IAL-AS) is application-oriented and offers an overview on all components and the complete system of a servo drive.

Necessary previous knowledge: Basics of

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

Empfohlene Vorkenntnisse: Grundlagen der Elektrotechnik, Leistungselektronik I

Regelung elektrischer Drehfeldmaschinen

(7. bzw. 9. Semester), V2

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

Inhalt

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

Stoffplan:

- Dynamisches Verhalten der unregulierten Gleichstrommaschine
- Stromregelkreis eines Choppers
- Drehmoment- und Drehzahlregelung der Gleichstrommaschine
- Lageregelung
- Regelungstechnisches Modell der Drehfeldmaschinen
- Stromregelkreis für Pulswechselrichter in rotierenden Koordinaten
- Prinzip der Feldorientierung
- Feldorientierte Regelung der Asynchronmaschine
- Reduzierte Modelle der Asynchronmaschine
- Regelverfahren ohne Drehzahlgeber
- Feldorientierte Regelung der Synchronmaschine

Diese Vorlesung ist methodenorientiert und legt ihren Schwerpunkt auf die feldorientierte Regelung der Asynchronmaschine, betrachtet aber auch andere Maschinentypen. Die Vorle-

sung "Dynamische Regelantriebe" (Lehrauftrag IAL-AS) ist dagegen anwendungsorientiert und bietet einen Überblick über alle Komponenten und das Gesamtsystem des Servo-Antriebs

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

Empfohlene Vorkenntnisse: Leistungselektronik I und Elektrische Antriebssysteme

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, Resolverensorik, stationäre Betriebskennlinien, feldorientierter Betrieb, Antriebsmodellierung, Dimensionierung

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, di-

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.

Electrical Traction

(6th or 8th term), V2

Lecture: Dr. M. Bakran

Contents

The lecture deals with the basics of electrical traction. 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. Basic knowledge in the field of power electronics and electric drive technology is required.

Colloquium on „Electrical Drive Systems“ and „Theory of Electrical Machines“

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.

der Permanentmagneterregung, optimale Kurzschlussbremsung.

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

Elektrische Bahnen

(6. und 8. Semester), V2

Vorlesung: Dr. M. Bakran

Inhalt

In der Vorlesung werden die Grundlagen elektrischer Bahnen 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. Als Grundlage werden Vorwissen auf den Gebieten Leistungselektronik und elektrische Antriebstechnik vorausgesetzt.

Kolloquium „Elektrische Antriebssysteme“ und „Berechnung elektrischer Maschinen“

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.

Labor „Leistungselektronik“

von Dipl.-Ing. Stefan Pöhler

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

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

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

Labor „Elektrische Maschinen“

von Dipl.-Ing. Ralf Gehrking

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

Laboratory Exercise on “Power Electronics”

by Dipl.-Ing. Stefan Pöhler

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.

Laboratory Exercise on „Electrical Machines“

by Dipl.-Ing. Ralf Gehrking

- 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“

by Dipl.-Ing. Ralf Gehrking

- 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 characteris-

- 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.

Labor „Elektrische Antriebssysteme“

von Dipl.-Ing. Ralf Gehrking

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

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

triebene 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.

tics of the drive systems.

Studien-, Diplom- und Masterarbeiten 2004/2005

Students' Theses 2004/2005

Studienarbeiten

Short Theses

Werner Möller:

Analytische Berechnung permanentmagneterregter Synchronmaschinen

Analytical Calculation of Synchronous Machines with Permanent Magnet Excitation

Benjamin Sahan:

Versuchsaufbau eines doppelt gespeisten Asynchronengenerators

Test Set-up of a Doubly-fed Induction Generator

Jan-Peter Jastrzembki:

Optimierung der Belüftung von Synchron-Servomotoren

Ventilation Optimization of Synchronous Servo Motors

Felix Klinger:

Modellierung von Stromrichtern für Systeme aus Brennstoffzellen und Mikroturbinen

Modelling of Power Converters for Fuel Cell and Micro Turbine Systems

Michel Gröninger:

FEM-Berechnungen zu einem Mikrolinearmotor mit horizontaler Flussführung

FEM Calculations for a Linear Micro Motor with Horizontal Flux Distribution

Karsten Wiedmann:

Untersuchung und Erweiterung eines Sliding-Mode-Reglers in Verbindung mit einem Schrittmotor

Examination and Expansion of a Sliding-mode Controller in Conjunction with a Stepping Motor

Sebastian Tegeler:

Untersuchungen zum Oberschwingungsgehalt der Leerlaufspannung von Synchronmaschinen

Examinations Concerning the Harmonic Content of No-load Voltage in Synchronous Machines

Diplomarbeiten

Diploma Theses

Eugen Leinweber:

Berechnung der Spannungs- und Strombeanspruchungen von Schleifringläufern beim Anlauf mit unsymmetrischem Anlasser

Calculation of Currents and Voltages of Slip-ring Induction Motors during Start-up with an Unsymmetrical Starting Resistor

Rainer Helmer:

Systemsimulation von Stromrichtermotoren

System Simulation of LCI fed Synchronous Motors

Cornelia Stübig:

Statische Kompensationsanlage für Windenergieanlagen mit Generator-/Umrichtersystem

Static Compensation System for Wind Energy Plants with Generator/Converter System

Mehdi Hambli:

Reibmomentberechnung für Wälzlager schnelllaufender Elektromaschinen

Frictional Torque Calculation for Rolling Bearings in High-speed Electrical Machines

Mark Hermes:

Inbetriebnahme eines Micro-Controllers zur experimentellen Untersuchung von Sigma-Delta-Modulationsverfahren

Commissioning of a Micro Controller for Experimental Examination of Sigma-Delta Modulation Methods

Jan Mittelstädt:

Ansteuerung und Regelung eines semi-aktiven Reibdämpfers zur Kompensation von Antriebsstrangschwingungen im KFZ

Activation and Control of a Semi-active Friction Damper for Compensating Drive Train Oscillations in Cars

Kay-Horst Dempewolf:

Dynamisches Verhalten permanenterregter Synchronmaschinen

Dynamic Behaviour of Synchronous Machines with Permanent-magnet Excitation

Masterarbeiten

Master Theses

Waleed Sakhary:

Aufbau eines Prototyp-Multilevelzweiges basierend auf H-Brücken mit unterschiedlichen Zwischenkreisspannungen

Design of a Prototype Multi-level Branch Based on H-Bridges with Different DC Link Voltages

Andreas Jungk:

Sensorlose Lageerkennung bei Elektronikmotoren in Kraftfahrzeugen

Sensorless Position Control for Electronic Motors Applied in Cars

Staff of IAL

During the last two years, there have been several changes among the staff members, above all as a result of retirements. Despite some drawbacks due to a restricted public budget, the administrative posts in our office could at least be filled again. The increased number of research associates has its origin in the fact that on the one hand, we filled all posts officially granted by the Land, and on the other hand we could successfully raise third-party funds. Besides the Collaborative Research Centre 516 "Active Micro Systems", this is also due to co-operations with partners in industry, financing all in all 4 posts. After termination of his doctorate, Dr. Jörn Steinbrink remained at IAL as a permanent staff member and took over the function of a senior engineer.

Much to our regret, we lost our long-term colleague Mr. Peter Steinhardt who died on 9th October 2005 due to serious illness. Remembering him as a modest, co-operative and hard-working colleague, we can say that we are missing him very much and will always keep him in fond remembrance.

Mitarbeiter des IAL

Auf den folgenden Seiten präsentieren sich die Mitarbeiter des IAL. In den vergangenen beiden Jahren hat es hier einige, vor allem durch Pensionierungen bedingte Veränderungen gegeben. So wurde das Sekretariat vollständig neu besetzt, trotz mancher Widrigkeiten aufgrund eines von Sparzwang geprägten öffentlichen Haushalts. Die wieder deutlich gestiegene Zahl der wissenschaftlichen Mitarbeiter geht zum einen auf die volle Besetzung der verfügbaren Landesstellen zurück, zum anderen auf die erfolgreiche Einwerbung von Drittmitteln. Hier sind neben dem Sonderforschungsbereich 516 „Aktive Mikrosysteme“ die Industriekooperationen zu nennen, aus denen insgesamt 4 Stellen finanziert werden. Herr Dr. Steinbrink bleibt nach seiner Promotion als fest angestellter Mitarbeiter bei uns und erfüllt die Funktion eines Oberingenieurs.

Schmerzlich ist der Verlust unseres lieben langjährigen Mitarbeiters Peter Steinhardt, der am 9.10.05 nach schwerer Krankheit verstorben ist. Er wird uns allen in seiner bescheidenen, hilfsbereiten und zupackenden Art in bester Erinnerung bleiben und uns sehr fehlen.



von links: Prof. Mertens, Prof. Stölting, Dr. Steinbrink, Fr. Berardinelli, Hr. Demmig, Hr. Kuhn, Hr. Gehrking, Prof. Ponick, Fr. Duensing, Hr. Pöhler, Hr. Averberg, Hr. Helmer, Prof. Seinsch, Hr. Ganesan

Mitarbeiter des IAL

Staff of IAL



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. Stöling
Elektrische Kleinmaschinen
Small Electrical Machines



Prof. Dr.-Ing. Gerhard Huth
Lehrbeauftragter
External Lecturer



Dr.-Ing. Mark Bakran
Lehrbeauftragter
External Lecturer



Dr.-Ing. Jörn Steinbrink
Oberingenieur
Senior Engineer



Dipl.-Fachübers. Petra Duensing
Verwaltung
Administration



N. Schulz-Meden
Verwaltung
Administration



Industriemeister Carsten Selke
Werkstatt
Shop Foreman



Dipl.-Ing. Andreas Averberg
wiss. Mitarbeiter
Research Associate



Dipl.-Ing. A. Berardinelli
wiss. Mitarbeiterin
Research Associate



Dipl.-Ing. Sven Demmig
wiss. Mitarbeiter
Research Associate



Dipl.-Ing. K.-H. Dempewolf
wiss. Mitarbeiter
Research Associate



M. Sc. Vijay Ganesan
wiss. Mitarbeiter
Research Associate



Dipl.-Ing. Ralf Gehrking
wiss. Mitarbeiter
Research Associate



Dipl.-Ing. Rainer Helmer
wiss. Mitarbeiter
Research Associate



Dipl.-Ing. Harald Kuhn
wiss. Mitarbeiter
Research Associate



Dipl.-Ing. Tomasz Laczynski
wiss. Mitarbeiter
Research Associate



Dipl.-Ing. Stefan Pöhler
wiss. Mitarbeiter
Research Associate



Dipl.-Ing. Niklas Rüger
wiss. Mitarbeiter
Research Associate



Dipl.-Ing. Cornelia Stübig
wiss. Mitarbeiterin
Research Associate

Universität Hannover
 Institut für Antriebssysteme
 und Leistungselektronik
 Welfengarten 1
 30167 Hannover

Phone +49(0)511-762-2514
 Fax +49(0)511-762-3040
 email info@ial.uni-hannover.de
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
 Phone 762-3770, nestler@ial.uni-hannover.de

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
 Phone 762-2214, stoelting@ial.uni-hannover.de

Lehrbeauftragte

External Lecturers

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

Dr.-Ing. Mark Bakran
 Elektrische Bahnen
 Electrical Traction

Verwaltung

Administration

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

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

Technische Angestellte

Technical Staff

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

Oberingenieur

Senior Engineer

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

Wissenschaftliche Mitarbeiter

Scientific Staff

Fachgebiet Leistungselektronik und Antriebsregelung

Power Electronics and Drive Control

Dipl.-Ing. Andreas Averberg
 Phone 762-3765, averberg@ial.uni-hannover.de

M.Sc. Vijay Anantham Ganesan
 Phone 762-3766, ganesan@ial.uni-hannover.de

Dipl.-Ing. Harald Kuhn
 Phone 762-3752, kuhn@ial.uni-hannover.de

Dipl.-Ing. Tomasz Laczynski
 Phone 762-3764, laczynski@ial.uni-hannover.de

Dipl.-Ing. Stefan Pöhler
 Phone 762-3758, poehler@ial.uni-hannover.de

Dipl.-Ing. Niklas Rüger
 Phone 762-2858, rueger@ial.uni-hannover.de

Fachgebiet Elektrische Maschinen und Antriebssysteme

Electrical Machines and Drive Systems

Dipl.-Ing. Anamaria Berardinelli
 Phone 762-2860, berardinelli@ial.uni-hannover.de

