Fachgebiet Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik

Department of Power Electronics and Electrical Drives





Fachgebiet Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik

Department of Power Electronics and Electrical Drives

Warburger Straße 100 D-33098 Paderborn

wwwlea.upb.de







INHALTSVERZEICHNIS CONTENTS

Vorwort Preface
Personal Staff
Forschungsschwerpunkte Main research
Regelung von PM-Synchronmaschinen Control of PM Synchronous Machines12
Linearantriebstechnik Linear Drives
Elektronische Stromversorgungen Switched-Mode Power Supplies
Piezoelektrische Antriebssysteme Piezo-Electric Drives
FPGA-basierte Motorregelung FPGA-Based Motor Control
Entwurf und Betrieb hybridelektrischer Fahrzeugantriebe Design and Control of Hybrid Electric Vehicles
Energiemanagement für ein hybrides Energiespeichersystem Energy Management for a Hybrid Energy Storage System
Labor Laboratory
Lehrveranstaltungen Courses
Kooperationen Cooperations

Vorwort

von Prof. Dr.-Ing. Joachim Böcker

Das Gebiet der Leistungselektronik und der elektrischen Antriebstechnik - innerhalb der Elektrotechnik der klassischen Energietechnik zuzurechnen - ist heute aktueller denn je und erfreut sich stärkster Nachfrage:

Die Bewegungssteuerung mittels **elektrischer Antriebstechnik** hat alle Lebensbereiche durchdrungen. Sie bleibt oft unbemerkt oder wird vom Nutzer als selbstverständlich hingenommen; veränderliche Drehzahlen sind heute selbst für Haushaltsgeräte Stand der Technik. Anspruchsvollere elektrische Antriebe finden sich in Aufzügen, Papiermaschinen, Walzwerken oder Bahnfahrzeugen, um nur wenige Beispiele zu nennen. Insgesamt 65% der in Deutschland erzeugten elektrischen Energie werden letztlich mittels elektrischer Antriebe genutzt. Auch in mobilen Systemen wie Schiffen und Straßenfahrzeugen gewinnen elektrische Antriebe immer größere Aufmerksamkeit. Die Zeit scheint reif für reine Elektro-Straßenfahrzeuge.

Die Leistungselektronik ist nicht nur unverzichtbarer Bestandteil steuerbarer elektrischer Antriebe, sondern stellt mittlerweile auch in der effizienten Erzeugung, Verteilung und Nutzung elektrischer Energie eine technologische Schlüsselkomponente dar: Die Netzanbindung erneuerbarer Energieguellen wie Windkraft oder Photovoltaik ist ohne Leistungselektronik kaum vorstellbar. Die frequenzvariable Umformung elektrischer Energie wie bei der Speisung des Bahnnetzes wird nicht mehr mit rotierenden Maschinensätzen, sondern mit leistungselektronischen Mitteln bewerkstelligt. Neue Impulse gehen von der Energieversorgung informationstechnischer Anlagen wie Serverfarmen aus, wo elektronische Stromversorgungen mit höchsten Wirkungsgraden in kleinsten Volumina gefordert werden. Nach Schätzungen könnten in wenigen Jahren bis zu 80% der erzeugten elektrischen Energie auf ihrem Weg zwischen Erzeuger und Verbraucher über eine oder sogar mehrere leistungselektronische Stufen umgeformt werden.

Preface by Prof. Dr.-Ing. Joachim Böcker

The field of power electronics and electrical drives, which is assigned to be part of the classic power engineering, is more up-to-date than ever before and there is also a strong demand for it.

The motion control by **electrical drives** affects all areas of life. Often, this happens unnoticeably and automatically and is taken for granted by the users. Variable speed drives are state of the art even for home appliances. More sophisticated drives can be found in elevators, paper and steel mills, or rail vehicles, to name just a few examples. In total, 65% of the electric energy produced in Germany is used by electrical drives in the end. Furthermore, electrical drives become more and more important in mobile systems such as ships and road vehicles. It seems that the time is even ripe for pure electric vehicles.

Power electronics is not only an essential element of controllable electrical drives, but is by now also a technological key component in the efficient generation, distribution and use of electrical energy. The grid connection of renewable energy sources such as wind power or photovoltaics is hardly imaginable without power electronics. Variable frequency conversion of electric energy as required e.g. for powering the railway grid is no longer performed with rotating machines, but with power electronic means. New impetus is given by IT systems like server farms, where electronic power supplies of highest efficiency and smallest size are demanded. It is estimated that in a few years up to 80% of the total electric energy will be converted by one or even several power electronic stages on their way between generator and user.

4

VORWORT PREFACE

Leistungselektronik und elektrische Antriebstechnik gehören daher zu den Schlüsseltechnologien einer modernen Industriegesellschaft. In diesem Spektrum ist das Fachgebiet Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik relativ breit aufgestellt. Die vorliegende Broschüre soll einige wichtige Schwerpunkte unserer Arbeit exemplarisch darstellen und einen Eindruck über Programm und Leistung des Fachgebiets vermitteln.

Paderborn, im November 2009

Thus, power electronics and electrical drives are key technologies of a modern industrialised society. In this context, the institute's spectrum is relatively broad. This brochure is supposed to illustrate exemplarily some of the focal points of our work and also to give an impression of the institute's programme and achievements.

Paderborn, November 2009

autonomer Verkehr Zentrale Energieerzeugung MGÜ Kurzkupplung Fremdnetz 1GW = ന -i+ - / 50-600 MW 380kV 220kV 100-500 kV 10-30 kW 5 MW Diesel-elektrische ische 20-100 MW Elektrofahrzeuge oß-Kraftwerke 0,1-3 GW Di che Bahnantriebe Schiffsantriebe Fremdnetz/ 5GW 15kV ന Netzknoten Hochspannungs- \mathcal{O} trom-Übe Gle tragung 4-10 MW Große Industriewerke Drehstrom hore M Bahnantrieb Wind-Farmen G SC/ AF Energieverteilung Wasserkraft Ø SC/ AF Ø Schienenverkehr 1GW Netzkupplungs-Umrichte A 110k\ \mathcal{O} Pumpspeicher 50Hz 16,7H ~ 110kV \downarrow 7. Kleine Industriewerke 20 - 100 MVA Dezentrale SC/ AF 8 Energieerzeugung m 0,7kV 10-30kV - 100 kW ittlungsstelle <u>(</u>) 0 ന m Kraft-Wärme-Kopplung 0 Carlo and a second 5 - 20 kW 400 V G Œ Beleuchtung Automatisierung 0.5 – 5MW Haushaltsgeräte Transport Elektronik \mathcal{O} 2 kW $\frac{1}{2}$ 100 - 500 W Sola ~ 30 MW ~ 100 kW 1 - 50 kW Private 10 V Energieerzeugung 30 - 200 W kW. (H_2) Brennstoffzelle ~ 10 kW 10 kV ~ 1 W ΖZ Sola

Leistungselektronik und elektrische Antriebstechnik in der Energie-Erzeugung, -Verteilung und -Nutzung Power electronics and electrical drives in energy generation, distribution and utilization



Leitung Executive board

Prof. Dr.-Ing. Joachim Böcker



Joachim Böcker studierte Elektrotechnik an der TU Berlin. Im Anschluss arbeitete er als Assistent am Institut für Mechanik der TU Berlin, wo er 1987 mit einer Arbeit über dissipative Systeme promovierte. 1988 trat er in das damalige AEG Forschungsinstitut in Berlin ein, welches später in die Daimler Konzernforschung integriert wurde. Im dortigen Labor für Antriebstechnik und Leistungselektronik leitete er die Gruppe Regelungstechnik. Forschungsprojekte betrafen hochdynamische Industrieantriebe, Stromrichter und Antriebe für Bahnen, später elektrische Antriebe für Straßenfahrzeuge. In den Jahren 1997 bis 2000 hielt er darüber hinaus als Lehrbeauftragter Vorlesungen zur Regelungstechnik an der TU Berlin, von 2001 bis 2003 an der Technischen Fachhochschule Berlin zur Elektronik. Im Jahr 2001 gründete Herr Böcker sein eigenes Ingenieurbüro böcker engineering und bearbeitete u. a. Projekte zur Spurführung von Schienenfahrzeugen, Regelung für Permanentmagnet-Synchronmotoren und Regelung für Windkraftanlagen. 2003 erhielt er den Ruf an die Universität Paderborn und leitet seitdem das Fachgebiet Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik. Herr Böcker ist senior member im IEEE, Mitglied im VDE, Gesellschafter der Railcab Development GmbH und stellvertretender Prodekan des Instituts für Elektrotechnik und Informationstechnik der Universität Paderborn.

Joachim Böcker studied electrical engineering at the Berlin University of Technology. Following, he was an assistant lecturer at the Institute of Mechanics of the same university, where he finished his doctorate thesis on dissipative systems in 1987. In 1988, he joined the AEG research institute in Berlin, which became part of the Daimler Corporate Research later. Within the laboratory of drive systems and power electronics he headed the control engineering group. Research focuses were high-dynamic industrial drives, converters and drives for rail systems, later electrical drives for automotive. From 1997 to 2000, he concurrently lectured control engineering at the Berlin University of Technology, then, from 2001 to 2003, electronics at the Technical University of Applied Science, Berlin. In 2001, he started up his own engineering business "böcker engineering", where he dealt with active steering of rail vehicles, control of permanent magnet synchronous motors, and wind generator control. In 2003, he was appointed as full professor at the Paderborn University, Germany, where he is head of the department of Power Electronics and Electrical Drives. Prof. Böcker is senior member of the IEEE, member of the VDE, share holder of the Railcab Development GmbH, and deputy vice dean of the Institute of Electrical Engineering and Information Technology of the Paderborn University.

Leitung Executive board

Dr.-Ing. Norbert Fröhleke



Dr.-Ing. Norbert Fröhleke, Jahrgang 1951, ist seit 1984 im Fachgebiet für Leistungselektronik und elektrische Antriebstechnik an der Universität Paderborn beschäftigt. Nach dem Studium der Elektrotechnik/Elektronik an der Universität Paderborn von 1971 - 1975, einer Industrie- und Ausbildungstätigkeit und einem Zusatzstudium von 1979 - 1984 promovierte er zum Dr.-Ing. an der Universität Paderborn 1991. Seitdem folgte eine Forschungs-, Lehr-, Akquisitionsund Koordinationstätigkeit als Oberingenieur bzw. Oberrat am o.g. Lehrstuhl hauptsächlich im Bereich Leistungselektronik. Sein Forschungsinteresse gilt der Analyse, Modellbildung, dem Entwurf und der Regelung elektronischer Stromversorgungen für verschiedene Anwendungen, der Speisung piezoelektrischer Aktoren und ihrer modellgestützten Regelung, sowie der Modellbildung und dem Entwurf magnetischer Bauteile.

Dr.-Ing. Norbert Fröhleke, born in 1951, has been working in the Department of Power Electronics and Electrical Drives at the University of Paderborn since 1984. After studying electrical engineering at the University of Paderborn (1979-1984) and a further qualification and additional studies (1979-1984), he obtained his doctorate at the University of Paderborn in 1991. Since then he has been working as senior engineer, or senior councillor respectively, focusing on research, lecturing, acquisition and coordination mainly in the field of power electronics. His research interest centers on analysis, modelling, the development and control of electronic power supplies for various applications, the feeding of piezoelectric actuators and their model-based control, as well as the modelling and the development of magnetic components.

7

Emeritus Emeritus

Prof. Dr.-Ing. Horst Grotstollen



Horst Grotstollen studierte an der Staatlichen Ingenieurschule Duisburg und der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen. Danach war er in der Zeit von 1965 bis 1973 bei der AEG in Frankfurt tätig. Hier entwickelte er zunächst im Forschungsinstitut elektrische Servoantriebe, dann bearbeitete er im Fachgebiet Industrieausrüstungen vielfältige antriebstechnische Probleme. Während dieser Zeit, 1972, erwarb er an der Technischen Universität Berlin den Doktortitel. Von 1973 bis 1981 war er anschließend als Oberingenieur am Institut für Elektrische Antriebe und Steuerungen der Universität Erlangen-Nürnberg tätig, wo er Lehrveranstaltungen über elektrische Maschinen und Stromrichter abhielt. An dieser Universität habilitierte er 1982 mit einer Arbeit über die Einführung der Drehstromtechnik bei elektrischen Servoantrieben. Von 1981 bis zu seiner Pensionierung im Jahr 2003 war er schließlich Professor für Leistungselektronik und elektrische Antriebstechnik an der Universität Paderborn. Seine Forschungsschwerpunkte lagen bei der digitalen Regelung von elektrischen Antrieben, bei piezoelektrischen Aktorsystemen sowie bei elektronischen Stromversorgungen und den dabei eingesetzten magnetischen Bauteilen.

Horst Grotstollen studied at the state engineering school of Duisburg (Staatliche Ingenieurschule Duisburg) and at the North Rhine-Westphalian Technical University of Aachen (Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen) in Germany. He joined AEG in 1965 and until 1973 he was developing electrical servo drives in the Frankfurt Research Center and investigating drive problems in the Department of Industrial Equipment. During this time, in 1972, he received a doctor's degree in electrical engineering from the Berlin University of Technology (Technische Universität Berlin). From 1973 until 1981 he was Chief Engineer of the Chair of Electrical Drives and Control at the University of Erlangen Nuremberg where he was lecturing on electrical machines and power electronics. At this university he habilitated in 1982 with a thesis on introduction of AC techniques for servo drives. From 1981 until his retirement in 2003 he was professor of power electronics and electrical drives at the University of Paderborn. His research interest was based on digital control of AC drives, piezoelectric actuator systems and switched-mode power supplies and their magnetic components.





Technische Mitarbeiter und Sekretariat Technical staff and office



Dipl.-Ing Helmut Foth

Laboringenieur Laboratory engineer Mitarbeiter seit: 1995

Norbert Sielemann



Hans Josef Glunz

Elektromeister Electrical engineering master technician Mitarbeiter seit: 1990



Elektrotechniker Electrical engineering technician Mitarbeiter seit: 1985



Gabriela Rittner

Verwaltung Administration Mitarbeiter seit: 2003



Mitarbeiter des Fachgebiets Staff of the department



Wissenschaftliche Mitarbeiter Scientific staff



M.Sc. Ayman Ahmed

Studium der Elektrotechnik (U Aswan in Egypt) Studies in electrical engineering Stromrichter Switched-mode Power Conversion Stipendiat seit 2008



Dipl.-Ing. Heiko Figge

Studium der Elektrotechnik (U Paderborn) Studies in electrical engineering Elektronische Stromversorgungen Switched-mode power supplies Mitarbeiter seit 2007



Dipl.-Ing. Zhiyu Cao

Studium der Elektrotechnik (Ruhr-U Bochum) Studies in electrical engineering Stromversorgungen für Hochspannungstestsysteme und DC-Netzgeräte Power supplies for high-voltage test systems and DC-sources Mitarbeiter seit 2007



Dipl.-Ing. Tobias Grote

Studium der Elektrotechnik (U Paderborn) Studies in electrical engineering Digitale Regelung elektronischer Stromversorgungen Digital control of switched-mode power supplies Mitarbeiter seit 2006



Dipl.-Ing. Christian Henke

Studium der Elektrotechnik (U Paderborn) Studies in electrical engineering Regelung autonomer Schienenfahrzeuge mit Linearmotor Control of autonomous railway vehicles with linear drives Mitarbeiter von 2004 bis 2009



Dipl.-Ing. Tobias Huber

Studium der Elektro- und Informationstechnik (U Karlsruhe) Studies in electrical engineering and information technology Regelung von PM Synchronmotoren Control of PM synchronous motors Mitarbeiter seit 2009



M.Sc. Rongyuan Li

Studium der Elektrotechnik (U Beihang) Studies in electrical engineering Piezoelektrische Aktoren Piezo electric actuators Mitarbeiter von 2002 bis 2008



M.Sc. Shashidhar Mathapati

Studium der Elektrotechnik (IISc Bangalore in India) Studies in electrical engineering Regelung von Asynchronmaschinen Control of induction machines Mitarbeiter seit 2005



M.Sc. Manli Hu

Studium der Elektrotechnik (U Beihang) Studies in electrical engineering Modellierung und Regelung elektronischer Stromversorgungen Modeling and control of power supplies Mitarbeiterin seit 2009



Dipl.-Ing. Tobias Knoke

Studium der Elektrotechnik (U Paderborn) Studies in electrical engineering Optimaler Entwurf und Betrieb hybrider Fahrzeugantriebe Hybrid drives Mitarbeiter von 2004 bis 2008

Dipl.-Ing. Michael Lönneker

Studium der Elektrotechnik (U Paderborn) Studies in electrical engineering Piezoelektrisches Bremssystem und Direktstromumrichter Power electronics Mitarbeiter seit 2006