Dipl.-Ing. Sven Demmig
 Phone 762-2863, demmig@ial.uni-hannover.de

Dipl.-Ing. Kay-Horst Dempewolf
 Phone 762-2407, dempewolf@ial.uni-hannover.de

Dipl.-Ing. Ralf Gehrking
 Phone 762-5346, gehrking@ial.uni-hannover.de

Dipl.-Ing. Rainer Helmer
 Phone 762-2862, helmer@ial.uni-hannover.de

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

Chronik 2004/2005

Januar 2004

01.01.

Sven Demmig beginnt als Assistent am IAL.

21.01.

Exkursion zur Fa. ENERCON/Magdeburg

Februar 2004

19.02.

70. Geburtstag von Prof. Seinsch

März 2004

03.-04.03.

Vortrag von Anamaria Berardinelli auf der ETG/GMM-Fachtagung „Innovative Klein- und Mikroantriebe“ in Darmstadt

11.03.

Begehung des Sonderforschungsbereichs 516 „Konstruktion und Fertigung aktive Mikrosysteme“ zum 3. Bewilligungszeitraum

26.03.

Beginn des 2. Bauabschnittes der Generalsanierung der Laborflächen am IAL.

29.-30.03.

Prof. Seinsch hält zwei Vorträge auf einem Symposium der Fa. WEG in Jaragua do Sul/Brasilien.

April 2004

01.04.

Dr.-Ing. Mark Bakran übernimmt den Lehrauftrag „Elektrische Bahnen“

01.04.

Prof. Nestler hält vor dem VDE-Ausschuß „Geschichte der Elektrotechnik“ einen Vortrag über Heinrich Daniel Rühmkorffs.

07.04.

Endabnahme der 4-Quadranten-Gleichrichteranlage (110, 220, 440 V für je 200A, max. $4V_{pp}$ Spannungswelligkeit) als Ersatz der Batteriesätze im Rahmen des 2. Bauabschnittes der Generalsanierung der Laborflächen am IAL

27.04.

Prof. Cherovsky von der ČVUT Prag hält am IAL einen Vortrag über Hybridfahrzeuge.

Mai 2004

01.05.

Dienstantritt von Prof. Mertens

04.05.

Anschaffung von Leistungsverstärker der Fa. Rohrer München (3 Geräte je 10kW, Linearverstärker bis 30 kHz)

20.05.

40. Geburtstag von Prof. Ponick

26.-30.05.

Prof. Mertens nimmt am IEEE Workshop zur Zukunft der elektronischen Energiewandlung FEPPCON in Solina/Italien teil.

Juni 2004

02.06.

Grillfest

02.-05.06.

Prof. Seinsch leitet die Sitzung von IEC / TC2 / WG12 in Rosslyn VA (USA).

14.-16.06.

Actuator Konferenz im Bremen mit Veröffentlichungen von Prof. Stölting, Prof. Ponick und Jens Edler

22.06.

Exkursion zu Kählig Antriebstechnik

Juli 2004

01.07.

Für Frau Haake beginnt die Freizeitphase der Altersteilzeit.

01.07.

Thomasz Laczynski beginnt als Assistent am IAL.

07.07.

Gastvortrag von Herrn Neeser (Siemens AG) über drehzahlveränderbare Großantriebe.

08.07.

Hochschulsportfest, Teilnahme einer Mannschaft des IAL am Fußballturnier

12.07.

Exkursion im Rahmen der Vorlesung Elektrische Bahnen nach Nürnberg zu Siemens Large Drives

September 2004

14.09.

Prof. Ponick hält einen Vortrag über Mikroantriebe an der ČVUT Prag.

15.-16.09.

Prof. Seinsch hält den Vortrag „Oberschwingungsverluste in umrichter-gespeisten Motoren“ am 3. Technischen Tag der VEM-Gruppe in Wernigerode.

29.09.

Tech-Buffer (Schüler der 12. und 13. Jahrgangsstufe informieren sich über das Studium an der Universität Hannover) unter Beteiligung des IAL

Oktober 2004

11.10.

Erfahrungsaustausch zur Hochleistungselektronik mit Prof. Bernet / TU-Berlin in Berlin

19.10.

Prof. Nestler hält auf dem VDE-Kongress „Innovationen für Menschen“ einen Vortrag über abschaltbare Zweirichtungsventile.

20.10.

Prof. Ponick und Jörn Steinbrink kündigen auf dem FEMAG-Usertreffen in Bühl bei Fa. Bosch gemeinsam mit Prof. Reichert an, dass das Programm zukünftig am IAL weiterentwickelt wird.

26.10.

Inbetriebnahme einer neuen NC Fräse der Firma Kunzmann in der Werkstatt

November 2004

01.11.

Das Sekretariat wird für drei Monate durch Frau Hepperle verstärkt.

Dezember 2004

01.12.

Petra Duensing beginnt bis 30.06.05 befristet als Sekretärin am IAL.

09.12.

1. Treffen Leistungselektronik Nord mit der Universität Bremen, Universität der BW Hamburg, Universität Hannover und der Universität Kiel in Kiel

09.12.

Ende des 2. Bauabschnittes der Generalsanierung der Laborflächen am IAL mit Inbetriebnahme von sanierten Laborflächen und Aufzüge.

21.12.

Weihnachtsfeier mit aktiven Mitarbeitern und Studenten des Institutes sowie Ehemaligen

Januar 2005

12.01.

70. Geburtstag von Prof. Nestler

20.-23.01

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

25.01.

Letzter Arbeitstag von Kai Brune am IAL.

Februar 2005

01.02.

Aufnahme des Fachgebiets Antriebssysteme in das Laboratorium für Nano- und Quantenengineering.

04.02.

Antrittsvorlesung von Prof. Ponick

März 2005

01.03.

Andreas Averberg und Harald Kuhn beginnen als Assistenten am IAL.

01.-03.03.

Kolloquium „Mikrosystemtechnik“ der drei Sonderforschungsbereiche SFB440, SFB499 und SFB516 in Aachen mit Beiträgen von Sven Demmig, Ralf Gehrking und Prof. Ponick

15.03.

Rainer Helmer beginnt als Assistent am IAL.

19.-23.03.

Prof. Ponick hält Vorträge über Magnetgeräusche bei Umrichterspeisung und Wicklungsentwurf auf einem Symposium der Fa. WEG in Jaragua do Sul/Brasilien.

April 2005

01.04.

Neue Namensgebung der Fachgebiete: Elektrische Maschinen und Antriebe, Leistungselektronik und Antriebsregelung

11.-12.04.

Prof. Seinsch leitet die Sitzung der IEC / TC2 / WG12 in Helsinki.

22.04.

Prof. Seinsch leitet die Sitzung einer ad hoc WG zur Revision von IEC 60034-3 bei BSI in London.

27.04.

Prof. Seinsch wird in Frankfurt mit der erstmalig verliehenen DKE-Nadel ausgezeichnet.

29.04.

Doktorprüfung und Promotionsfeier von Götz Wiebicke.



Mai 2005

12.05.

Doktorprüfung und Promotionsfeier von Kai Brune



20.05.

Inbetriebnahme einer 1,2-kW-PEM-Brennstoffzelle als Versuchsobjekt für leistungselektronische Energieeinspeisungen.

24.05.

Treffen Leistungselektronik Nord in Hannover mit je 2 Vorträgen von wissenschaftlichen Mitarbeitern der Universitäten Kiel, Hamburg (Bundeswehr), Bremen, Magdeburg und Hannover

26.05.

Aufnahme beider Fachgebiete des IAL in das Mechatronik-Zentrum Hannover.

Juni 2005**01.06.**

Lieferung der Teststände für Leistungshalbleiter von der Siemens AG

17.06.

Ehemaligen-Treffen mit Kolloquium und geselligem Ausklang

Prof. Mertens, Prof. Ponick und Sven Demmig halten jeweils einen Vortrag über aktuelle Forschungsthemen.

**Juli 2005****01.07.**

Petra Duensing erhält einen unbefristeten Vertrag.

01.07.

Exkursion im Rahmen der Vorlesung Elektrische Bahnen nach Nürnberg zu Siemens Large Drives

06.07.

Hochschulsportfest, Teilnahme einer IAL-Mannschaft am Fußballturnier

**06.07.**

Tech-Buffer (Schüler der 12. und 13. Jahrgangsstufe informieren sich über das Studium an der Universität Hannover) unter Beteiligung des IAL.

07.07.

Gastvortrag von Herrn Neeser (Siemens AG) über drehvariable Großantriebe.

12.07.

Exkursion zur Firma Lenze (Extertal und Aenzen).

August 2005**01.08.**

Vijay Ganesan beginnt als Assistent am IAL.

31.08.

Grillfest für die am Institut beschäftigten Studenten und Assistenten.



September 2005

04.-07.09.

Ralf Gehrking nimmt mit einem Beitrag über "Transient torque impacts on turbocompressor shaftings driven by induction motors or synchronous motors" an der „International Conference on Compressors and their Systems“ in Freiburg teil.

11.-14.09.

Prof. Mertens und Mitarbeiter nehmen mit Vorträgen und Präsentationen an der 11. EPE und an der anschließenden ETG in Dresden teil.

26.-29.09.

Prof. Seinsch leitet die Sitzung des IEC / TC2 (Plenarsitzung) / MT9 und WG12 in Jaragua do Sul/Brasilien. Prof. Ponick ist Mitglied der deutschen Delegation zur TC2-Sitzung.

Oktober 2005

06.10.

Das IAL beteiligt sich am Nanoday des LNQE.

09.10.

Technischer Angestellter Peter Steinhardt verstirbt im Alter von 64 Jahren nach langer schwerer Krankheit.

10.-12.10.

Ralf Gehrking hält am Mikrosystemtechnik-Kongress in Freiburg einen Vortrag über eine elektromagnetische Führung von Mikroaktoren.

18.10.

Beginn der neuen Vorlesung „Regelung elektrischer Drehfeldmaschinen“ von Prof. Mertens.

24.-27.10.

Besuch von Prof. Marignetti, Uni Cassino/Italien, mit Gastvorträgen zu Kleinantrieben

**26.10.**

Prof. Ponick hält in der Vortragsreihe des LNQE einen Vortrag über „Mikromotoren“.

27.10.

Doktorprüfung und Promotionsfeier von Jörn Steinbrink



November 2005

01.11.

Die überarbeitete Neuauflage des Bandes „Grundlagen elektrischer Maschinen“ von Prof. Müller und Prof. Ponick erscheint.

09.11.

Trauerfeier für Peter Steinhardt in der Kapelle auf dem Ricklinger Stadtfriedhof.

11.11.

Prof. Seinsch leitet die Sitzung der IEC / TC2 / WG12 in Berlin.

11.11.

Treffen Leistungselektronik Nord in Magdeburg; Andreas Averberg und Jörn Steinbrink halten Vorträge.

17.-18.11.

Vortragsreise von Prof. Mertens zur Universität Catania/Italien

Dezember 2005**12.12.**

Dr. Götz Wiebicke, Fa. E + A, hält einen Vortrag zu schnelllaufenden Drehstromantrieben.

12.12.

Weihnachtsfeier mit allen aktiven und ehemaligen Mitarbeitern sowie den Studenten des Institutes.