Dipl.-Ing. Michael Meyer

Studium der Elektrotechnik (U Paderborn) Studies in electrical engineering Regelung von PM Synchronmaschinen Control of PM synchronous machines Mitarbeiter von 2003 bis 2008



PERSONAL STAFF

Wissenschaftliche Mitarbeiter Scientific staff



Dipl.-Ing. Wilhelm Peters

Studium der Elektrotechnik (U Paderborn) Studies in electrical engineering Regelung von PM Synchronmaschinen Control of PM synchronous machines Mitarbeiter seit 2008



Dipl.-Ing. Daniel Pohlenz

Studium der Elektrotechnik (TU Ilmenau) Studies in electrical engineering Systemoptimierung Fahrantrieb System optimisation traction drive Mitarbeiter seit 2007



Dipl.-Phys. Philipp Rekers

Studium Physik (U Münster) Studies in physics Magnetische Bauteile, Hochspannungstestsysteme Magnetic components and high voltage test systems Mitarbeiter seit 2009



Dipl.-Ing. Tobias Schneider

Studium der Elektrotechnik (U Paderborn) Studies in electrical engineering Regelung von Drehstrom –und Reluktanzmotoren Control of three phase current and switched reluctance drives Mitarbeiter seit 2005



Dipl.-Ing. Christoph Romaus

Studium der Elektrotechnik (RWTH Aachen) Studies in electrical engineering Energiemanagement für ein hybrides Energiespeichersystem Energy management for a hybrid energy storage system Mitarbeiter seit 2005



Dipl.-Ing. Bernd Schulz

Studium der Elektrotechnik (U Paderborn) Studies in electrical engineering Drehstromantriebe Three phase current drives Mitarbeiter von 2002 bis 2008



Dipl.-Ing. Andreas Specht

Studium der Elektrotechnik (TU Dresden) Studies in electrical engineering Verlustoptimale Regelung von Drehstrommaschinen Control of PM synchronous machines Mitarbeiter seit 2007



Dipl.-Ing. Hermann Wetzel

Studium der Elektrotechnik (U Paderborn) Studies in electrical engineering Piezoelektrische Aktoren Piezo electric actuators Mitarbeiter von 2001 bis 2008



Regelung von PM-Synchronmaschinen von Dipl.-Ing. Andreas Specht

In der Automobilindustrie werden zunehmend elektrische Maschinen im Antriebsstrang von Fahrzeugen eingesetzt, sei es als Starter/Generator, in Hybrid- oder rein elektrisch betriebenen Fahrzeugen. Der hohe Wirkungsgrad, die Möglichkeit Bremsleistung zu rekuperieren, sowie die hohe Drehmomentverfügbarkeit speziell bei kleinen Drehzahlen sind dafür wesentliche Gründe. Elektrische Fahrantriebe weisen eine hohe Drehzahlspreizung auf. Um eine möglichst hohe Leistungsdichte zu erhalten werden sie so ausgelegt, dass sie größtenteils im Konstantleistungsbereich und damit in der Flussschwächung betrieben werden.

Aufgrund ihrer hohen Leistungsdichte und ihres sehr guten Wirkungsgrades werden heute Permanentmagnet-Synchronmaschinen (PMSM) als Fahrantriebe favorisiert. PMSM mit im Rotor eingelassenen oder vergrabenen Magneten besitzen dabei eine noch höhere Leistungsdichte als solche mit aufgeklebten Magneten, welche im industriellen Bereich bislang Standard sind. Diese Eigenschaften werden durch stark asymmetrische Reluktanzen erkauft. Die Regelung wird dementsprechend aufwändiger. Das Fachgebiet beschäftigt sich mit dem wirkungsgrad-optimalen Betrieb dieses Maschinentyps im Spannungs- sowie im Flussschwächbereich.



Bild 1: Prinzipskizze eines PMSM mit eingebetteten Magneten

Fig. 1: Draft of a PMSM with embedded magnets

Wirkungsgradoptimaler Betrieb

Die asymmetrische Reluktanz führt dazu, dass die



Control of PM Synchronous Machines by Dipl.-Ing. Andreas Specht

In the automotive industry electrical machines are increasingly used within the drive train of vehicles as starter/generator, either in hybrid or purely electrically driven vehicles. The major reasons for that are the high efficiency, the possibility to recuperate brake power, as well as the high maximum torque especially at low speed. Electrical drives offer a wide speed range. In order to maximize power density they are designed to operate mainly in the area of constant power and therefore in the flux weakening area.

Permanent magnet synchronous machines (PMSM) are preferred as drives today because of their high power density and very high efficiency. PMSMs with embedded or buried magnets have a higher power density than those with surface-mounted magnets, which represent the industrial standards so far. These characteristics are paid by strongly asymmetric reluctances. Thus the control becomes more complex. The department deals with operation at optimal efficiency of this type of machine in the armature control area and flux weakening area.

Operation at Optimal Efficiency

From the asymmetric reluctance follows that the inductance aligned with the flux (d-axis) is only about one third of the quadrature inductance (q-axis). The torque of PMSM with asymmetrical inductances is determined according to

$$T = \frac{3}{2}n_p(\psi_p i_q + (L_d - L_q)i_d i_q)$$

The first addend of the equation describes the torque contribution by the permanent flux ψ_P and current component i_q which is orthogonal to the flux. This main torque is equivalent to that of machines with surface-mounted magnets and symmetrical inductances. The second addend that contributes to torque is the reluctance torque. It is generated by asymmetric reluctances ($L_d < L_q$) and is proportional to the product of the two current components. Hence the obtained system is highly non-linear. The separation of the flux and torque generating current components as in the industrial standard PMSMs or induction machines does not

Induktivität in Richtung des Permanentmagnetflusses (*d*-Richtung entspr. Bild 1) nur etwa ein Drittel der Induktivität quer dazu (*q*-Richtung) beträgt. Das Drehmoment von PMSM mit asymmetrischen Induktivitäten bestimmt sich nach

$$T = \frac{3}{2}n_p(\psi_p i_q + (L_d - L_q)i_d i_q) \,.$$

Der erste Summand der Gleichung beschreibt die Drehmomentbildung durch den Permanentfluss ψ_P und der zum Fluss orthogonalen Stromkomponente *i_q*. Dieses Hauptdrehmoment entspricht demjenigen von Motoren mit aufgeklebten Magneten und symmetrischen Induktivitäten. Der zweite zum Drehmoment beitragende Summand ist das Reluktanzdrehmoment. Er wird durch die asymmetrische Reluktanz ($L_d < L_a$) hervorgerufen und ist proportional zum Produkt der beiden Stromkomponenten. Man hat es somit mit einem nichtlinearen System zu tun. Die Trennung zwischen fluss- und drehmomentbildenden Stromkomponenten wie bei Standard-Industrie-PMSM oder Asynchronmaschinen ist nicht mehr gegeben. Die bekannte feldorientierte, kaskadierte Regelungsstruktur mit Fluss- und Drehmomentregler sowie unterlagerten Stromregelkreisen für die d-, und q-Ströme stößt hier an ihre Grenze. Zu beachten ist außerdem, dass selbst die obige Drehmomentgleichung die Realität nur unvollkommen beschreibt.

Ein Ansatz zur Regelung dieses Maschinentyps ist daher der Einsatz von Kennfeldern. Hierzu wird der Antrieb zunächst ausgemessen: Für ein Raster von i_{d^-} und i_q -Werten, welches den gesamten Arbeitsbereich des Antriebs abdeckt, werden im stationären Betrieb die sich einstellenden Drehmomente und Spannungen gemessen. Aus den Messdaten werden sodann Kennfelder generiert, die für alle Arbeitspunkte (T,ω) verlustminimale (d.h. in diesem Fall strombetragsminimale) Sollwerte für die d-, und q-Ströme liefern (s. Bild 2).

Die in Bild 2 eingezeichnete dunkelgrüne Linie kennzeichnet die Arbeitspunkte des maximalen Drehmomentes mit minimalem Strom im Ankerstellbereich. Ihr Schnittpunkt mit dem Kreis maximalen Stroms ist der Punkt maximalen Drehmoments und stellt häufig den Nennarbeitspunkt der Maschine dar. Vernachlässigt man die ohmschen Spannungsabfälle in der Maschine, lässt sich der mit einer bestimmten Speisespannung erreichbare exist anymore. The well-known field-oriented cascaded control structure with a flux and torque controller as well as subordinate controllers for *d*- and *q*-currents reaches its limit. It must also be pointed out that even the torque equation above describes the reality in an imperfect way.

Therefore, one approach for control of this type of machine is the use of look-up tables (LUT). For this purpose, first of all, the drive is calibrated: the resulting torques and voltages are measured at steady state for a given grid of i_d -and i_q -values which covers the whole operating range of the drive. Then, with the help of the measuring data, LUTs are produced which provide nominal values (T,ω) with minimal losses (i.e. in this case characterized by a minimal current amplitude) for the *d*-and *q*-currents for all operating points (see Fig. 2).

The dark green line marked in Fig. 2 indicates the operating points of maximal torque with minimal current magnitude in the armature control area. The point of intersection with the circle of maximal current magnitude is the point of maximal torque and often represents the rated operating point of the machine. Neglecting the ohmic voltage drops in the machine, the flux achievable with a certain







around the short-circuit current $i_k = \psi_p / L_d$. If the available voltage is not sufficient to generate the optimal (i.e. minimal current amplitude) flux in the machine for the requested torque, the green line



REGELUNG VON PM-SYNCHRONMASCHINEN CONTROL OF PM SYNCHRONOUS MACHINES

Fluss als Ellipse um den Kurzschlussstrom $i_k = \varphi_p / L_d$ darstellen. Reicht die zur Verfügung stehende Spannung nicht aus, um für das gewünschte Drehmoment den optimalen (d.h. stromminimalen) Fluss in der Maschine aufzubauen, so wird die grüne Linie verlassen und die Maschine flussschwächend betrieben (gelber Bereich). Im unteren Flussschwächbereich wird das maximale Drehmodem Kreis maximalen ment auf Stroms (Kreissegment in lila) erreicht. Ab einer bestimmten Drehzahl ist der maximal verfügbare Fluss (blau eingezeichnete Ellipsen) so gering, dass das maximale Drehmoment nicht mehr auf dem Kreis maximalen Stroms, sondern auf der orangefarbenen Optimierungskurve maximalen Drehmoments bei minimaler Flusszeigerlänge erreicht wird. Die Maschine befindet sich dann im oberen Flussschwächbereich.

Mit Hilfe der beschriebenen Kennlinien und Kennfelder ist es möglich, die Maschine in jedem Arbeitspunkt weitgehend wirkungsgrad-optimal zu betreiben. Ihr wesentlicher Vorteil gegenüber einer Beschreibung mit Induktivitäten ist, dass die Sättigungseffekte bereits in den Kennfeldern enthalten sind und daher nicht weiter behandelt werden müssen. Thermische Effekte dagegen werden darin nicht explizit berücksichtigt; ihre Analyse stellt ein aktuelles Themengebiet im Fachgebiet dar.

Bei der Realisierung der Regelungsstrategie mit Hilfe einer digitalen Regelung ergibt sich bei sehr hohen Drehzahlen von 10.000/min und mehr das Problem einer geringen Anzahl von Abtastungspunkten während einer elektrischen Periode der Maschine. Die Konsequenzen hieraus sind vielfältig. So stößt die Auslegung der Regelung auf Basis eines zeitkontinuierlichen Modells an ihre Grenzen. Auch die Winkellage der Abtastzeitpunkte ist für die Qualität der Regelung von Bedeutung. Das Fachgebiet hat im Laufe der Zeit umfangreiche Kenntnisse auf diesem Gebiet gewonnen.

Prüfstandsergebnisse

Die gute Performanz der Regelung kann durch Messungen an unserem Laborprüfstand bestätigt werden. In Bild 3 ist der Hochlauf einer Maschine dargestellt. Im obersten Messschrieb ist gut zu erkennen, dass der weitaus größte Teil des Arbeitsbereiches im Flussschwächbereich liegt. Aber auch



With the help of the described characteristic curves and LUTs it is possible to operate the machine at every operating point at optimal efficiency to a large extent. Its major advantage compared to a





description with inductances is that the saturation effects are already covered by the LUTs and therefore do not need further treatment. By contrast, thermic effects are not included there explicitly, the analysis of them is a current topic in the department.

In operation at high speed of 10,000/min and more, the problem of a small number of sampling points during an electrical period of the machine arises. There are diverse consequences resulting from this. Thus the control design based on a



REGELUNG VON PM-SYNCHRONMASCHINEN CONTROL OF PM SYNCHRONOUS MACHINES

im Ankerstellbereich verlangt die verlustoptimierte Regelungsstrategie bereits nach einem Strom $i_d \neq 0$, was gut im zweiten Messschrieb zu sehen ist. Im unteren Messschrieb ist dargestellt, wie die benötigte Spannung im Ankerstellbereich mit zunehmender Drehzahl wächst, bis sie schließlich nach kurzem Überschwingen nah unterhalb der Spannungsgrenze verharrt. Dies ist bemerkenswert, wenn man berücksichtigt, dass die Stromregelkreise mit der Spannung als Stellgröße immer noch eine gewisse Reserve benötigen, um stabil arbeiten zu können.

Ausblick

Es ist abzusehen, dass Hybridfahrzeuge nur einen Zwischenschritt hin zum reinen Elektrofahrzeug darstellen. Aufgrund der in absehbarer Zeit noch beschränkten Leistungsfähigkeit der verfügbaren Batterien wird eine zentrale Anforderung an die Antriebe und damit auch an die Regelungen sein, einen möglichst hohen Wirkungsgrad zu erzielen. Auch thermische Gesichtspunkte werden in dieser Beziehung eine zunehmend wichtigere Rolle spielen. time-continuous model is limited. Additionally, the angle position of the sampling points is important for the quality of control. In the course of time our department has gained wide knowledge in this field.

Experimental Results

The good control performance can be confirmed by measurements at our test rig in the laboratory. Fig. 3 shows the run-up of a machine. The upper plot shows that the motor is predominantly operated in the field weakening area. But also in the armature control area the optimal efficiency strategy already requires an $i_d \neq 0$ current, which can be clearly seen in the second plot. The lower plot shows how the required voltage in the armature control area is increasing at advancing speed, until it finally remains close to threshold voltage, after a short overshoot. This is impressive, when considering that the current controllers with the voltage as actuating variable still need a certain reserve to operate reliably.

Outlook

It is expected that hybrid vehicles are only an intermediate step on the way to purely electrical vehicles. Due to the still limited energy density of the available batteries in the foreseeable future, high efficiency for drives and with it for controls will be essential. Thermic aspects will still play an increasingly important role in this relation as well.

Veröffentlichungen

Publications

- [1] T. Grote, M. Meyer, J. Böcker; "Direct Torque Control für den verlustoptimalen Betrieb eines Permanentmagnet-Synchronmotors mit eingebetteten Magneten", Internationaler ETG-Kongress 2007 - Hybridantriebstechnik - Energieeffiziente elektrische Antriebe, Karlsruhe, Deutschland, 2007
- [2] M. Meyer, T. Grote, J. Böcker; "Direct Torque Control for Interior Permanent Magnet Synchronous Motors with Respect to Optimal Efficiency," 12th European Power Electronics and Adjustable Speed Drives Conference, Aalborg, Denmark, 2007
- [3] M. Meyer; J. Böcker; "Transient Peak Currents in Permanent Magnet Synchronous Motors for Symmetrical Short Circuits," Int. Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), Taormina, Italien, 2006
- [4] M. Meyer, J. Böcker; "Optimum Control for Interior Permanent Magnet Synchronous Motors (IPMSM) in Constant Torque and Flux Weakening Range," 12th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC), Portoroz, Slowenien, 2006



Linearantriebstechnik

von Dipl.-Ing. Christian Henke und Dipl.-Ing. Tobias Schneider

Linearmotoren ermöglichen eine direkte Wandlung elektrischer Energie in eine lineare mechanische Bewegung und reduzieren dabei die mechanischen Verluste im Antriebsstrang durch Wegfall von Getriebe oder Lager. Lineare Direktantriebe finden ihre Anwendung im reibungsminimalen und präzisen Transport von Material oder Personen und werden in der Fördertechnik sowie in der Montagetechnik und im Werkzeugmaschinenbau eingesetzt.

Das Fachgebiet untersucht speziell für den Einsatz als Traktionsantriebe im Rahmen des Forschungsprojekts "Neue Bahntechnik Paderborn" (NBP) [1] verschiedene lineare Antriebsvarianten. Einen Schwerpunkt stellt dabei der doppelt gespeiste Asynchronlinearmotor dar. Bei dieser Motorvariante besitzen sowohl die Primär- als auch die Sekundärteile dreiphasige Drehstromwicklungen (s. Bild 1). Linear Drives by Dipl.-Ing. Chrisitan Henke and Dipl.-Ing. Tobias Schneider

Linear drives enable a direct transformation of electric energy into a linear mechanical motion. Furthermore mechanical losses can be reduced by elimination of gear or bearing. Linear direct drives are used in precise and minimal friction transportation of material and passengers and are also applied in materials handling as well as in installation engineering and machine tool building.