Veröffentlichungen 2004/2005

Publications 2004/2005

Stölting, H.-D.; Hesselbach, J.; Becker, O.; Berardinelli, A.; Rathmann, S.:

Robuste modellbasierte Regelung von Mikro-Reluktanzmotoren
Tagungsband Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik 2004, Darmstadt, pp. 51-56, 2004

Gatzen, H.H.; Stölting, H.-D.; Ponick, B.:

Alternatives for Micro-Machined Linear Actuators
Proc. Actuator 2004, Bremen, pp. 317-320, 2004

Budde, T.; Hahn, M.; Föhse, M.; Edler, J., Stölting, H.-D.; Gatzen, H.H.:

Design, Fabrication and Characterization of a Hybrid Linear Micro Step Motor
Proc. Actuator 2004, Bremen, pp. 665-668, 2004

Edler, J.; Germer, C.; Hansen, U.; Kopp, D.; Li, J.:

Design and Simulation of essential Parts of Active Microsystems
Microsystem Technologies 10, pp. 219-222, Springer-Verlag, 2004

Nestler, J.:

Das Rühmkorff-Haus in Hannover und die Mühen um seinen Wiederaufbau
VDE-Band 21, pp. 91-105, VDE-Verlag, 2004

Nestler, J.:

Eigenschaften und Anwendungsmöglichkeiten von Stromrichtern mit abschaltbaren Zweirichterventilen
Fachtagungsberichte der ITG, ETG, Band 1, pp. 385-390, VDE-Verlag, 2004

Hahn, M.; Gehrking, R.; Ponick, B.; Gatzen, H.H.:

Auslegung aktiver Mikrosysteme
Tagungsband Kolloquium Mikroproduktion Eine Kooperation der Sonderforschungsbereiche 440, 499 und 516, 2.-3. März 2005, Aachen, Mainz Verlag, Aachen, pp.253 - S.262, 2005

Demmig, S.; Gehrking, R.; Mertens, A.; Ponick, B.:

Simulation of the magnetic and dynamical characteristics of micro linear motors
11th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), Dresden, 11.-14. September 2005

Gehrking, R.; Ruffert, C.; Demmig, S.; Gatzen, H.H.; Ponick, B.:

Entwicklung einer magnetischen Führung für Mikroaktoren
MST Kongress, Freiburg, 2005

Heimbrock, A., Seinsch, H.O.:

Neue Erkenntnisse über Oberschwingungsverluste in umrichtergespeisten Käfigläufern
e&i, Heft 7/8, pp. 274-282, 2005

Mertens, A., Ganesan, V.:

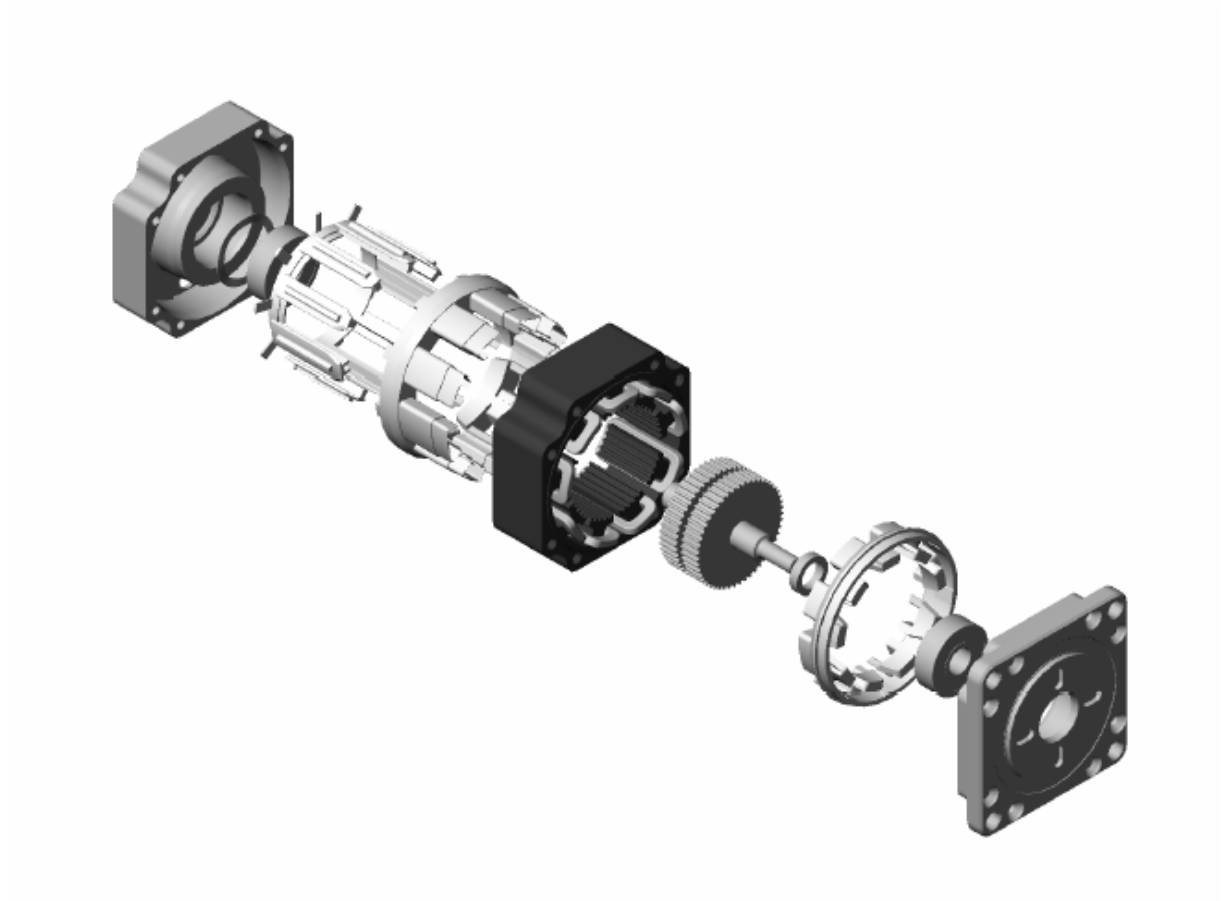
Three-phase Sigma-Delta Modulation using Zero-Sequence Components
11th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), Dresden, 11.-14. September 2005

Müller, G., Ponick, B.:

Grundlagen elektrischer Maschinen
Wiley-VCH Verlag, 2005, 680 S.