The department investigates different types of linear drives, especially for the use as traction drives within the scope of the research project "Neue Bahntechnik Paderborn" (NBP) [1]. Thereby the central point is the linear doubly-fed asynchronous motor. Both the primary parts and the secondary parts of this motor contain three-phase windings.

The doubly-fed motor enables contactless energy transfer to the on-board power supply system at



Bild 1: Doppelt gespeister Asynchronlinearmotor Fig.1: Linear doubly-fed asynchronous motor

Beim doppelt gespeisten Motor kann im asynchronen Betrieb nach dem transformatorischen Prinzip außerdem berührungslos Energie ins Bordnetz übertragen werden, so dass das Fahrzeug nicht über Stromschienen oder Oberleitungen mit Energie versorgt werden muss. Allerdings gestaltet sich die Regelung des Motors schwieriger. Ein verlustoptimaler Betrieb setzt eine Phasendifferenz von 90° zwischen Läufer- und Statorstrom voraus. Da jedoch Läufer- und Statorstromregelung örtlich verteilt im Fahrzeug bzw. in der Fahrwegspeisung angeordnet sind und die Phasenlage der jeweiligen anderen Motorkomponente nicht über übliche La-



asynchronous mode according to the transformative principle, thus the vehicle does not need to be supplied with power by conductor rails or catenaries. However, motor control is more difficult.

The losses can be minimized by adjusting a phase displacement of 90° between secondary and primary currents. Since secondary and primary current controllers are locally dis-

tributed and the phase of the other motor component cannot be measured by usual position measurement devices, special synchronization strategies are required. Thus, beside encoderless processes, also magnetic field measurements are studied.

As a further motor topology, a linear induction motor is studied which features a passive reaction plate, consisting of a conducting material (copper, aluminium) as well as ferromagnetic material for magnetic couplings, instead of an active stator. gegebersysteme erfasst werden kann, sind besondere Synchronisierungsstrategien erforderlich. So werden neben geberlosen Verfahren zur Synchronisation auch Verfahren basierend auf Magnetfeldmessungen untersucht [2], [3].

Als eine weitere Motorvariante wird ein linearer Asynchronkurzschlussmotor untersucht, der anstelle des aktiven Statorsegments eine passive Reaktionsschiene aufweist (Bild 2), die aus einem elektrisch gut leitenden Material (Kupfer, Aluminium) sowie einem ferromagnetischen Material (Eisen) für den magnetischen Rückschluss besteht.



Bild 2: Asynchronlinearmotor mit passiver Reaktionsschiene Fig.2: Linear induction motor

Wie bei einem Kurzschlussmotor üblich entstehen durch die Relativgeschwindigkeit des erregenden Magnetfeldes Wirbelströme in der Reaktionsschiene, die zur Kraftbildung genutzt werden. Somit hat nur das Fahrzeug eine dreiphasige Drehstromwicklung; eine berührungslose Energieübertragung ist daher nicht möglich. Vorteile dieses Motors sind jedoch in den Kosten und im geringen regelungstechnischen Aufwand zu sehen.

Weitere Forschungsarbeiten konzentrieren sich auf geschaltete Reluktanzmotoren (GRM). Der wirtschaftliche Einsatz dieses Motortyps hat erst seit einigen Jahren auf Grund moderner Leistungselektronik und Steuerungstechnik an Bedeutung gewonnen. Dabei sind geschaltete Reluktanzmotoren aufgrund ihres Wirkungsgrades, ihrer Robustheit und ihres einfachen und damit kostengünstigen Aufbaus für verschiedenste Anwendungen geeignet. Besonders die robuste Bauweise ist für den Einsatz als Linearantrieb von schienengeführten Transportsystemen auf Grund der starken Umwelteinflüsse von Vorteil.

Um die im Vorfeld theoretisch berechneten Kraftdichten und Wirkungsgrade verifizieren zu können, wurden zwei Reluktanzmotor-Prototypen entworfen und entwickelt [4]. Der erste Prototyp (Bild 3, linearer GRM) wurde für statische Messungen der As is usual for an induction motor, due to relative velocity of the exciting magnetic field, eddy currents occur in the reaction plate, which are used for force generation. Hence only the vehicle is equipped with three-phase windings; thus a contactless transfer of energy is not possible. However, the motor's advantages are the costs and the simple control strategy.

Further research works focus on switched reluctance motors (SRM). Just recently the economic utilization of this motor has gained importance, because of advanced power electronics and control. Switched reluctance motors are suitable for a variety of applications, due to their efficiency, robustness and their simple and therefore low-cost construction. In particular, the solid structure is beneficial for the use as linear drive in rail-guided transportation systems because of strong environmental influences. In order to verify the theoretically calculated force densities and efficiency factors, two reluctance motor prototypes have been developed and manufactured. The first prototype has been developed for static measurements of thrusts and normal forces. Since a test track for linear motors operated at higher speed was too costly, a second prototype has been developed and realized as a rotationally switched reluctance motor (Fig.3 on the right). The motor rating has been adjusted to the greatest extent according to poles, pitch, air gap etc. of the linear SRM motor.

Fig. 4 illustrates the previously simulated currents and torques (dashed lines) and also the values measured at the test stand (solid line). Thereby, the simulation models have been successfully verified for further operations. The previously calculated efficiency factors for reluctance motors with 76% at 406 min⁻¹ and 84% at 812 min⁻¹ have been verified by the measurements at the rotational SRM test stand [5].

The efficiency factors are promising for this motor configuration with 12mm air gap in comparison with linear induction motors and give rise to further research works. Thereby, a drive control with optimal efficiency at parameter variations and in emergency cases is of particular interest.

17

LINEARANTRIEBSTECHNIK LINEAR DRIVES

Vorschubs- und Normalkräfte entwickelt. Da eine Teststrecke für Linearmotoren, die mit größerer Geschwindigkeit betrieben werden sollen, zu kostenintensiv ist, wurde ein zweiter Prototyp als rotatorischer geschalteter Reluktanzmotor (Bild 3, rechts) entwickelt und umgesetzt. Die Dimensionierung dieses Motors nach Polzahl, Polteilung, Luftspalt usw. wurde weitestgehend an den linearen GRM angepasst.

In Bild 4 werden die vorher simulierten Ströme und Drehmomente (gestrichelte Linien) und die am Versuchsstand gemessenen Werte (durchgängige In 2003 a test track was constructed on a scale of 1:2.5 (see Fig. 5) within the scope of the research project "Neue Bahntechnik Paderborn" (NBP). This test track is equipped with the linear doubly-fed asynchronous motor, which was described before. Additionally, the test facility features sections which are equipped with a passive reaction plate (induction motor).

In the department we also study the control of longitudinal dynamics for railway vehicles, in addition to motor control. Linear motors make it possible to control vehicles accurately according to the



Bild 3: Linearer und rotatorischer geschalteter Reluktanzmotor Fig.3: Linear and rotational switched reluctance motor

Linien) dargestellt. Damit konnten die Simulationsmodelle für weiterführende Arbeiten erfolgreich verifiziert werden. Die vorher berechneten Wirkungsgrade für die Reluktanzmotoren mit 76% bei 406 min⁻¹ und 84% bei 812 min⁻¹ konnten mit den Messungen am rotatorischen GRM-Prüfstand bestätigt werden [5].

Die Wirkungsgrade sind für diese Motorkonfiguration mit 12mm Luftspalt im Vergleich zum linearen Asynchronkurzschlussmotor vielversprechend und Anlass für weitere Forschungsarbeiten. Von Interesse sind dabei eine wirkungsgradoptimale Antriebsregelung unter Parameterschwankungen und Notfallszenarien.

Im Rahmen des Forschungsprojekts "Neue Bahntechnik Paderborn" (NBP) wurde 2003 eine Teststrecke im Maßstab 1:2,5 (s. Bild 5) errichtet. Diese ist mit dem oben beschriebenen doppelt gespeisten Asynchronlinearmotor ausgestattet. Zudem verfügt die Versuchsanlage über Abschnitte, die nur mit passiver Reaktionsschiene (Asynchron-Kurzschlussmotor) ausgestattet sind. intended operational profile, because the vehicles can be accelerated and decelerated independently of the wheel-rail contact and also of weather con-



Bild 4: Drei von sechs Phasentrömen und Drehmoment des rotatorischen GRM bei einer Drehzahl von 406 min⁻¹



18



Bild 5: NBP Teststrecke, Maßstab 1:2,5 Fig. 5: NBP test track in scale of 1:2.5

Im Fachgebiet wird neben der Motorregelung auch die Längsdynamikregelung für die Schienenfahrzeuge untersucht. Durch die Linearmotortechnik gelingt es, die Fahrzeuge exakt nach dem geplanten Fahrprofil zu führen, da die Fahrzeuge unabhängig vom Rad-Schiene-Kontakt, damit also unabhängig von Witterung und Materialeigenschaften angetrieben und gebremst werden können. Dies stellt die Grundlage für den Konvoibetrieb dar. Um den Energiebedarf zu reduzieren und den Streckendurchsatz zu erhöhen, sollen sich die RailCabs nach Möglichkeit während der Fahrt berührungslos zu Konvois mit geringen Fahrzeugabständen zusammenschließen [6]. Dies erfordert neben einer Abstandsregelung aber auch Strategien für das sichere Zusammenführen und Trennen von Fahrzeugkonvois [7], [8].

Ein weiteres Schwerpunktthema in diesem Bereich bildet die Leittechnik und die Sicherheitstechnik für die Versuchsanlage [9]. Neben der Koordination der einzelnen Fahrzeuge, die zur Regelung der Längsdynamik erforderlich ist, wird beim doppelt gespeisten Linearmotor eine Kommunikationsverbindung zwischen den Fahrzeugen und der streckenseitigen Informationsverarbeitung benötigt. Zudem ist eine Synchronisierung der entlang der Strecke verteilten Stromrichter notwendig. Der Datenaustausch zwischen Fahrzeug und Strecke erfolgt über ein Funknetzwerk, das in die Regelungsstruktur des Linearmotors eingebunden ist.

Für die streckenseitige Kommunikation wird ein

ditions and material properties. This provides the basis for the convoy operation, which enables a reduction of energy demand and increases the track capacity. The RailCabs can form convoys without mechanical coupling, preferably during drive operation, with a small separation distance. Apart from distance control, this also requires strategies for bringing together and separating convoys safely [7], [8].

Additional central topics in this field are the control and communication system and the safety technology for the test plant [9]. In addition to the coordination of every single vehicle, which is necessary for controlling the longitudinal dynamics, a communication connection is needed for the linear doubly-fed motor, in order to exchange reference values between the vehicles and the track-sided information processing. Furthermore, a synchronization of the rectifiers which are distributed along the track is necessary. The data exchange between vehicle and track takes place via a wireless network which is integrated in the control structure of the linear motor. A bus system is used for track communication to guarantee continuous switching of the rectifiers under real-time conditions [10]. The structure of the control and communication system is shown in Fig. 6.

A further part of research at the test plant is the control of the operating point of the linear motor.



Bussystem eingesetzt, mit dem ein zeitrichtiges Weiterschalten der Stromrichter gewährleistet wird [10]. Die Struktur der Betriebsleittechnik ist in Bild 6 dargestellt.

Weiterer Bestandteil der Untersuchungen an der Versuchsanlage ist die Arbeitspunktsteuerung des Linearmotors. Die Einstellung der Leistungsflüsse erfolgt beim doppelt gespeisten Linearmotor über die Motorstromregelungen von Läufer und Stator. Neben der vorrangigen Einstellung der Schubkraft sind folglich die Freiheitsgrade für die Energieübertragung zu berücksichtigen. Befinden sich mehrere Fahrzeuge auf einem gemeinsamen Statorabschnitt, so muss über die Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation ein gemeinsamer Arbeitspunkt für den streckenseitigen Motorteil gefunden werden. Die Arbeitspunktvergabe im Konvoi erfolgt in direktem Zusammenhang mit dem Energiemanagement der Fahrzeuge. The adjustment of power flows is accomplished via motor current control of secondary and primary of the linear doubly-fed motor. Additionally to the major adjustment of the thrust, the degrees of freedom have to be taken into account for transfer of energy. If several vehicles are operated on a common section of the primary, a collective operating point has to be found for the track-sided motor part via the inter-vehicular communication. The operating point assignment inside the convoy happens in direct connection to the vehicles' energy management.



Bild 6: Struktur der Betriebsleittechnik

Fig. 6: Structure of control and communication system



LINEARANTRIEBSTECHNIK LINEAR DRIVES

Veröffentlichungen

Publications

- [1] C. Henke, C. Rustemeier, T. Schneider, J. Böcker, A. Trächtler; "RailCab Ein Schienenverkehrssystem mit autonomen, Linearmotor getriebenen Einzelfahrzeugen", Internationaler ETG-Kongress 2007 – Kundennutzen durch neue Technologien in der Bahntechnik, Karlsruhe, Deutschland, 2007
- [2] T. Schneider, B. Schulz, C. Henke, J. Böcker; *"Redundante Positionserfassung für ein spurgeführtes linearmotorgetriebenes Bahnfahrzeug"*, Workshop Entwurf mechatronischer Systeme (EMS), Heinz-Nixdorf-Institut, Universität Paderborn, Deutschland, 2006
- [3] A. Pottharst, C. Henke, T. Schneider, J. Böcker, H. Grotstollen; "Drive Control and Position Measurement of RailCab Vehicles Driven by Linear Motors," Int. Symposium on Instrumentation and Control Technology (ISICT), Beijing, China, 2006
- [4] L. Kolomeitsev, D. Kraynov, S. Pakhomin, F. Rednov, E. Kallenbach, V. Kireev, T. Schneider, J. Böcker; "Linear Switched Reluctance Motor as a High Efficiency Propulsion System for Railway Vehicles", International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), Ischia, Italy, 2008
- [5] L. Kolomeitsev, D. Kraynov, S. Pakhomin, F. Rednov, E. Kallenbach, V. Kireev, T. Schneider, J. Böcker; "Control of a Linear Switched Reluctance Motor as a Propulsion System for Autonomous Railway Vehicles," 13th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC), Poznan, Poland, 2008
- [6] C. Henke, H. Vöcking, J. Böcker, N. Fröhleke, A. Trächtler; "Convoy Operation of Linear Motor Driven Railway Vehicles," The Fifth International, Symposium on Linear Drives for Industry Applications (LDIA), Kobe-Awaji, Japan, 2005
- [7] C. Henke, M. Tichy, T. Schneider, J. Böcker, W. Schäfer; "Organization and Control of Autonomous Railway Convoys", 9th International Symposium on Advanced Vehicle Control, Kobe, Japan, 2008
- [8] C. Henke, N. Fröhleke, J. Böcker; "Advanced Convoy Control Strategy for Autonomously Driven Railway Vehicles," IEEE Conf. on Intelligent Transportation Systems, Toronto, Canada, 2006
- [9] C. Henke, M. Tichy, T. Schneider, J. Böcker, W. Schäfer; "System Architecture and Risk Management for Autonomous Railway Convoys," 2nd Annual IEEE International Systems Conference, Montreal, Canada, 2008
- [10] A. Pottharst, H. Grotstollen; "*Radio Based Control of a Linear Motor for the NBP Railway System*," ISICT 2003, 5th International Symposium on Instrumentation and Control Technology, Beijing, China, 2003



Elektronische Stromversorgungen von Dipl.-Ing. Heiko Figge und Dipl.-Ing. Tobias Grote

Im Jahr 2006 wurden in den USA von informationstechnischen Anlagen 90 TWh = 324 PJ elektrische Energie verbraucht. Dies entspricht über den Jahresverlauf gemittelt einer Leistung von 10 GW, also von zehn 1000 MW Kraftwerksblöcken. Dies macht einen Anteil von ca. 2% des gesamten elektrischen Energiebedarfs der USA aus. Zur Reduzierung der Energiekosten sind daher Effizienzsteigerungen bei informationstechnischen Anlagen und deren Stromversorgungssystemen von steigendem Interesse.

Eigenschaften von Stromversorgungen hoher Leistung

Die Energieversorgung informationstechnischer Anlagen der Telekommunikations- und Datenzentren erfolgt im Normalbetrieb aus dem öffentlichen Stromnetz. Die zum Betrieb der digitalen Schaltkreise benötigten stabilisierten Gleichspannungen werden durch Gleichrichtung der Netzspannung und Anpassung des Spannungsniveaus erzeugt. Besonders bei Stromversorgungseinheiten hoher Ausgangsleistung (>300 W) erfolgt die Gleichrichtung der Netzspannung durch eine sogenannte aktive PFC-Stufe (Power Factor Correction). Diese Stufe erzeugt durch aktive Regelung einen im Idealfall sinusförmigen Eingangsstrom mit geringer Phasenverschiebung und minimiert so die Rückwirkung der Gleichrichtung auf das Stromnetz. Der maximal erlaubte Oberschwingungsgehalt des Eingangsstromes eines elektrischen Verbrauchers ist durch entsprechende Industrienormen vorgegeben.

Die Stromversorgungsstruktur informationstechnischer Anlagen wird zunehmend dezentral gestaltet, wobei die Energieverteilung durch einen Gleichspannungsbus (z.B. 12 V) erfolgt. Diese Struktur bietet zum einen den Vorteil eines modularen und somit sehr flexiblen Aufbaus der Anlage und zum anderen eine hohe Ausfallsicherheit, wenn z.B. die Versorgungsleistung einer defekten Stromversorgungseinheit von weiteren am Gleichspannungsbus angeschlossenen Einheiten übernommen werden kann.

Die zur Speisung des Gleichspannungsbusses aus

Switched-Mode Power Supplies

by Dipl.-Ing. Heiko Figge and Dipl.-Ing. Tobias Grote

In 2006 the IT plants in the USA spent 90 TWh = 324 PJ of electric energy. This corresponds to a power of 10 GW, thus of ten power station units of 1000 MW. This constitutes 2% of the USA's whole energy demand. In order to reduce energy costs, efficiency improvements of IT plants and their power supply systems are a matter of increasing interest.

Characteristics of Power Supplies with High Output Power

The energy for supplying IT plants of telecom and data centers is drawn in normal mode from the national power grid. The stabilized DC voltages required for the operation of the digital circuits are generated by rectifying the grid voltage and adjusting the voltage level. Power supply units of high output power (>300 W) typically use a so-called PFC-stage (Power Factor Correction) for rectification. This stage generates in ideal case a sinusoidal input current with a minimal phase shift and reduces in this way the rectifier's disturbing effects on the grid. The maximal permitted harmonic distortion of the input current drawn by an electric consumer is given by industrial standards.

The power supply structure of IT plants is more and more decentralized, whereby the energy distribution takes place by means of a DC voltage bus (e.g. 12 V). This structure is beneficial for a modular and thereby very flexible construction of the plant and also a high stability, when e.g. the supply power of a defective power supply unit can be taken by other units which are connected to the DC voltage bus.



Bild 1: Stromversorgungseinheit für ein Serversystem

Fig. 1: Front-end converter for a server system



dem öffentlichen Stromnetz benötigte Stromversorgungseinheit (engl.: front-end converter, z.B. Bild 1) besteht typischerweise aus der bereits genannten PFC-Stufe zur rückwirkungsfreien Gleichrichtung der Netzspannung und einem DC-DC-Umrichter, welcher die am Gleichspannungszwischenkreis anliegende Spannung auf die benötigte Ausgangsgleichspannung umformt und gegenüber Schwankungen der an dem Gleichspannungsbus anliegenden Last konstant hält (s. Bild 2).



Allgemeine Entwurfsziele und -methoden

 Bild 2:
 Struktur einer typischen Stromversogungseinheit für informationstechnische Anlagen

 Fig. 2:
 Structure of a typical front-end converter for IT plants

Im Fachgebiet werden in verschiedenen Teilprojekten die Konverterstufen von Stromversorgungssystemen hoher Leistung analysiert und entwickelt.

Bei der Bewertung und Auswahl der Schaltungskonzepte sind die Einhaltung der EMV-Normen, eine hinreichende Robustheit und ein guter Leistungsfaktor Vorraussetzungen für die Serientauglichkeit der Stromversorgungseinheit. Neben weitergehenden Entwurfszielen wie niedrigen Kosten und hoher Leistungsdichte steht aktuell aufgrund weltweit steigender Energiekosten besonders die Forderung nach einem hohen Wirkungsgrad im Vordergrund.

Für die Weiterentwicklung und Optimierung der Konverterstufen hinsichtlich der genannten Ziele werden Aspekte wie die Wahl der Schaltungstopologie, steuer- und regelungstechnische Fragestellungen, Beanspruchung von Halbleiter- und Magnetikbauelementen sowie der konstruktive Schaltungsaufbau und das Schaltungslayout betrachtet.

Schwerpunkte der Arbeiten sind wie folgt:

Integrierte CAE-Werkzeuge zur optimierten Entwicklung von Stromversorgungen The power supply units required for the feeding of a DC voltage bus from a national grid, often referred to as front-end converter (e.g. Fig. 1), typically consists of the afore-mentioned PFC-stage for a non disturbing rectification of the grid voltage, and a DC-DC stage which converts the intermediate voltage at the DC link capacitor to the required output DC voltage and stabilizes it towards fluctuations of the load adjacent to the DC voltage bus (s. Fig. 2).

General Design Objectives and Methods

In the department we analyze and develop converter stages of high power supply systems within different sub-projects. Concerning the evaluation and the choice of switching circuit concepts, adherence of EMC norms, sufficient ruggedness and a good power factor are requirements for the front end converter's suitability for mass production. Apart from further design objectives like low costs and high power density, a current topic is also the demand for high efficiency which is very important because of the worldwide rising energy costs.

In order to further develop and optimize the converter stages in respect to the afore-mentioned objectives, aspects such as the selection of switching circuit topologies, control methods, stress of the semi-conductor and magnetic components, as well as the circuit construction and the circuit layout have to be taken into account.

Central topics are:

Integrated CAE Tools for Optimized Development of Power Supplies

The aim is to advance the design procedure and thereby to reduce the products' time-to-market. Fast and inexpensive computer hardware makes the planning and design of new circuits and components easier and quicker. The advantages with respect to costs through conservation of time and material during the developmental phase are obvious. Computer programmes make it possible to test complex power electronic circuits as well as their control by means of an excellent representation in calculation models. Additionally, the computer-based design makes it possible to investigate lots of different realization concepts effectively in order to find the best solution. A CAE tool covers



Ziel ist es zum Einen, den Entwurfsprozess zu beschleunigen und damit die Zeit bis zur Marktreife (time-to-market) der Produkte zu reduzieren. Schnelle und preiswerte Rechentechnik erleichtert und beschleunigt die Planung und den Entwurf neuer Hardware. Die Kostenvorteile durch Einsparung von Zeit und Material während der Entwicklungsphase liegen auf der Hand. Computerprogramme erlauben den Test komplexer leistungselektronischer Schaltungen sowie ihrer Regelungen durch eine hervorragende Abbildung in Rechenmodellen. Zum Anderen erlaubt der rechnergestützte Entwurf viele unterschiedliche Realisierungskonzepte effektiv zu untersuchen, um die beste Lösung zu finden. Ein CAE-Werkzeug umfasst beispielsweise eine Reihe von Teilmodulen, von der wissensbasierten Schaltungsauswahl, der leistungselektronischen Analyse bis zur integrierten Optimierung magnetischer Bauelemente. Die hierfür angewendeten Werkzeuge sind u.a.

- Schaltungssimulatoren (z.B. Simplorer, Plecs)
- Numerische Berechnungen und Analysen (z.B. Mathcad, Mathematica)
- Feldberechnungen (z.B. PExpert, Maxwell, Q3D).

Digitale Regelung von Schaltnetzteilen

Typische Telekom- bzw. Server Stromversorgungen verfügen neben einer Ausgangsspannungsregelung mit unterlagerter Stromregelung über vielfältige Schutz-, Monitoring- und Zusatzfunktionen. Gegenwärtig bedient man sich überwiegend analoger Schaltkreise zur Bewältigung dieser wegen hoher Schaltfrequenzen von einigen 10 bis einigen 100 kHz zeitkritischen Aufgaben. Aufgrund von Vorteilen wie leichter und flexibler Parametrierbarkeit, Reduzierung der Anzahl passiver Bauelemente, thermischer Stabilität und der Möglichkeit der Implementierung adaptiver Regelungsalgorithmen, gibt es eine Tendenz zu digitalen Regelungen.

Ziel verschiedener Forschungsprojekte ist, diese Steuerungs- und Regelungsfunktionen von Stromversorgungen basierend auf Mikrocontrollern oder digitalen Signalprozessoren (DSP) zu realisieren [2-4]. Dabei sollen zum einen die Möglichkeiten zur Implementierung adaptiver und nichtlinearer Reknowledge-based switching circuit choice, the power circuit analysis, up to the integrated optimization of magnetic components.

The tools that are used are:

- Circuit simulators (e.g. Simplorer, Plecs)
- Numerical calculations and analyses (e.g. Mathcad, Mathematica)
- Field calculations (e.g. PExpert, Maxwell, Q3D)

Digital Control of Switched-Mode Power Supplies

Common power supplies for telecom or server applications are controlled by a cascaded control structure with an outer voltage loop and an inner current loop. Additionally a multitude of protection circuits and monitoring functions are needed. Because of high switching frequencies of some 10 up to some 100 kHz there are still analogue circuits dominant to solve this time critical tasks. Due to advantages such as flexibility and programmability, decreased number of active and passive components, negligible thermal drifts and the possibility of implementing sophisticated adaptive control algorithms, digital control becomes more and more attractive.

The aim of different research projects is to realize these control functions of power supplies with micro-controllers or digital signal processors (DSP) [2-4].

In this context, the possibility of implementing adaptive and nonlinear control methods is utilized as well as the development of power management strategies. Such strategies ensure the maximum efficiency in every operating point with considering the specification, e.g. total harmonic distortion (THD), power factor and hold up behavior. In addition to an improved control performance, also an economic benefit from this process is expected.

Development of Power Factor Correction (PFC) Rectifiers for One- and Three-Phase Applications

Passive rectification, which has very poor performance with respect to power factor and THD, are still available in lots of today devices. The THD of



gelalgorithmen genutzt werden. Zum anderen werden Betriebsstrategien entwickelt, welche einen wirkungsgradoptimalen Betrieb in jedem Arbeitspunkt gewährleisten und dabei die gestellten Anforderungen z.B. an Oberschwingungen, Leistungsfaktor und Netzausfallüberbrückung einhalten. Neben regelungstechnischen Vorteilen wird mittelfristig auch ein wirtschaftlicher Nutzen dieser Vorgehensweise erwartet.

Entwicklung von Netzgleichrichtern mit sinusförmiger Stromaufnahme für ein- und dreiphasige Anwendungen

Passive Gleichrichterschaltungen, wie sie heute noch in vielen Geräten und Anlagen eingesetzt werden, weisen stark verzerrte Eingangsströme auf. Deren Oberschwingungen verursachen zusätzliche Verluste auf den Leitungen, führen zu Verzerrungen der Netzspannungen und regen u. U. das Netz zu Schwingungen an. Ziel der Forschungsarbeiten ist die Entwicklung und Optimierung von selbstgeführten, hochfrequent getakteten PFC-Netzgleichrichtern und Steuerverfahren, um Netzrückwirkungen, Gewicht, Volumen und Kosten zu minimieren und gleichzeitig hohen Forderungen an die Dynamik z. B. bei Lastsprüngen zu genügen [2-3].

Optimierung des LLC-Resonanzkonverters für den Einsatz in Stromversorgungen hoher Leistung

Der LLC-Resonanzkonverter (Bild 5) ist besonders unter dem Aspekt eines hohen Wirkungsgrades für die Funktion des DC/DC-Umrichters in einer Stromversorgungseinheit geeignet. Hierzu tragen hauptsächlich die sinusförmigen Strom- und Spannungsverläufe und die daraus resultierenden günstigen Schaltbedingungen für die Halbleiterbauelemente (Nullspannungs- bzw. Nullstromschalten), eine weitgehende Ausnutzung der parasitären Eigenschaften des Transformators, sowie das nur einstufige Ausgangsfilter mit der Glättungskapazität C_f bei.

Während der LLC-Resonanzkonverter bereits in Anwendungen kleinerer Leistung wie z.B. LCD-TVs häufig eingesetzt wird, finden sich in Stromversorgungssystemen hoher Leistung fast überwiegend klassische Schaltungstopologien wie die phasengesteuerte Vollbrücke oder der Zwei-Transistor today's devices lead to additional conduction losses and can cause line oscillation. The aim of this research project is to develop and optimize switchedmode power supplies with active PFC rectification. Therefore new topologies and control strategies are investigated to reduce THD as well as weight, volume and costs by still achieving high dynamic, e.g. at load steps [2-3].



Bild 3: Regelungsstruktur eines netzfreundlichen Gleichrichters





Bild 4: Stromverlauf am netzfreundlichen Gleichrichter

Fig. 4: Current shape of a PFC rectifier

Optimization of a LLC Resonant Converter for the Use in High Power Supplies

The LLC resonant converter (Fig. 5) is particularly suited in terms of high efficiency to fulfill the DC-DC conversion in a front end converter. Mostly, the sinusoidal shape of the current and voltage waveforms and the resulting switching conditions for the semi-conductor components (zero voltage/zero current switching), the use of most of the parasitical characteristics of the transformer, as well as the one-stage output filter comprising the filter capacitance C_{f_c} add to this.



Flusswandler. Folgende Aspekte erschweren den Einsatz des LLC-Resonanzkonverters im Vergleich zu den klassischen Topologien:

 Viele Stromversorgungssysteme erfordern auf Grund mehrerer parallel geschalteter Stromversorgungseinheiten oder im Überlastfall eine kontrollierte Begrenzung des Ausgangsstromes des DC-DC-Umrichters. Dies ist für den LLC-Konverter aufgrund der aus dem LLC-Resonanzkreis resultierenden Steuerkennlinie nur mit Hilfe zusätzlicher schaltungstechnischer Maßnahmen beherrschbar.



Bild 5: Schaltbild des LLC-Resonanzkonverters Fig. 5: Circuit diagram of the LLC resonant converter

- Der pulsförmige Ausgangsstrom des LLC-Resonanzkreises stellt hohe Anforderungen an das kapazitive Ausgangsfilter (Filter 1. Ordnung), da dieses zur Glättung der Ausgangsspannung einen hohen Effektivstrom führen muss. Der Einsatz eines aufwändigeren Filters würde jedoch Wirkungsgrad, Leistungsdichte und Kosten negativ beeinflussen.
- Eine optimale Dimensionierung des LLC-Konverters erfordert aufgrund der größeren Schaltungskomplexität zusätzliche Iterationsschritte und ist dem mit klassischen Topologien befassten Ingenieur nicht vertraut.

Whereas LLC resonant converters are already frequently used in low-power applications like e.g. LCD TVs, in high-power front end converters almost anywhere classical circuit topologies like the phase-shift full-bridge or the 2-transistor forwardconverter are used.

The following aspects complicate the use of LLC resonant converters compared to the classical to-pologies:

- Many power supply systems require a controlled limitation of the DC-DC converter output current due to the parallel connection of several front end converters or at overload condition. In case of the LLC converter, the DC-DC gain characteristic arising from the LLC resonant circuit yields the need of additional circuitry to make the output current controllable.
- The LLC resonant circuit consists of reactive components which can be manufactured only with moderate allowance. Furthermore, their values change, especially concerning the capacitor, because of aging. These tolerances complicate an optimal converter design.
- The pulse-shaped output current of the LLC resonant circuit puts high demands on the capacitive output filter (first order filter), as it has to take a high AC current in order to smoothen the output voltage. However, the use of an elaborate filter will influence the efficiency, power density and the costs in a negative way.
- An optimal design of the LLC converter requires additional iteration steps because of the higher circuit complexity, this is also new to engineers who are used to classical topologies. Simple and sufficiently precise tools are not available yet.

Considering all these aspects, methods especially for the optimal design of the LLC converter are developed in our department, whereby the CAE tools mentioned above are also used. In this way e.g. [1] investigates the synchronized paralleling of two LLC converters, whereby the requirements for the capacitive output filter could be reduced



Einfache und hinreichend genaue Entwurfswerkzeuge sind noch nicht verfügbar.

In Anbetracht dieser Aspekte werden im Fachgebiet besonders Methoden zur optimalen Dimensionierung des LLC-Konverters entwickelt, wobei auch die genannten CAE-Werkzeuge zur Anwendung kommen. So wurde z.B. die synchrone Parallelschaltung zweier LLC-Konverter untersucht [1], bei der durch phasenversetzte Überlagerung der pulsförmigen Ausgangsströme zweier LLC-Konverter die Anforderungen an das kapazitive Ausgangsfilter drastisch reduziert werden konnten.