Dissertationen 2004/2005

Dissertations 2004/2005



Explosionsdarstellung eines Hybrid-Schrittmotors (Quelle: Berger-Lahr)

Exploded View of a Hybrid Stepping Motor (Source: Berger-Lahr)

Beitrag zur Lastabhängigkeit des Luftspaltfeldes der Polpaarzahl $3p$ bei Käfigläufern

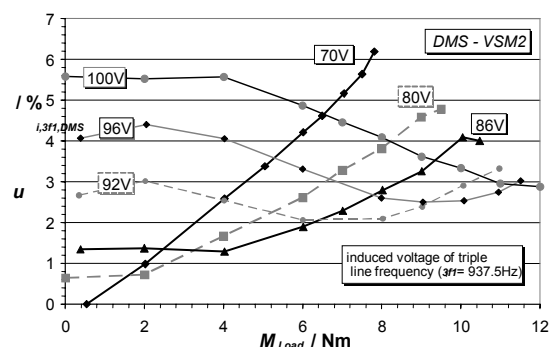
von Dipl.-Ing. Götz Wiebicke

Im Mittelpunkt der Arbeit stehen experimentelle und numerische Untersuchungen an Induktionsmotoren, die als Hauptspindelantriebe eingesetzt werden. Es wird das Ziel verfolgt, zu beweisen, dass die Amplitude des Sättigungsfeldes der Polpaarzahl $3p$ bei konstanter Strangspannung mit steigender Last zunehmen kann. Bei den experimentellen Untersuchungen wird der Schwerpunkt auf den Nachweis des Phänomens der mit steigender Last zunehmenden induzierten Spannung dreifacher Grundfrequenz gelegt. Dies gelingt für drei Versuchsmaschinen mit Hilfe von Messspulen, welche im Stator untergebracht sind. Anhand der numerischen Untersuchungen wird einerseits bewiesen, dass sich das resultierende Luftspaltfeld $3p$ aus Sättigungsfeldern und weiteren Feldern, die nicht mit $3 \cdot f_1$ im Stator induzieren, zusammensetzt. Andererseits gelingt der Nachweis, dass die in der Statorwicklung induzierte Spannung dreifacher Grundfrequenz mit steigender Last im Feldschwächbetrieb zunimmt. Es wird herausgearbeitet, dass für die richtige Erfassung der Sättigungserscheinungen im Lastbetrieb nicht nur der Grundwellenfluss sondern auch Oberwellenflüsse berücksichtigt werden müssen. Die numerischen Berechnungsmodelle sind für den Einsatz zu Industierzwecken für die Produktentwicklung optimiert. Deren Berechnungsgenauigkeit wird anhand von Messungen verifiziert.

Novelties Concerning the Air-Gap Field of $3p$ Pole Pairs in Cage Induction Machines

by Dipl.-Ing. Götz Wiebicke

This thesis deals with experimental and numerical investigations on cage induction machines, which are used as main spindle drives. It aims to prove, that the amplitude of the saturation field of $3p$ pole pairs may rise when load is increased. The experimental verification is focused on proving the phenomenon, that increasing load implies the increase of the induced voltage of triple fundamental frequency. This is successfully shown for three test machines, where search coils have been integrated into the stator. The numerical analysis demonstrates that on the one hand the resulting spatial harmonic $3p$ is based on saturation fields and other spatial harmonics, which do not induce in the stator with the frequency $3 \cdot f_1$. On the other hand, it is shown, that the induced voltage in the stator winding of triple fundamental frequency rises when load increases in field weakening operation. It is pointed out, that correctly covered saturation effects under load not only requires considering the flux of number of pole pairs p only but also the specific spatial harmonics. Numerical models have been optimised for industrial purposes of product development. Their accuracy has been verified by measurements.



Dependence on load of the voltage of triple line frequency induced in the diametral coil (DMS) at constant phase voltage U_{Strang} , $f_1 = 312.5\text{Hz}$, VSM2

Performance of Induction Machines Having Dummy Coils in the Stator Winding

by Dipl.-Ing. Kai Brune

Winding faults of stator windings are frequently localized to one coil or two adjacent coils. In this circumstance, the customer often asks for the possibility of a continuation of the operation for a limited period of time. This paper deals with the performance of machines, when in such case the damaged coils are separated from the winding path. A specific calculation scheme was developed for this purpose, starting from the air-gap field of a single coil, which covers already the reaction of the rotor winding by use of a complex damping factor. The newly developed algorithm takes into account the fundamental field and all important spatial harmonics caused by the winding. The calculation according to this paper results in the current and loss distribution throughout all branches of the winding, the rotor losses, the torque/slip characteristic, the amplitudes of the pulsating torques of twice line frequency and the magnetic pull.

The accuracy of the calculation method was thoroughly tested for a specifically designed four-pole cage induction motor, for which the leads of all 12 coil groups were accessible. The harmony between measured and computed values was found excellent for all interesting quantities. Other studies were performed for two high-voltage motors with different design attributes. The evaluation of the results demonstrated, that the admissibility of an operation with dummy coils cannot be predicted without detailed computations. Insofar the up to now practiced procedure under purely phenomenological aspects was risky. Now this paper offers a reliable tool, which represents an improvement of the state of the art.