Veröffentlichungen

Publications

- [1] H. Figge, T. Grote, N. Fröhleke, J. Böcker, P. Ide; "Paralleling of LLC resonant converters using frequency controlled current balancing," IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC), pp. 1080-1085, 15-19, Rhodes, Greece, 2008
- [2] T. Grote, N. Fröhleke, F. Schafmeister, P. Ide; "Semi-Digital Interleaved PFC Control," DPEC 2008 Seminar, Shanghai, China, 2008
- [3] T. Grote, H. Figge, N. Fröhleke, W. Beulen, F. Schafmeister, P. Ide, J. Böcker; "Semi-Digital Interleaved PFC Control with Optimized Light Load Efficiency," Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Twenty-Fourth Annual IEEE, Washington DC, USA, 2009
- [4] T. Grote, H. Figge, N. Fröhleke, F. Schafmeister, P. Ide J. Böcker; "Adaptive Digital Slope Compensation for Peak Current Mode Control," 1st IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE2009), San Jose, California, USA, 2009

drastically through phase-shifted overlapping of the pulse-shaped output currents of the LLC converters.

27

Piezoelektrische Antriebssysteme von M.Sc. Rongyuan Li

und Dipl.-Ing. Michael Lönneker

Der inverse piezoelektrische Effekt geeigneter kristalliner Werkstoffe erlaubt die direkte Erzeugung mechanischer Verschiebungen bzw. mechanischer Kräfte durch Anlegen elektrischer Spannungen. Die erzielbare relative Verformung liegt bei etwa 0,2%. Die Krafterzeugung hängt von der Steifigkeit des Materials ab. Piezoelektrische Aktoren sind in der Lage, einen hohen Druck bis zu 35 N/mm² zu erzeugen. Zum Vergleich erreichen elektromagnetische Aktoren ca. 0,02 N/mm². Eine besondere Eigenschaft piezoelektrischer Aktoren ist das gute dynamische Verhalten. Diese Aktoren sind sowohl für statische als auch für dynamische Anwendungen geeignet. Einspritzdüsen sind beispielsweise eine der bekannten Anwendungen für einen quasistatischen Betrieb. Diese öffnen das Injektor-Ventil nur für einen kurzen Augenblick [14]. Die Ultraschallvibration oder der piezoelektrische Ultraschallmotor sind Anwendungen, welche die dynamischen Arbeitsweisen anwenden [12], [13].

Die verfügbaren piezoelektrischen Motoren erzeugen nur wenige 10 Watt. Dieser Aufsatz berichtet von der Forschungsarbeit, den Leistungsbereich bis zu einigen Kilowatt zu erweitern. Hierbei werden die Grundlagen eines neuartigen Motorkonzepts und die Entwicklung eines entsprechenden Stromrichters und Filters für piezoelektrische Hochleistungsmotoren behandelt. Jedoch sollten zunächst einige andere Anwendungen erwähnt werden.

Anwendungen

Piezoelektrische Aktoren werden bei verschiedenen Anwendungen eingesetzt:

- Drahtanschlüsse, Erzeugung von Ultraschalloder Schallschwingungen, Schneid- und Bohrwerkzeug-Unterstützung
- Einspritzdüsen, Tropfenzerstäuber
- Positionieren von optischen Spiegeln, Werkzeugen, Linsen, Fokussieren und Scannen
- Piezoelektrische Ultraschall-Motoren

Piezo-Electric Drives by M.Sc. Rongyuan Li

and Dipl.-Ing. Michael Lönneker

The inverse piezoelectric effect of appropriate crystal materials allows the direct generation of mechanical displacements or forces by electrical voltages. The achievable relative deformation is around 0.2 %. The force generation depends on the stiffness of material. Piezoelectric actuators are able to generate high pressure up to 35 N/mm², in comparison to approx. 0.02 N/mm² of electromagnetic actuators. Very high dynamic response is one of the characteristic features of piezo actuators. These actuators are suitable for static as well as for dynamic applications. Fuel injectors, e. g., are one of the important and well known application for quasi-static mode with the piezo actuator opening the injector valve for a very short moment [14]. The ultrasonic vibration or ultrasonic piezoelectric motors are applying the dynamic mode of operation [12], [13].

The available piezoelectric motors generate only a few tens of watts. This article reports on the research work focusing on how to extend the power range up to kilo-watts. It covers the basics of a novel motor concept and development of an appropriate power converter and filter for high-power piezoelectric motors. However, some other applications should be mentioned first.

Applications

Piezoelectric actuators are used in various applications:

- Wire bonding, generation of ultrasonic or sonic vibrations, cutting and drilling tool assistance, active wedges
- Injectors, droplet generators
- Positioning of optical mirrors, tools, lenses, focusing and scanners
- Ultrasonic piezoelectric motors

Travelling wave-type ultrasonic motors

The travelling wave-type ultrasonic motor (TW-USM) consists of a piezoelectric ceramic in ring form made up of many piezo elements as shown in







Bild 1: Anwendung: Ultraschall-Sonotroden und ein piezoelektrischer Motor Fig. 1: Applications: ultrasonic sonotrodes and piezoelectric motor

Ultraschall-Wanderwellenmotoren

Der Ultraschall-Wanderwellen-Motor (TW-USM) besteht aus einer piezoelektrischen Keramik in Ringform, die sich aus vielen Piezo-Elementen, wie in Bild 2 zu sehen ist, zusammensetzt. Aus der Abbildung wird deutlich, dass die benachbarten Elemente jeweils entgegengesetzte Polarität in der Erregung haben müssen, um eine wellenförmige Verformung zu erzeugen, d.h. wenn sich ein Ele-

ment ausdehnt, müssen sich die benachbarten Elemente zusammenziehen. Normalerweise wird eine zweiphasige, mit 90° phasenverschobene Spannung benutzt, um diese bei Motoren ihrer mechanischen Resonanzfrequenz von etwa 40 kHz zu erre-



Fig. 2. As illustrated in this figure, the elements next to each other must have opposite polarity of excitation in order to achieve a wavelike deformation, i.e. when one element is under expansion next and previous elements must contract. Usually a two-phase power supply with a phase shift of 90° is used to excite these motors at their mechanical eigen-

frequency of around 40 kHz. As a result, a traveling bending wave is generated that can be taken as a superposition of two standing waves, each generated by one of the two excitation phases, Fig. 2 [12],[13].

The rotor is pressed against the stator by means of a disk spring. In most travelling-wave motors, the rotor is coated with a special lining material, realized by an elastic contact layer, in order to obtain good force transmission (see Fig. 2). Due to the





gen. Infolge dessen wird eine Wanderwelle erzeugt, die als eine Überlagerung von zwei Stehwellen aufgefasst werden kann, die durch die zwei Phasen der Stromversorgung erzeugt werden, Bild 2 [12], [13].

Der Rotor drückt gegen den Stator mittels einer Tellerfeder. Bei den meisten Wanderwellen-Motoren ist der Rotor mit einem speziellen Material beschichtet, einer elastischen Kontaktschicht, um eine gute Kraftübertragung zu erzielen (Bild 2). Aufgrund der fortschreitenden Biegewelle führen die Oberflächenpunkte elliptische Bewegungen aus, die senkrechte und waagerechte Komponenten beinhalten. Auf jedem Wellenkamm wird ein travelling bending wave, the surface points of the stator perform elliptic motions containing a vertical and horizontal component. During each wave crest, high normal pressure is generated so that the simultaneous horizontal movement of the surface points pushes the rotor forward via the friction between the elastic contact layer and the stator. As a result of this friction-based mechanical energy conversion, the torque density is very high at low speed, in comparison to classical electromagnetic motors. Unfortunately, the friction accounts also for extreme nonlinear characteristics, wear of the frictional layers and low efficiency (< 50 %). However, this can be accepted for motors with small



hoher senkrechter normaler Druck erzeugt, so dass die gleichzeitig ablaufende waagerechte Bewegung der Oberflächenpunkte den Rotor aufgrund der Reibung zwischen der elastischen Kontaktschicht und dem Stator vorwärts schiebt.

Das Ergebnis dieser auf Reibung basierten mechanischen Energieumformung ist eine sehr hohe Drehmomentdichte im Vergleich zu klassischen elektromagnetischen Motoren bei niedriger Geschwindigkeit. Jedoch ist die Reibung auch für äußerst nichtlineare Eigenschaften verantwortlich, für den Verschleiß der Reibschichten sowie für den niedrigen Wirkungsgrad (<50 %). Jedoch können



Bild 3: Arbeitsweise eines MM-USM Fig. 3: Operating Principle of MM-USM

diese ungünstigen Eigenschaften bei Motoren mit kleiner Einschaltdauer, z.B. für den Autofocus in Kameras, Anpassung der Nackenstütze in Autos, Gegendrehmoment für Lenkräder in drive-by-wire Systemen usw. in Kauf genommen werden. Der TW-USM kann eine Leistung bis zu 50 W erreichen.

Multimassen Ultraschallmotor

Das Haupthindernis für höhere Leistung bei Wanderwellenmotoren ist die hohe Biegespannung, die zum Bruch des piezoelektrischen Materials führen würde. Dieses Problem wird größtenteils durch das neuartige Konstruktionsprinzip des Multimassen-Ultraschallmotors (MM-USM) reduziert, wobei die



duty ratios e.g. for autofocus in cameras, headrest adjustments for cars, counter torque for steering wheels in drive-by-wire systems etc. The TW-USM can achieve powers up to 50 W.

Multi-Mass Ultrasonic Motor

The main barrier for higher power of traveling wave-type motors is the high bending stress that would cause breaking of the piezoelectric material. This is largely reduced by the novel construction principle of the multi-mass ultrasonic motors (MM-USM), where the piezo elements have to resist only compressive stress [12]. The motor is de-

> signed for 1500 W at a speed of 340 rpm. It consists of four stator rings squeezing two rotor disks connected to the shaft, see Fig. 3. Each stator ring consists of eight metallic alternating blocks with multilayer piezoelectric ceramic actuators. This structure is excited at its resonance frequency. Each metallic block can oscillate in a tangential mode, which is a motion within the plane of the ring with a phase shift of 180° versus its neighbours. The structure including the four stators is also able to oscillate also orthogonally to the surface of the stator

rings and of the rotor disk (normal mode) at the same frequency, but with an appropriate phase shift. The superposition of normal and tangential oscillating modes results in an elliptical motion of the metallic blocks. The metallic blocks intermittently thrust the rotor disk by utilization of the frictional force between stator and rotor. Due to the large number of masses (32) operated in parallel produce a high torque up to 80 Nm. The generated power depends then on the resonant frequency of the piezo actuator and deflection in tangential direction of the metallic blocks. Due to the characteristics of the system the motor achieves a high torque at standstill. The MM-USM is qualified for

piezoelektrischen Komponenten nur der Druckspannung standhalten müssen [12]. Der Motor ist für eine Leistung von 1500 W bei einer Drehzahl von 340 U/min ausgelegt. Dieser besteht aus vier Statorringen und zwei mit einer Achse verbundenen Rotorscheiben. Jeweils eine Rotorscheibe wird zwischen zwei Statorringen zusammengedrückt (Bild 3). Jeder Statorring besteht aus acht Metallblöcken. Zwischen den Metallblöcken sind zwei

vielschichtige piezoelektrische keramische Aktoren angeordnet, die sich mit einer Seite am Gehäuse abstützen. Diese Struktur wird mit ihrer Resonanzfrequenz angeregt. Jeder Metallblock kann in der Tangentialrichtung schwingen, welche eine Bewegung innerhalb der Ringebene ist. Der benachbarte Metallblock schwingt mit einer Phasenverschiebung von 180°; also bewegen sich die Metallblöcke aufeinander zu oder voneinander weg. Die



Bild 4: Regelungsstruktur des MM-USM Fig. 4: Control structure: Power supply for high-power piezoelectric actuators

Metallblöcke sind auch in der Lage, mit der gleichen Frequenz in axialer Richtung zu schwingen. Die Piezoelemente in normaler Richtung müssen mit entsprechender Phasenverschiebung gegenüber der tangentialen Richtung angeregt werden. Die Überlagerung der normalen und tangentialen Schwingbewegungen führt zu einer elliptischen Bewegung der Metallblöcke. Die Metallblöcke treiben mit ihrer Reibschicht die Rotorscheiben periodisch an, indem sie die Reibkraft zwischen Rotor und Stator ausnutzen. Durch die hohe Anzahl der parallel arbeitenden Metallblöcke (32) entsteht ein hohes Drehmoment von bis zu 80 Nm. Die resultierende Leistung hängt von der Resonanzfrequenz der piezoelektrischen Aktoren und der Auslenkung der Metallblöcke in tangentialer Richtung ab. Aufgrund der hohen Reibkräfte erzielt der Motor im Stillstand ein hohes Drehmoment. Der MM-USM ist prädestiniert für direkte Antriebsanwendungen in Flugzeugen, Autos, Robotertechnik und für medizinische Messgeräte.

[3], [4], [5]. Thus, a solid experience on driving resonant-type piezoelectric actuators has been gained. As mentioned above, frequency, amplitude and phase of the exciting voltage need to be controlled in order to adjust torque, speed or position of the motor under investigation Fig. 4.

Harmonic elimination PWM techniques and an appropriate filter must be considered, if the excitation voltage should be subjected only by a minimum of harmonics to increase the lifetime of the piezo stacks [9], [10]. The challenge of an appropriate power supply design arises from following reasons:

- Due to the piezoelectric effect, the design of the output filter of a power supply is highly influenced by the mechanical oscillation system. A closer inspection reveals that the electrical behavior depends on the frequency-dependent interactions between the actuator and the load.
- Piezoelectric actuators are known to exhibit



direct drive applications as actuators for airplanes, cars, robotics and medical measurement apparatus.

Current research by LEA: Power supply for high-power piezoelectric actuators

For more than fifteen years LEA has been focusing on the development of power supplies for piezoelectric actuators and their model-based control

Aktuelle LEA-Forschungsprojekte: Stromversorgung für piezoelektrische Hochleistungsaktoren

Seit mehr als 15 Jahren richtet LEA die Aufmerksamkeit auf die Entwicklung von Stromversorgungen für piezoelektrische Aktoren und ihre modellbasierte Regelung [3], [4], [5]. In dieser Zeit hat sich das Fachgebiet LEA ein solides Fachwissen, was die resonant-typischen piezoelektrischen Aktoren in Antrieben anbelangt, angeeignet. Wie schon oben erwähnt wird die Frequenz, die Amplitude und die Phase der gespeisten Spannung genutzt, um das Drehmoment, die Geschwindigkeit oder die Position des anzutreibenden MM-USM zu regeln (Bild 4).

Harmonische eliminierende PWM Schalttechniken und entsprechende Filter müssen in Erwägung gezogen werden, falls die Erregerspannung nur ein Minimum an Oberschwingungen aufweisen darf, um die Lebensdauer der piezoelektrischen Elemente zu verlängern [9], [10]. Die Herausforderung, einen passenden Stromrichter zu entwerfen, ergibt sich aus folgenden Gründen:

- Infolge des piezoelektrischen Effekts wird der Entwurf des Ausgangsfilters durch das mechanische Schwingungssystem beeinflusst. Eine genauere Betrachtung macht deutlich, dass das elektrische Verhalten abhängig von dem interaktiven Zusammenwirken zwischen dem Aktor und der Last ist.
- Piezoelektrische Aktoren sind bekannt für ihr ausgeprägtes kapazitives Verhalten. Die piezoelektrische Kapazität soll ein Teil des Ausgangsfilters darstellen, jedoch unterliegt die Motorkapazität, die aus den parallelgeschalteten piezoelektrischen Elementen resultiert, großen Toleranzen und variiert stark mit der Temperatur - also mit den Betriebsbedingungen.
- Die Wirk- und Blindleistung wird durch den Stromrichter an dem piezoelektrischen Aktor bereitgestellt. Die hohe Schaltfrequenz führt zu hohen Schaltverlusten des Stromrichters und kann zu EMV Problemen führen. Deshalb hängen Leistungsverhältnis und Wirkungsgrad vom Arbeitspunkt des piezoelektrischen Aktors ab.

a distinct capacitive behavior. The piezoelectric capacitance should be an inherent part of the output filter. However, the motor capacitance originating from the large number of piezoelectric elements of the MM-USM varies with temperature thus is also dependent on operating conditions.

 Both the real power and reactive power are delivered by the power supply to the piezoelectric actuator. The high operating frequency results in high switching losses of the power supply and EMI issues might to be solved. Therefore, the power ratio and the efficiency depend on the working point of the piezoelectric actuator.

Over the last 15 years electronic power supplies for piezoelectric systems have been well studied and applied using different kinds of resonant converter concepts. A resonant inverter with seriesparallel resonant filter (LLCC-filter) shows advanced characteristics and best suited properties in respect to efficiency, stationary and dynamic behavior, and also to control and commissioning efforts. The drawbacks of these resonant inverters are the large volume, heavy and costly magnetic components of the resonant filter like the transformer and inductor, especially in case of driving piezoelectric actuators in the range of some kW.

Therefore, power converters which do not require heavy inductors are of great interest. Size and weight of the magnetic components could be reduced by a carrier-based PWM (CBM) converter with LC-filter. Investigations show that LC-PWM inverters are more suitable for weakly damped piezoelectric vibration systems such as bond sonotrodes, where none or small reactive power is delivered at the operating point by the inverter [14]. Thanks to the high switching frequencies, the inductivity L_s can be decreased significantly in comparison to those used in resonant filters [12]. This results in smaller and lighter components. However, the high switching frequency of PWM inverters consequently results in higher switching losses and might be in conflict with EMC issues.

To overcome these drawbacks, the proposed LLCC-PWM inverter was developed to excite the high-power piezoelectric actuator, where a LLCC-





Bild 5: Filter Topologien: a) LC-Filter; b) LLCC-Filter Fig. 5: Filter topologies: a) LC-filter; b) LLCC-filter

In den letzten 15 Jahren wurden elektronische Stromversorgungen für piezoelektrische Systeme gründlich erforscht und unterschiedliche Arten von Resonanzstromrichtern angewendet. Ein Resonanzstromrichter mit serien-parallelem Resonanzfilter (LLCC-Filter) zeigt vorteilhafte Eigenschaften und optimales Verhalten in Bezug auf Wirkungsgrad, stationäres und dynamisches Verhalten, sowie geringen Aufwand für Regelung und Inbetriebnahme. Die Nachteile dieser Resonanzstromrichter sind großvolumige, schwere und teure magnetische Komponenten des Resonanzfilters (Transformator und Induktivitäten). Das gilt besonders im Fall von piezoelektrischen Aktoren in leistungsstarken Antrieben.

Folglich stehen Stromrichter im großen Interesse, die keine großen Induktivitäten benötigen. Die Größe und das Gewicht der magnetischen Bauele-

mente können durch Sinus-Dreieck Modulierte (SDM) Stromrichter mit einem LC-Filter reduziert werden (Bild 5 a)). Bei Untersuchungen wurde nachgewiesen, dass die sogenannten LC-PWM Stromrichter für schwach gedämpfte piezoelektrische Vibrationssysteme wie Bond Sonotro- dB den geeignete sind, bei denen keine oder wenig Blindleistung im Arbeitspunkt vom Stromrichter bereitgestellt wird [14]. Im Vergleich zu den Resonanzfiltern kann durch die hohe Schaltfrequenz die Induktivität L_s erheblich verkleinert werden [12]. Das führt zu kleineren und leichteren Komponenten. Die hohe Schaltfrejedoch zu höheren Schaltverlus-

reiten.



filter circuit is utilized and operated in PWM controlled mode [1], [9], [10]. In order to utilize band-pass characteristics of the LLCC-filter, the switching angels of PWM eliminate selected number of harmonics (HEM). The switching angles are calculated off-line [11].

Fig. 6 presents the harmonics of inverter output voltage as they result from the harmonic elimination modulation (HEM) compared with a conventional carrier-based modulation (CBM). The magnitudes of the 3rd, 5th and 7th harmonic are very small, in comparison to CBM, using HEM. For higher order harmonics the CBM may generate lower amplitude than HEM. However, because these higher frequencies will be sufficiently suppressed by the LLCC filter characteristics thus, that the HEM method will result in a lower total harmonic distortion (THD) of actuator voltage u_{CP} (Fig.





ten und kann EMV Probleme be- Fig. 6: Comparison of carrier-based PWM (CBM) and harmonics elimination modulation PWM (HEM) displaying voltage gain function of the LLCC filter $|G(i \omega)|$



Durch Kombination des PWM Stromrichters mit einem LLCC-Filter für den Betrieb eines piezoelektrischen Hochleistunsaktors können die Nachteile beseitigt werden (Bild 5 b)) [1], [9], [10]. Um das Bandpassverhalten des LLCC-Filters auszunutzen, kann durch Berechnung der Schaltwinkel der PWM eine ausgewählte Anzahl von Oberschwingungen eliminiert werden (HEM). Die Schaltwinkel werden off-line berechnet [11].

Im Bild 6 wird die Ausgangsspannung u_{filter} des PWM Stromrichters mit den zwei unterschiedlichen Modulationsarten (SDM und HEM) anhand von harmonischen Oberschwingungen miteinander verglichen. Die Amplituden der 3., 5. und 7. Harmonischen sind sehr klein bei der HEM im Vergleich zu der SDM. Für die Harmonischen höherer Ordnung, erzeugt die SDM niedrigere Amplituden als die HEM. Da jedoch diese höheren Harmonischen durch die Eigenschaften des LLCC-Filters ausreichend gut gedämpft werden, führt die HEM-Methode zu einer niedrigeren gesamt harmonischen Verzerrung (THD) der Aktorspannung u_{CP} (Bild 6).

Die neuartige Lösung liefert bedeutende Vorteile, die zu einer Steigerung der Performanz der Spannungsversorgung führen:

- 1. Die Blindleistung des piezoelektrischen Aktors wird lokal kompensiert, indem die Induktivität L_p nah an dem Aktor angebracht wird.
- 2. Der Ausgangsfilter zeigt optimales Verhalten bei minimalem Volumen und Gewicht auf, verglichen mit den klassischen Resonanzumrichtern.
- 3. Die THD der Spannung am piezoelektrischen Aktor u_{cp} wird bei gleichbleibender Schaltfrequenz reduziert.

Der vorgeschlagene LLCC-PWM Umrichter wurde für den Antrieb eines hochleistungs-piezoelektrischen Flugzeugbremsaktors des von der EU finanzierten Projekts PIBRAC verwendet [2], [3], [4], [5], [7]. Andere mögliche Anwendungsbereiche der LLCC-PWM Umrichter sind: überlagerte Sonotroden mit Ultraschall-Bohren, Schneiden, Meißeln und Fräsen bei Werkzeugmaschinen oder das Zerstäuben für die Herstellung von feinkörnigem Puder. 6) as with CBM.

The novel solution offers significant advantages to improve the performance of the power supply as follows.

- 1. Reactive power of the piezoelectric actuator is compensated locally, by placing the inductor L_p close to the actuator.
- The output filter shows optimized performance at minimized volume and weight, compared to the classical resonant inverters.
- 3. THD of the piezoelectric actuator voltage u_{cp} is reduced without increasing the switching frequency.



Bild 7: LLCC-PWM Stromrichter Prototyp Fig. 7: LLCC-PWM inverter prototype

The proposed LLCC-PWM inverter was employed for driving a high power airborne piezoelectric brake actuator in an EC-funded project PIBRAC [2], [3], [4], [5], [7]. Other potential fields of application of LLCC-PWM inverters are: superimposed sonotrodes assisted ultrasonic drilling, cutting, chiselling, and milling of tooling machines or atomizers for the production of fine granular powder.



Veröffentlichungen

Publications

- R. Li, N. Fröhleke, C. Kauczor; "LLCC-PWM-Converter," Patent: PCT/DE2007/000773, filed under 10 2005 021 559.1, May 2006.
- [2] Homepage of the project PIBRAC, www.pibrac.com
- [3] R. Li, N. Fröhleke, H. Wetzel, J. Böcker, S. Ouchouche, E. Agostini, J.-T. Audren; "Power Supply and Control Scheme for an Airborne Piezoelectric Brake Actuator," Proc. of 10th International Conference on New Actuators, ACTUATOR 2006, Bremen, Germany, 2006
- [4] R. Li, N. Fröhleke, H. Wetzel, J. Böcker; "Power Supply and Control Scheme for an Airborne Piezoelectric Brake Actuator," International Power Electronics and Motion Control Conference 2006, IPEMC-2006 on August 13-16, Shanghai, China, 2006
- [5] H. Wetzel, N. Fröhleke, J. Böcker, S. Ouchouche, D. Bezanere, F. Cugnon; "*Modelling and control of a multi-mass ultrasonic motor for airborne applications,*" IECON-2006, November 7-10, Paris, France, 2006
- [6] R. Li, N. Fröhleke, J. Böcker; "Design and Implementation of a Power Inverter for a high Power Piezoelectric Brake Actuator in Aircrafts," 9th Brazilian Power Electronics Conference, Blumenau, Brazil, 2007
- [7] R. Li, N. Fröhleke, J. Böcker; "Analysis and Design of a Novel Three-Level LLCC Inverter supplying an Airbone Piezoelectric Brake Actuator," 38th Annual IEEE Power Electronic Specialists Conference, Florida, USA, 2007
- [8] H. Wetzel, R. Li, N. Fröhleke, J. Böcker; *"Piezoelektrische Flugzeugbremse"*, Workshop Entwurf mechatronischer Systeme 2007, Paderborn, Deutschland, 2007
- [9] R. Li, M. Lönneker, N. Fröhleke, J. Böcker; "Design of Power Supply for driving High Power Piezoelectric Actuators," IAS, Edmonton, Canada, 2008
- [10] R. Li, N. Fröhleke, J. Böcker; "*LLCC-PWM Inverter for driving High Power Piezoelectric Actuators,*" EPE-PEMC, Poznan, Poland, 2008
- [11] J. Sun; "Optimal Pulsewidth Modulation Techniques for High-Power Voltage-Source Inverters", Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 21, Nr. 185, VDI Verlag, Düsseldorf, 1995
- [12] T. Schulte; *"Stromrichter- und Regelungskonzepte für Ultraschall-Wanderwellenmotoren"*, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 21, Nr. 363, VDI Verlag, Düsseldorf, 2004
- [13] J. Maas; "Modellierung und Regelung stromrichtergespeisten Ultraschall-Wanderwellenmotoren", Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 21, Nr. 278, VDI Verlag, Düsseldorf, 1998
- [14] C. Kauczor, N. Fröhleke; "Inverter Topologies for Ultrasonic Piezoelectric Transductors with High Mechanical Q-Factor," Proc. of IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC04), Aachen, Germany, 2004



FPGA-basierte Motorregelung von M.Sc. Shashidhar Mathapati

Das Ziel dieses Artikels ist es, die Vorteile von FPGAs als Plattform für die Regelung von Drehstromantrieben im Vergleich zu klassischen Regelungen auf digitalen Signalprozessoren (DSP) aufzuzeigen. Zunächst sollen als Basis für die Erörterung einige wichtige Eigenschaften der auf dem Signalprozessor basierenden Regelung aufgegriffen werden.

Die kaskadierte Regelung ist bei Drehstromantrieben weit verbreitet. Der innere Regelkreis bildet dabei die Stromregelung, die meist aus zwei parallelen Kreisen besteht. Dadurch können sowohl die flussbildende als auch die drehmomentbildende Komponente des Stromes unabhängig voneinander geregelt werden (Bild 1). Die Umsetzung dieses Regelkreises erfolgt üblicherweise auf einem digitalen Signalprozessor oder Mikrokontroller (MC), wobei das Regular-Sampling-Verfahren für die zeitdiskrete Regelung als Stand der Technik gilt [2][3]. Bei diesem Verfahren werden Pulsweitenmodulation, Messwerterfassung und Berechnung der Reglerausgangsgröße, wie in Bild 2 dargestellt, synchronisiert.



Bild 2: Zeitdiskrete Umsetzung des Regular-Sampling-Verfahrens

Fig. 2: Regular sampled discrete-time realization

Die Reglerabtastfrequenz f_c kann dabei gleich oder doppelt so groß wie die Frequenz der Pulsweitenmodulation f_s sein. Im Fall $f_c=f_s$ wird pro Pulsperiode an einem der Scheitelwerte des Modulationsträgers und bei $f_c=2f_s$ an beiden Scheitelwerten abgetastet. Dies wird in Bild 3 verdeutlicht. Die Schaltfrequenz f_s liegt typischerweise bei Standardindustrieantrieben im Bereich von 5-8 kHz (durch die Schaltverluste begrenzt). Somit beträgt die Reglerabtastfrequenz f_c im zweiten Fall 10-16 kHz.

Die sequentielle Verarbeitung der Regelungsalgorithmen auf einem DSP oder MC ist mit einer Ver-

FPGA-Based Motor Control by M.Sc. Shashidhar Mathapati

This article intents to point out the advantages of Field Programmable Gate Array (FPGA) as realization platform for AC motor control in comparison to classical control on Digital Signal Processors (DSP). As a basis for that discussion, some important details of DSP-based control shall be revisited first.

Cascaded current control is very well known for AC motor drives, the inner control loop objective is the current, usually consisting of two parallel loops to control the flux and torque generating current components independently (Fig.1).



Bild 1: Kaskadierte Motorregelung Fig. 1: Cascaded motor control

Traditionally the inner current controller is realized on a DSP or microcontroller (MC). The state of the art of discrete-time control realization is the well known Regular Sampling approach [2][3]. With this method, pulse width modulation (PWM), data and controller sampling are synchronized as shown in Fig. 2.

To implement the Regular Sampling, the controller sampling frequency f_c can be same or twice as the PWM frequency f_s . If $f_c=f_s$, the sampling is performed once at either of the peak of carrier in one PWM period and for $f_c=2f_s$ sampled at peak of either triangles of PWM period. The same can be understood better from the following Fig. 3. The typical switching frequency f_s of standard industrial drives is in the range of 5-8 kHz (limited due to switching losses) so that the controller sampling f_c is 10-16 kHz.

The sequential execution of control algorithms on a DSP or MC is associated with computational delay, which is one sampling step T_c with Regular Sampling. An additional delay of $T_c/2$ is due to the


zögerung infolge der Rechenzeit verbunden, die beim Regular-Sampling-Verfahren einer Abtastperiode T_c entspricht. Eine weitere Verzögerung um $T_c/2$ kommt durch das Abtast-Halte-Glied (S/H) (Bild 2) zustande, sodass die gesamte Verzugszeit T_{Σ} bei 1,5 T_c liegt. Diese Verzugszeit wird möglicherweise durch weitere Einflüsse wie Messwertfilterung erhöht.

Die PWM selbst (siehe Bild 2) führt zu keiner Phasenverschiebung oder Verzögerung und kann, wie aus Bild 4 hervorgeht, als Verstärkung mit dem Faktor eins in einem linearisierten Systemmodell betrachtet werden. Um den Entwurf und die Analyse einfacher zu gestalten sowie zeitkontinuierliche Regelungsentwurfsverfahren anwenden zu können, wird die gesamte Verzugszeit als Verzögerungsglied 1. Ordnung (P-T1 Glied) mit der Summenzeitkonstanten T_{Σ} angenähert (Bild 5).



Bild 4: Entsprechendes Modell für den Reglungsentwurf Fig. 4: Equivalent model for control design

Um die Sprungantwort des geschlossenen Stromregelkreises zu analysieren, wird ein PI Regler gemäß der bekannten Methode der Polkompensation entworfen (Betragsoptimum). Das Entwurfsverfahren ist sehr einfach: man wählt die Reglernachstellzeit $T_N=T_p$, um den Pol der Regelstrecke zu kompensieren. Dann wählt man die Reglerverstärkung K_{pN} so, dass der Regelkreis eine Dämpfung von $\zeta = 1/\text{sqrt}(2)$ aufweist. Das entspricht einer Verstärkung von $K_{pN} = (RT_N)/(2T_O)$. Mit dieser Wahl von Verstärkung und Zeitkonstante vereinfacht sich die Übertragungsfunktion des geschlossenen Regelkreises zu (1).

$$T(s) = \frac{1}{s^2 2T_{\Sigma} + s 2T_{\Sigma} + 1} \approx \frac{1}{s 2T_{\Sigma} + 1}$$
(1)

Aus der Gleichung geht hervor, dass die Zeitkonstante des geschlossenen Regelkreises $2T_{O}$ beträgt. Die Bandbreite ist umgekehrt proportional zur Verzugszeit des Systems. Die Abtastfrequenz S/H mechanism (Fig. 2) so that the total dead time T_{Σ} is then 1.5 T_{cr} possibly increased by further effects as measurement filtering.





The PWM (shown in Fig. 2) itself does not introduce any phase shift or the delay in the control system so that it can be considered as unity gain in an equivalent linearized system model as shown in Fig. 4. To make the design and analysis simpler and apply continuous-time control design procedure, the whole dead time is approximated as firstorder (P-T1 type) lag with time delay equal to T_{Σ} , and is shown in Fig. 5.



Bild 5:Angenähertes ModellFig. 5:Approximated model

To analyse closed loop current response, PI controller is designed with the popular pole-zero cancellation method (Betragsoptimum). The design procedure is very simple, select controller reset time $T_N=T_p$ to cancel the pole of the plant and then select controller gain K_{pN} such that the closed-loop response has damping $\zeta = 1/\text{sqrt}(2)$. Then correspondingly, gain $K_{pN}=(RT_N)/(2T_{\Sigma})$.

With these gain and time constant the closed loop transfer function reduces to (1)



entspricht demnach z.B. bei einer Schaltfrequenz von 16 kHz (momentan Industriestandard) einer Verzugszeit von $T_{\Sigma} = 1,5T_c = 93,75 \ \mu$ s. Damit beträgt die höchste erzielbare Bandbreite (-3dB) 830 Hz (5,2k rad/sec).