Betriebsverhalten von Induktionsmaschinen mit fehlenden Spulen in der Ständerwicklung

von Dipl.-Ing. Kai Brune

Wicklungsfehler in Ständerwicklungen treten häufig nur in einer oder zwei benachbarten Spulen auf. In diesem Fall wird sehr häufig von den Kunden die Frage gestellt, ob nicht trotzdem ein weiterer Betrieb für eine begrenzte Zeit möglich ist. In dieser Arbeit wird das Betriebsverhalten von solchen Maschinen untersucht, in denen die beschädigten Spulen aus dem Wicklungsverband abgetrennt wurde. Für diesen Zweck wurde ein auf diese Problematik zugeschnittenes Rechenverfahren entwickelt, ausgehend von dem Luftspaltfeld einer einzigen Spule, in dem mit Hilfe des Felddämpfungsfaktors bereits die Rückwirkung der Läuferwicklung enthalten ist. In dem neu entwickelten Algorithmus werden neben dem Grundfeld auch alle wichtigen Wicklungsoberfelder berücksichtigt. Die Berechnungen in dieser Arbeit liefern die Verteilung der Ströme und der Verluste auf alle Zweige der Ständerwicklung, die Läuferverluste, die Drehmoment/Schlupf-Kennlinie, die Amplituden der Pendelmomente doppelter Netzfrequenz und den einseitig magnetischen Zug.

Das Berechnungsverfahren wurde mittels einer speziell entworfenen vierpoligen Induktionsmaschine mit Käfigläufer, deren Anschlüsse aller 12 Spulengruppen von außen zugänglich sind, überprüft. Die Übereinstimmung zwischen gerechneten und gemessenen Werten war exzellent. Für zwei Hochspannungsmotoren mit unterschiedlichen Entwurfsmerkmalen wurden weitere Untersuchungen durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten, dass man keine Vorhersagen für den Betrieb mit fehlenden Spulen treffen kann, ohne vorher detaillierte Berechnungen durchgeführt zu haben. Deshalb barg die bisherige rein phänomenologische Vorgehensweise Risiken in sich. Mit dieser Arbeit wird ein verlässliches Werkzeug geliefert, das eine Verbesserung des Stands der Technik darstellt.

Kraftwirkungen in permanentmagneterregten Maschinen

von Dr.-Ing. Jörn Steinbrink

In dieser Arbeit wird ein Verfahren zur Berechnung von Kraftwirkungen in permanentmagneterregten Maschinen vorgestellt, das die quantitative Vorausbestimmung des Rastmoments und der Rüttelkraft auf analytischem Weg mit ausreichender Genauigkeit ermöglicht und damit eine systematische Beurteilung möglicher Maßnahmen zu deren Reduzierung erlaubt. In der ausführlichen theoretischen Herleitung werden die für die Entstehung des Rastmoments entscheidenden parametrischen Felder beschrieben. Mittels konformer Abbildung wird die Luftspaltkontur erfasst und das resultierende Feldspektrum aus dem magnetischen Skalarpotential berechnet.

Die Beschreibung der Vorgänge erfolgt durch konsequente Anwendung der Drehfeldtheorie und gestattet den Blick auf die Wirkung der beeinflussenden Parameter. Somit können die Erfolgsaussichten jeder einzelnen Maßnahme qualitativ und quantitativ beurteilt werden. Die Systematik der Generierung des Rastmoments und der Rüttelkraft soll dabei dem Anwender helfen, den roten Faden zu finden. Numerische Parameterstudien können auf ein Minimum beschränkt werden. Für eine exakte quantitative Berechnung des Rastmoments empfiehlt es sich aber, die analytische mit einer numerischen Berechnung zu flankieren.

Das Berechnungsverfahren wurde anhand von Messungen an mehreren Versuchsmaschinen geprüft, welche die theoretisch gewonnenen Resultate bestätigten. Dem Einfluss von Fertigungstoleranzen wird besondere Aufmerksamkeit geschenkt, weil diese bei den bevorzugten Ausführungen mit theoretisch geringer Rastmomentanregung einen dominierenden Einfluss auf das tatsächlich entstehende Rastmoment haben, was eindrucksvoll in dem Beispiel mit der Polpaarzahl 4 gezeigt ist. Die Auswirkungen von Fertigungstoleranzen dieser sensiblen Konfiguration sieht man in der vergleichenden Darstellung von Rechnung und Messung.

Electromagnetic Forces Acting in Motors with Permanent Magnets

by Dr.-Ing. Jörn Steinbrink

This thesis presents an analytical method how to calculate electromagnetic forces acting in brushless motors excited by permanent magnets. The cogging torques and the oscillating forces in radial direction can be determined with sufficient exactness. Moreover the newly developed method opens the possibility to evaluate appropriate measures to reduce these forces. The theoretical part describes the root causes for the generation of the cogging torque and its main influence factors. The spatial harmonics of the flux density in the air gap are calculated by use of the conformal mapping of the air gap geometry from the magnetic scalar potential.

The analytical method is based on the rotating field theory. The flux density, the electric loading and the air gap permeance are considered as infinite sums of Fourier series. Each spatial harmonic is characterized by its amplitude, number of poles, frequency and phase angle. The interaction of two different spatial harmonics opens the possibility to recognize the generation of cogging torques and oscillating forces systematically and to assess counter measures how to minimize undesirable effects. Thus time consuming numerical studies by FE method can be avoided, or at least its number can be reduced. Nevertheless, when an exact determination of the cogging torque amplitude is requested, the analytical calculation should be accompanied by a numerical computation.

The validity of the analytical calculation method was verified by experimental investigations in several test motors. Special attention was paid to the influence of manufacturing tolerances which play the dominant role for the generation of cogging torques in motors with design that is already optimised in order to achieve small cogging torques. This is impressively shown by the example of the pole pair number 4. The influence of manufacturing tolerances on this sensitive configuration can clearly be seen, when comparing the results obtained analytically and by experimental investigations.