Es wird deutlich, dass die erzielbare Bandbreite sogar im Falle einer hohen Abtastfrequenz nur wenige 100 Hz beträgt. Dies kann bei Standardantrieben ausreichen, genügt jedoch nicht bei hoch dynamischen Servo-Antrieben, z.B. in der Halbleiterfertigung, in der Druckindustrie, usw.

Die geringe Bandbreite führt zu niedriger Dynamik beim Führungsverhalten, aber auch zu geringer Störunterdrückung bei höheren Frequenzen, und insbesondere zu geringer Unterdrückung der Strom- und Drehmomentschwankungen, die auf die nichtsinusförmige induzierte Spannung (EMK) zurückzuführen sind. Dies kann die Ausnutzung des Motors und des Stromrichters verringern, weil diese meist im Falle sinusförmiger Ströme maximal ist.

Diese Probleme können durch Erhöhung der Bandbreite des Stromregelkreises überwunden werden. Aus Gleichung (1) geht hervor, dass die Bandbreite des Reglers direkt mit der Verzugszeit T_{Σ} des Systems zusammenhängt. Um die Dynamik des Führungsverhaltens als auch die Ausnutzung der installierten Leistung bei Servo-Antrieben zu optimieren, muss demnach die Verzugszeit T_{Σ} des Systems gesenkt werden. Wenn wir um einige Jahrzehnte bis zu den frühen 1970ern zurückschauen, basierte die Realisierung von Antriebsregelungen meist auf Analogschaltungen (Operationsverstärker). Solch eine Realisierung führt zu keiner Verzugszeit im System, sodass die erreichbare Bandbreite hoch, theoretisch sogar unendlich ist. Jedoch hat die analoge Realisierung auch zahlreiche Nachteile wie Offset, Drift, Nichtlinearitäten, usw. Daher ist es nicht unser Ziel, zurück zur analogen Realisierung zu gehen, sondern eine vergleichbare Dynamik bei einer digitalen Realisierung zu erzielen.

Mit einer geringen Rechenzeit (idealerweise Null) und einem PWM Modul welches kontinuierlich variierende Spannungssollwerte akzeptiert, ist eine digitale Realisierung möglich, die im Vergleich zur analogen Variante eine ähnlich große Dynamik er-

$$T(s) = \frac{1}{s^2 2T_{\Sigma} + s 2T_{\Sigma} + 1} \approx \frac{1}{s 2T_{\Sigma} + 1}$$
(1)

From the above equation, the time constant of the closed loop response is $2T_{\Sigma}$. It means that the band width is inversely proportional to the dead time of the system. E.g. with the sampling frequency of 16 kHz (standard at this moment in drives industry) corresponds to a dead time $T_{\Sigma}=1.5T_{c}=93.75$ µs. With this, the achievable maximum bandwidth (-3dB) is 830 Hz (5.2k rad/sec).

It is clear that, even with such a high sampling frequency achievable bandwidth is only few 100 Hz. This may be sufficient for standard drives, but it is just insufficient for highly performing servo drives e.g. in semiconductor process industry, printing industry etc.

This limited bandwidth results in low dynamics of reference signal tracking, but also in low disturbance rejection for higher frequencies, particularly in poor suppression of current and torque harmonics due to non-sinusoidal back EMF. This may reduce utilization of motor and converter, because good utilization is mostly ensured with sinusoidal currents.

The above mentioned problems can be overcome by increasing the closed-loop bandwidth of current controller. From (1) we have learnt that the bandwidth of the controller is directly connected to the dead time T_{Σ} of the system. In order to achieve the best performance from these servo drives, it is essential to focus mainly on reducing the dead time T_{Σ} in the system. If we look back some decades to early 1970's, the most of the control realization was based on analog circuits (op-amps). Such analog realization does not introduce any dead time in the system, so that the achievable bandwidth is high, theoretically even infinite. However, analog realization has its own drawbacks such as offset, drift, non-linearity etc. Hence it is not desired to get back to analog, but to achieve the performance of analog realization in digital domain.

With the minimized (ideally zero) computation time, and allowing the PWM module to accept the continuously varying reference signal, it is possible to achieve very close to continuous-time (analog)



zielen kann. Es sind zwei Umsetzungsmöglichkeiten denkbar. Zum Einen ist es möglich, einen Highend DSP mit einer PWM ohne S/H (möglicherweise Software-basierte PWM) zu nutzen. Zum Anderen ist eine Realisierung auf einem FPGA denkbar. Die FPGA-basierte Umsetzung ist praktikabler, da FPGAs aufgrund der Möglichkeit zur parallelen Verarbeitung eine deutliche Reduktion der Rechenzeit ermöglichen und zudem kostengünstiger sind als schnelle Highend DSPs. Seit einigen Jahrzehnten sind FPGAs in der industriellen Antriebstechnik bekannt, ihre Verwendung war bisher jedoch wegen der hohen Kosten nur auf spezielle und kundenspezifische Funktionen beschränkt. Die Kostensenkung in den letzten Jahren machte den Einsatz von FPGAs allerdings auch zu einer Option für Serienanwendungen. Die inhärente Eigenschaft der parallelen Verarbeitung von FPGAs ermöglicht eine Implementierung von mehreren/komplexen Regelungen für Einzel- oder Mehrmotorantriebe auf einer einzelnen Regelungsplattform. Zudem ermöglichen es FPGAs, die Bitbreite und damit die notwendige numerische Genauigkeit vorzugeben. Ein vergleichbares Vorgehen auf einem DSP gestaltet sich wesentlich aufwändiger (Festpunktarithmetik).

Eine FPGA-basierte Reglerimplementierung führt zu einer Rechenzeit von lediglich einigen 100 ns, was einer zeitkontinuierlichen Signalverarbeitung sehr nahe kommt. Dadurch entfällt die aus der Totzeit resultierende P-T1 Verzögerung (Bild 5) und die erreichbare Bandbreite kann sehr große Werte annehmen (nahezu unendlich). In der Praxis sollte die Bandbreite die Schaltfrequenz des Wechselrichters jedoch nicht überschreiten, da sonst sehr hohe PWM-Störanteile entstehen würden. Natürlich müssen Verzögerungen bei der Messwerterfassung (aufgrund von Filterung) berücksichtigt werden. Um die Bandbreite eines zeitkontinuierli-



Bild 6: Entsprechendes Modell für den Regelungsentwurf



performance on a digital platform. To realize this we have two ways, firstly to use a very high speed DSP with the PWM without S/H (possibly with software-based PWM). Second option is to realize it on a FPGA. The FPGA-based realization is more realistic and feasible due to its real parallel processing capabilities and as well its cost-effective nature compared to the high-end DSP approach. FPGAs are known in the drives industry since few decades, but their utilization was restricted only to special and customized functions due to its high cost. The reduction in the price in recent years made FPGAs very feasible to utilize them in drive control applications. The inherent feature of FPGAs which is the property of parallel execution will make ease of handling and implementation of multiple/complex control schemes for a single-motor or a multi-motor application on a single control platform. Furthermore, FPGAs allows "bit width" variability to properly design the required numeric accuracy, which is very laborious to be handled with DSPs (fixed point).

A controller running on FPGA will have a computation delay of only few 100 ns, which is very close to continuous in time execution. If that is accepted, then the P-T1 lag due to dead time no more exists in Fig. 5 and hence the achievable bandwidth becomes very high (close to infinity). In practice, the bandwidth should not exceed the switching frequency of inverter. Otherwise very high PWM noise would result. Of course, current measurement delays (due to filtering) have to be taken into account. Here, to demonstrate and compare the performance of continuous-time controller with the sampled controller, we consider the current measurement delay (P-T1 filter) of 20 µs (typically in the range of 10-20 μ s). The equivalent control model for such a continuous-time controller is shown in Fig. 6. In order to keep the disturbance due to the PWM well within the limits, we design the controller by limiting the bandwidth to 4 kHz (25k rad/s), and hence no PWM noise is taken into consideration in Fig. 6. The theoretical step and the Bode responses for this control are shown in Fig. 7. For comparison, the response with sampled control (16 kHz) is also shown in Fig. 7. From the plots (Fig. 7) one can easily identify that the continuous-time controls bandwidth is almost four times of the sampled controller.



chen Reglers mit der eines Abtastreglers zu vergleichen und deren Unterscheid zu demonstrieren, nehmen wir eine Strommessverzögerung (P-T1 Filter) von 20 µs an (typischerweise im Bereich von 10-20 µs). Das entsprechende Modell des Regelkreises für den Fall einer zeitkontinuierlichen Regelung ist in Bild 6 zu sehen. Um die PWM-Störanteile zu begrenzen, stellen wir den Regler so ein, dass die Bandbreite auf 4 kHz (25k rad/s) reduziert wird. Deshalb werden die PWM-Störanteile in Bild 6 nicht mehr berücksichtigt. Die für diese Regelung theoretisch bestimmte Sprungantwort und das dazugehörige Bode-Diagramm werden in Bild 7 dargestellt. Zum Vergleich ist auch das Verhalten einer Abtastregelung (16 kHz) zu sehen. Aus der Darstellung (Bild 7) wird deutlich, dass die Bandbreite der zeitkontinuierlichen Regelung fast vier mal so hoch ist wie die der Abtastregelung.

Um das theoretisch berechnete Führungsverhalten, das in Bild 7 dargestellt ist, anhand von Messungen zu demonstrieren, wurde die Abtastregelung sowie die zeitkontinuierliche Regelung auf einem Xilinx Virtex-2 FPGA realisiert. Die Schaltfrequenz beträgt in beiden Fällen 8 kHz und die Reglerabtastfrequenz liegt bei 16 kHz.

Der Versuch wurde bei konstanter Drehzahl durchgeführt, die durch eine Lastmaschine sicher gestellt wurde. Die Sprung- und Frequenzantworten beider Regelungen sind in Bild 8 bzw. 9 dargestellt. Es wurde jeweils ein Stromsollwertsprung von 0 auf 0,5 pu bei einer Drehzahl von 0,16 pu (um sicherzustellen, dass die Spannungsgrenze nicht erreicht wird) vorgegeben. Wie aus Bild 7 und 8 hervorgeht, stimmen die zeitlichen Verläufe der Sprungantworten annähernd überein. Der Versuch wird aufgrund der mechanischen Einschränkungen am Versuchsstand nur bis zu 20k rad/s ausgeführt. Auch in Bild 9 stimmen die Ergebnisse weitestgehend mit denen in Bild 7 überein. Ein weiterer zu vergleichender Aspekt ist die gesamte harmonische Verzerrung (THD) der Strangströme des Motors, da diese einen anschaulichen Eindruck der PWM-Störanteilen vermittelt. Der Vergleich ist in Bild 10 dargestellt. Die harmonischen Anteile und die Verzerrung wurden bei 0,5 pu des Nennstromes berechnet. Aus diesen Ergebnissen geht hervor, dass die zeitkontinuierliche Regelung gegenüber der Abtastregelung eine höhere Dynamik und eine geringere THD der Strangströme aufweist.



Bild 7: Theoretische Performanzbestimmung Fig. 7: Theoretical performance evaluation

To demonstrate theoretical performance seen in Fig. 7 experimentally, we have realized the sampled and continuous-time current controller on Xilinx Virtex-2 FPGA. The switching frequency in both cases is fixed at 8 kHz and the sampling frequency for the sampled controller is at 16 kHz.

The experiment was carried out at constant speed by means of load machine. The step and frequency response of sampled and continuous-time controllers are shown in Fig. 8 and 9 respectively. For the step response, the current command has changed from 0 to 0.5 pu at 0.16 pu speed (to ensure voltage does not saturate). Observing Fig. 7 and 8, step response timings match closely. Coming to frequency response, shown in Fig. 9, test is carried out only up to 20k rad/s due to mechanical limitations at the test bed. Here also results matches more or less with Fig. 7. One more important aspect to be compared is, Total Harmonic Distortion (THD) of motor line currents, because that will





Bild 8: Sprungantwort Stromregelung 0 bis 0,5 pu Fig. 8: Step response current command 0 to 0.5 pu

Zusammenfassung

In diesem Aufsatz wurde dargestellt, dass eine zeitkontinuierliche Regelung, die auf einem FPGA implementiert ist, den Abtastregler in den meisten Antriebsaspekten übertrifft. Einige wichtige Aspekte sind im Folgenden aufgelistet:

- Die Dynamik ist sehr beeindruckend und deutlich besser als bei Abtastreglern (siehe Tabelle 1). Die zeitkontinuierliche Regelung weist ein besseres Führungsverhalten und eine bessere Störunterdrückung auf.
- Die Verzerrung der Strangströme ist im Vergleich zu Abtastreglern deutlich geringer.
 Der Motor ist im Betrieb leiser und die Verluste sind geringer.



Bild 10: Vergleich der gesamt harmonischen Verzerrung (THD) im Motorstrom Fig. 10: Comparison of THD in motor current



Bild 9: Frequenzgang bei geschlossenem Regelkreis

Fig. 9: Closed-loop frequency response

give the idea of PWM noise. The comparison is shown in Fig. 10, the harmonic components and the distortion are calculated at 0.5pu rated current of the motor. From these experimental results it is evident that the continuous-time controller's quality of performance in terms of dynamics and THD of motor current is well ahead of sampled controller.

Abstract

In this article we have seen that the continuoustime controller which is realized on an FPGA can outperform the sampled controller in most of the drive aspects, some of the important ones are listed below,

 The dynamic performance is very impressing and class ahead compared to sampled controllers; hence better reference tracking and

	Continuous controller	Sampled controller	dis
Bandwidth	4 kHz	950 Hz	

Tabelle 1: Vergleich der BandbreitenTable 1: Comparison of bandwidth

turbance rejection

- The distortion level in motor line currents is considerably less compared to sampled controllers; quite in operation and lower losses in motor
- With high achievable bandwidth of the controller it is possible to ensure the sinusoidal currents even with the non-sinusoidal back



 Durch die hohe erzielbare Bandbreite, ist es möglich sinusförmige Stromflüsse sogar bei nicht-sinusförmiger induzierter Spannung (EMK) zu gewährleisten. Das impliziert eine bessere Ausnutzung des Umrichters.

Alle Vorteile können ohne Erhöhung der Umrichterschaltfrequenz erzielt werden. Der Aufwand für die Entwicklung der FPGA-basierten Regelungsplattform ist gering. Im Wesentlichen bedarf es nur eines Austauschs des DSP (für den Stromregler) durch einen FPGA. Die Entwicklung der Steuerlogik ist auch sehr einfach, da die FPGA-Hersteller selbst leicht handhabbare und effiziente Entwicklungswerkzeuge liefern. Es ist anzunehmen, dass auf Grund der genannten Vorteile die FPGAs die DSPs sehr bald in der Antriebstechnik ersetzen werden. EMF in the motor; better utilization of power converter is possible

All these improvements are achieved without increasing the switching frequency of the inverter. The effort for the development of FPGA based control platform is not much, essentially the same platform can be used just by replacing the DSP (for current controller) with an FPGA. Control logic development is also very simple because manufactures them self provide the easy to use and efficient tools. Due to all these advantages it is expected that FPGAs will replace DSPs in drive control platforms in very near future.

Veröffentlichungen

Publications

- [1] W. Leonhard; "Introduction to Control Engineering and Linear Control Systems," Springer-Verlag 1976 (translated from German)
- [2] R. Gabriel, W. Leonhard, C.J. Noedby; "Field-Oriented control of a standard AC motor using microprocessor," IEEE Trans. IA, 1980
- [3] J. Böcker; "Controlled Three-Phase Drives," Lecture notes LEA, Paderborn University, Germany, 2009
- [4] J. Böcker; "Discrete-Event Converter Control," EPE 03, Toulouse, France, 2003
- [5] J. Böcker; "Tolerance Band Controller for a Three-Level Four-Quadrant Converter Including DC Link Balancing," PESC'04, Aachen, Germany, 2004
- [6] J. Böcker; "Advanced Hysteresis Control of Brushless DC Motors," German-Korean Symposium, Aachen, Germany, 2004
- [7] S. Mathapati, J. Böcker; "Implementation of Dynamically Reconfigurable Control Structures on a Single FPGA Platform," European Power Electronics conference, Alborg, Denmark, 2007
- [8] B. Schulz, C. Paiz, J. Hagemeyer, S. Mathapati, M. Porrmann, J. Böcker; "*Run-Time Reconfiguration of FPGA-Based Drive Controllers*," European Power Electronics conference, Alborg, Denmark, 2007



Entwurf und Betrieb hybridelektrischer Fahrzeugantriebe von Dipl.-Ing. Tobias Knoke

Hybrid-elektrische Fahrzeugantriebe bestehen aus einer Kombination eines Verbrennungsmotors mit einer oder mehreren elektrischen Maschinen und optional einem Energiespeicher. Durch diese Kombination können unter anderem Verbesserungen beim Verbrauch und den Emissionen erreicht werden. Die erzielten Verbesserungen hängen wesentlich vom Entwurf und Betrieb des Fahrzeugantriebs ab. Das Fachgebiet beschäftigt sich mit Methoden für den optimalen Entwurf und Betrieb hybridelektrischer Fahrzeugantriebe. Die Untersuchungen erfolgen u. a. am Beispiel von Abfallsammelfahrzeugen, die wegen der häufigen Brems- und Beschleunigungsvorgänge ein besonders großes Potenzial bieten.

Für Entwurf und Betrieb solcher Fahrzeugantriebe sind drei prinzipielle Fragestellungen zu beantworten:

- 1. Wie soll die Struktur aussehen? (Anzahl, Art und Anordnung der Komponenten im Antriebsstrang)
- Wie sollen die verwendeten Komponenten bemessen werden? (maximale Leistung des Verbrennungsmotors, Bemessungsleistung der elektrischen Antriebe, Energieinhalt und Leistung des Energiespeichers)
- Wie soll die geforderte Antriebsleistung auf die verschiedenen Komponenten aufgeteilt werden? (Betriebsstrategie)

Entwurf der Struktur

Für hybrid-elektrische Fahrzeugantriebe sind zahlreiche Strukturen bekannt, wie z. B. Serienhybrid, Parallelhybrid und leistungsverzweigter Hybrid. Darüber hinaus gibt es sowohl für die Art der verwendeten Komponenten, als auch deren Anzahl und Anordnung im Antriebsstrang eine Vielzahl weiterer Möglichkeiten. Aufgrund dieser Vielzahl ist eine detaillierte Analyse aller Optionen (z. B. Bewertung des Verbrauchs durch Simulationsrechnungen) nicht möglich. Der Entwurf erfolgt daher häufig auf Grundlage verschiedener funktioneller Kriterien. Dabei wird für alle betrachteten Struktur-



Design and Control of Hybrid Electric Vehicles by Dipl.-Ing. Tobias Knoke

Hybrid electric vehicles traction drives consist of a combination of a combustion engine with one or several electrical machines and optionally an electrical energy storage. With this combination improvements concerning fuel consumption and emissions can be achieved. This improvements strongly depend on the design and control of the hybrid vehicle. The department is focused on methods for the optimal design and control of hybrid vehicles. One point of our research are e.g. refuse collector vehicles which provide full potential for analysis because of the frequent brake and acceleration applications where high savings can be achieved.

There are three basic problems to be solved concerning design and control of hybrid vehicles:

- How is the structure going to look like? (number, type and composition of components in the drive train)
- How are the components that are used going to be sized? (maximum power of the combustion engine, rated power of the electrical drives, energy content and rated power of the energy store)
- How should the required drive power distributed to the different components (control strategy)

Structural Design

Numerous structures are well-known for hybrid electric vehicles, such as e.g. series hybrid, parallel hybrid or power split hybrid. Furthermore, there are lots of additional possibilities, both for the different component types and their number and structure in the drive train. Due to this multitude, an detailed analysis of all options (e.g. evaluation of fuel consumption by means of simulation calculations) is not possible. Therefore, the design often takes place on a basis of different functional criteria. Thereby, every criterion is evaluated for all structural alternatives that are considered. In order to prioritize every single criterion, one can add weights to them. The structure with the best total

alternativen die Erfüllung jedes Kriteriums bewertet. Um die einzelnen Kriterien zu priorisieren, können diese mit Gewichten versehen werden. Die Struktur mit der besten Gesamtbewertung wird dann gewählt.

Für das Abfallsammelfahrzeug sind zwei wesentliche Kriterien zu berücksichtigen:

- Um das Verbrauchseinsparpotenzial, das sich durch die häufigen Brems- und Beschleunigungsvorgänge ergibt, zu nutzen, muss es möglich sein, einen Teil der anfallenden Bremsleistung zu rekuperieren.
- 2. Der Hydraulikmotor des Pressmüllaufbaus muss elektrisch angetrieben werden können.

Eine vorteilhafte Struktur, mit der sich sowohl die Rekuperation von Bremsleistung, als auch der elektrische Betrieb des Pressmüllaufbaus realisieren lassen, ist in Bild 1 dargestellt (Parallelhybrid).



- Bild 1: Strukturbild des hybrid-elektrischen Antriebsstrangs (ICE: Verbrennungsmotor, HM: Hydraulikmotor, EM: elektrische Maschine, INV: Umrichter, ESS: elektrischer Energiespeicher, GB: Getriebe, DG: Differenzial)
- Fig 1: Structure of the hybrid drive train (ICE: combustion engine, HM: hydraulic motor, EM: electrical machine, INV: inverter, ESS: electrical energy store, GB: gearbox, DG: differential gear)

Bemessung der Komponenten

Grundlage für die Bemessung der Komponenten des Antriebsstrangs sind Anforderungen, die an das Fahrzeug gestellt werden. Das sind z. B. die maximale Geschwindigkeit bei einer gegebenen rating can then be chosen.

There are two major criteria to be considered for the refuse collector vehicle:

- 1. In order to benefit from the consumption savings which result from the frequent braking and acceleration, it has to be possible to recuperate a part of the brake power.
- 2. The hydraulic motor of the collector unit has to be operated electrically.

In Fig. 1, a beneficial structure is shown with which it is possible to realize both the recuperation of brake power and also the electrical operation of the collector unit (parallel hybrid).

Sizing of Components

The basis for the sizing of the drive train components are requirements which the vehicle has to fulfill. These are e.g. the maximum speed at a given incline, the maximum acceleration, the maximum climbing power and the range in the purely electrical driving operation. Basically, there is a distinction between heuristic and optimized approaches. Heuristic approaches follow the expected maximal and average power requirement and often lead to surprisingly good results. As shown in Fig. 1, fuel consumption savings of up to 30% can be made, compared to a conventional collector vehicle (see also Fig. 2). However, the additional components of the hybrid drive train lead to 4% higher vehicle weight which has already been considered in the fuel consumption calculation.

In order to use the power train's full potential, an optimal sizing of the components is necessary. The sizing can be regarded as a mathematical optimization problem. The requirements which are to be fulfilled by the vehicle are formulated as constrains of the optimization problem. Objective functions which should be minimized are e.g. fuel consumption, emissions, vehicle weight and costs. The optimal sizing requires scalable models of the drive train's components as they are shown in [2]. In Table 1 the results of a heuristic sized hybrid refuse collector vehicle are contrasted with those of an optimal sized one. By means of an optimized sizing additional improvements are possible, both concerning the fuel consumption (-10,68%) and the vehicle weight (-4,32%). The improvements



Steigung, die maximale Beschleunigung, die maximale Steigfähigkeit und die Reichweite im rein elektrischen Fahrbetrieb. Grundsätzlich kann bei der Bemessung zwischen heuristischen und optimalen Ansätzen unterschieden werden. Heuristische Ansätze orientieren sich an dem zu erwartenden maximalen und mittleren Leistungsbedarf und führen häufig zu überraschend guten Ergebnissen. Wie in [1] dargestellt, lassen sich im Vergleich zu einem konventionellen Sammelfahrzeug Verbrauchseinsparungen von bis zu 30% erzielen (s. auch Bild 2). Allerdings führen die zusätzlichen Komponenten des hybriden Antriebsstrangs zu einem um 4% höheren Fahrzeuggewicht, welches allerdings bei der Verbrauchsberechnung berücksichtigt wurde.

Um das volle Potenzial des Antriebsstrangs zu nutzen, ist eine optimale Bemessung der Komponenten notwendig. Dabei kann die Bemessung als mathematisches Optimierungsproblem aufgefasst werden. Die an das Fahrzeug gestellten Anforderungen werden als Nebenbedingungen des Optimierungsproblems formuliert. Zu minimierende Zielfunktionen sind z. B. der Verbrauch, die Emissionen, das Fahrzeuggewicht und die Kosten. Die optimale Bemessung erfordert skalierbare Modelle der Komponenten des Antriebsstrangs, wie sie z. B. in [2] dargestellt sind. In Tabelle 1 sind die Ergebnisse einer heuristischen und einer optimalen Auslegung eines hybriden Abfallsammelfahrzeugs gegenübergestellt. Durch die optimale Bemessung sind zusätzliche Verbesserungen sowohl beim Verbrauch (-10,68%), als auch beim Fahrzeuggewicht (-4,32%) möglich. Die Verbesserungen resultieren im Wesentlichen aus der kleineren Aus-

legung (Downsizing) des Verbrennungsmotors.

Entwurf der Betriebsstrategie

Für hybrid-elektrische Fahrzeugantriebe wird eine Betriebsstrategie benötigt, die die geforderte Leistung auf die verschiedenen Komponenten des Antriebsstrangs aufteilt. Die Betriebsstrategie kann dabei verschiedene Ziele, z. B. die Minimierung des Verbrauchs, verfolgen. Betriebsstrategien können in optimale, suboptimale und heu-



mainly result from the downsizing of the combustion engine.



Fig. 2: Fuel consumption and mass of the conventional collector vehicle in comparison to the heuristic and optimal sized hybridelectric collector vehicle

Design of the Control Strategy

For hybrid-electric vehicles a control strategy is needed for distributing the required power to the different components of the drive train. At the same time the control strategy can have different objectives, e.g. the reduction of the fuel consumption. Control strategies can be divided into optimal, sub-optimal and heuristic strategies. With reference to the optimal control strategy, the design of the control strategy can be regarded as an

	Heuristische Bemessung	Optimale Bemessung	Veränderung
Verbrauch	5,90 l/h	5,27 l/h	-10,68%
Leermasse	13.534 kg	12.950 kg	-4.32%
Verbrennungsmotor Leistung Masse El. Maschine Leistung Masse	265 kW 900 kg 100 kW 102 kg	115 kW 392 kg 195 kW 198 kg	-56,60% -56,44% 95.00% 94.12%
Energiespeicher Kapazität Masse	9,75 MJ 432 kg	5.85 MJ 259 kg	-40.00% -40.05%

Tabelle 1: Vergleich heuristischer und optimaler Bemessung Table 1: Comparison of heuristic and optimal sizing

ristische Strategien unterteilt werden. Bei optimalen Betriebsstrategien wird der Entwurf der Betriebsstrategie wiederum als Optimierungsproblem aufgefasst. Die Lösung des Optimierungsproblems erfordert aber die Kenntnis des zukünftigen Antriebsleistungsbedarfs. Optimale Betriebsstrategien sind deshalb nicht kausal und für den praktischen Einsatz nur bedingt geeignet. Verwendung finden optimale Strategien vor allem als Benchmark und bei der optimalen Bemessung der Komponenten. Bei suboptimalen Betriebsstrategien wird versucht, eine Lösung des Optimierungsproblems ohne Kenntnis des zukünftigen Antriebsleistungsbedarfs zu erreichen. Bei LEA werden dazu Ansätze untersucht, die den "Fahrprozess" als Markov-Prozess interpretieren. Die Markov-Zustände werden durch die Fahrgeschwindigkeit, die geforderte Antriebsleistung und den Ladegrad des Energiespeichers beschrieben. Ausgehend von den Übergangswahrscheinlichkeiten des Markov-Prozesses kann mithilfe der Stochastischen Dynamischen Programmierung eine Betriebsstrategie entworfen werden, die den Erwartungswert der betrachteten Zielfunktionen minimiert. Mit dieser Betriebsstrategie lassen sich in den unterschiedlichen Fahrspielen gute Ergebnisse erzielen (s. Tabelle 2).

Heuristische Betriebsstrategien basieren auf logischen Aussagen oder Fuzzy-Regeln, die verschiedene Parameter (Drehmoment des Verbrennungsmotors, Fahrzeuggeschwindigkeit, usw.) mit einander verknüpfen. Diese Betriebsstrategien den unterschiedlichen Fahrspielen gute Ergebnisse erzielen (s. Tabelle 2).

Heuristische Betriebsstrategien basieren auf logischen Aussagen oder Fuzzy-Regeln, die verschiedene Parameter (Drehmoment des Verbrennungsmotors, Fahrzeuggeschwindigkeit, usw.) mit einander verknüpfen. Diese Betriebsstrategien zeichnen sich durch einen intuitiven Entwurf aus und sind nicht auf die Kenntnis des zukünftigen

Antriebsleistungsbedarfs angewiesen. Werden die Parameter der Betriebsstrategie sorgfältig eingestellt, lassen sich sehr gute Ergebnisse im Bezug auf die Verbrauchsreduzierung und die Erhaltung des Ladegrads des elektrischen Energiespeichers erzielen. Ein Nachteil heuristischer Betriebsoptimization problem. For the solution of the optimization problem it is necessary to know the future required drive power. Therefore, optimal control strategies are non-causal and are applicable only under certain conditions. Optimal strategies are very often used as benchmark and in optimal sizing of the drive train components. Referring to the sub-optimal control strategies, you try to find a solution of the optimization problem without knowing the future required drive power. LEA studies approaches which take the "driving process" as a Markov process. The Markov states are described by speed, the required drive power and the state of charge of the energy storage. Starting with the transition probabilities of the Markov process, by means of the Stochastic Dynamic Programming an control strategy can be developed that reduces the expectation value of the investigated objective functions. With this control strategy it is possible to achieve good results in the different driving cycles (see Table 2). Heuristic control strategies are based on logic statements or on fuzzy rules which incorporate different vehicle parameters (torque of the combustion engine, driving speed, etc.). These control strategies stand out due to an intuitive design and are therefore not dependant on the knowledge about the future required drive power. If the parameters of the control strategy are adjusted properly, very good results can be achieved with reference to fuel consumption and the maintenance of the state of charge of the electric energy storage. One disadvantage of heuristic control strategies is that the achieved results are more or

	Fahrspiel A		Fahrspiel B	
	Verbrauch	Veränderung	Verbrauch	Veränderung
optimale Betriebsstategie	4,63 l/h		4,57 l/h	
suboptimale Be- triebsstrategie	5,00 l/h	+ 7,99%	5,10 l/h	+ 11,60%
heuristische Be- triebsstrategie	5,39 l/h	+ 16,41%	5,54 l/h	+ 21,23%

Tabelle 2:Vergleich unterschiedlicher BetriebsstrategienTable 2:Comparison of different control strategies

less dependant on driving conditions, especially on the driving cycle. By a clever choice of the considered parameters, the dependence on the drive cycle can be reduced [3]. In Table 2 the results of different control strategies for two drive cycles (see Fig. 3) are shown as an example. As already



strategien ist, dass die erreichten Ergebnisse mehr oder weniger stark von den Fahrbedingungen, insbesondere vom Fahrspiel abhängen. Durch die geschickte Wahl der berücksichtigten Parameter kann diese Abhängigkeit vom Fahrspiel minimiert werden [3]. In Tabelle 2 sind beispielhaft die Ergebnisse der unterschiedlichen Betriebsstrategien für zwei Fahrspiele (s. Bild 3) dargestellt.

Die besten Ergebnisse sind, wie zu erwarten, mit der nicht-kausalen, optimalen Betriebsstrategie zu erreichen. Bei den kausalen Betriebsstrategien ist die Strategie auf Basis der Stochastischen Dynamischen Programmierung dem heuristischen Ansatz überlegen und ermöglicht deutliche zusätzliche Verbrauchseinsparungen.

Simultane Optimierung von Entwurf und Betriebsstrategie

Die optimale Bemessung der Komponenten und der Entwurf der Betriebsstrategie sind nicht unabhängig voneinander. Häufig werden trotzdem in einem ersten Schritt die Komponenten des Antriebsstrangs optimal bemessen, wobei die Parameter der Betriebsstrategie nicht verändert werden. Anschließend können die Parameter der Betriebsstrategie, bei fester Bemessung der Komponenten, optimiert werden. Dieser sequenzielle

Ansatz führt aber nicht zwingend zu einer global optimalen Lösung. Bei LEA werden deshalb Ansätze zur simultanen Optimierung der Bemessung der Komponenten und des Entwurfs der Betriebsstrategie untersucht.

Verbrauch Veränderung 8,12 l/h konventionelles Sammelfahrzeug heuristische Bemessung und heuristische Betriebsstrategie 5,84 l/h -28,08% -33.99% optimale Bemessung und heuristische Betriebsstrategie 5,36 l/h heuristische Bemessung und optimierte Betriebsstrategie 5,40 l/h -33.50% sequenziell optimierte Bemessung und Betriebsstrategie 5,35 l/h -34.11% -41.01% simultan optimierte Bemessung und Betriebsstrategie 4,79 l/h

Tabelle 3:Vergleich sequentieller und simultaner OptimierungTable 3:Comparison of sequential and simultaneous optimization

In Tabelle 3 sind die Verbrauchseinsparungen für die verschiedenen Ansätze gegenübergestellt. Durch die simultane Optimierung kann eine zusätzliche Verbrauchsersparnis von ca. 7% erreicht werden. Der simultane