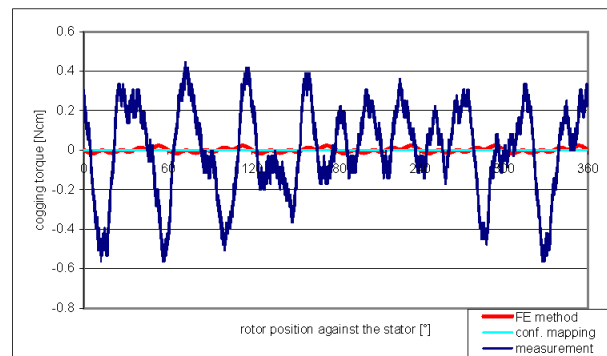
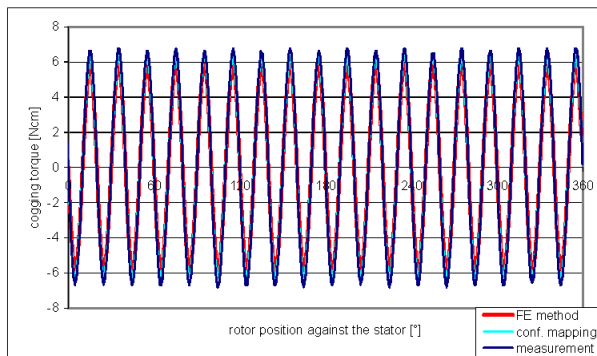
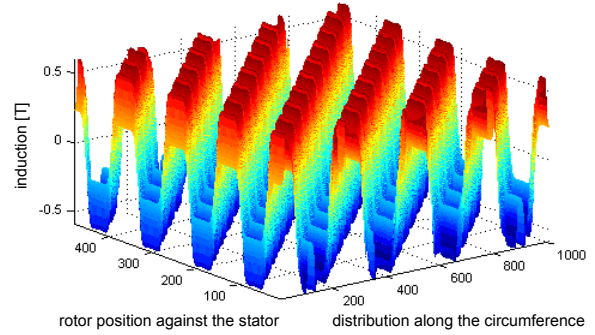
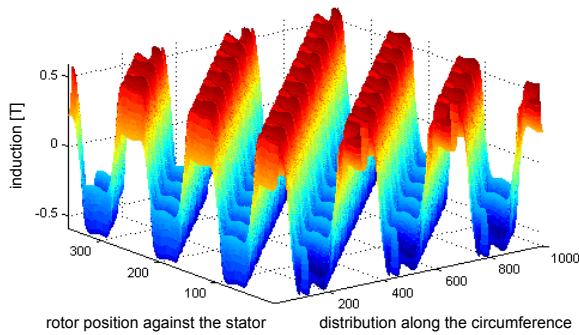
Bsp: Feldverteilungen und Rastmomentverläufe einer PM-Synchronmaschine im Leerlauf
 Ex.: Field distributions and cogging torque characteristics of a PM synchronous machine without load

(d.h. keine Statorbestromung) mit $b_N=2,5$ mm; $\delta=0,3$ mm; $h_{PM}=1,4$ mm; $R_1=12,5$ mm; $N_1=9$

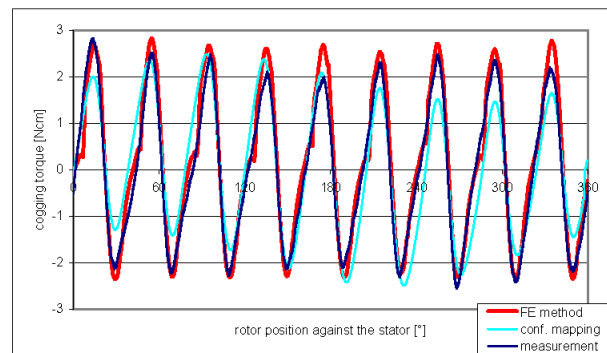
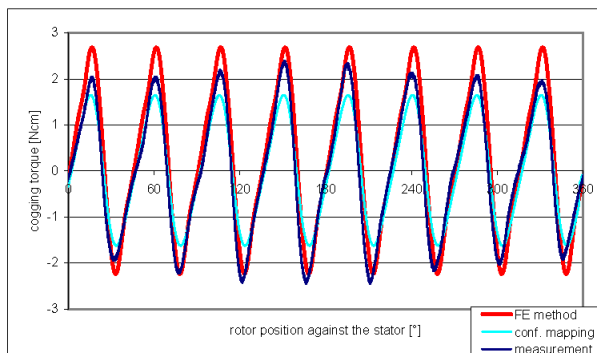
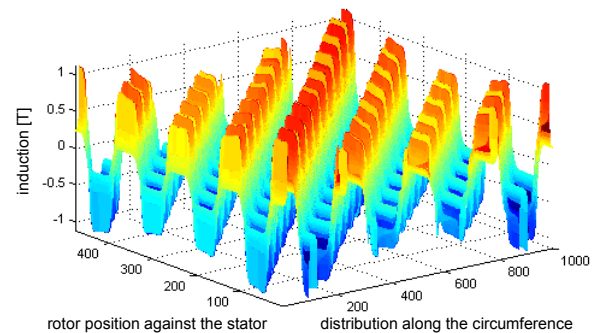
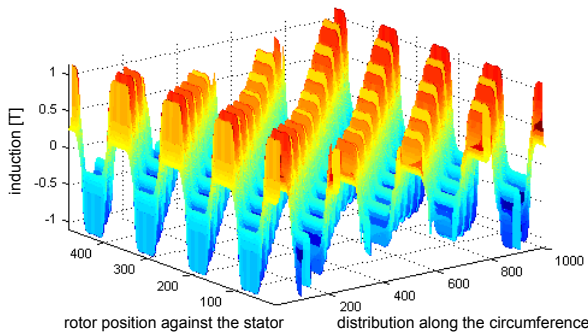
(i.e. no stator supply) with $b_N=2,5$ mm; $\delta=0,3$ mm; $h_{PM}=1,4$ mm; $R_1=12,5$ mm; $N_1=9$

$p=3$ (zentratisch) (centric)

$p=4$ (zentratisch) (centric)



$p=4$ (270 μ m statisch exzentrisch)(270 μ m statically eccentric) $p=4$ (270 μ m dynamisch exzentrisch)(270 μ m dynamically eccentric)



Anschrift:

Institut für Antriebssysteme und Leistungselektronik
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
Homepage: www.ial.uni-hannover.de

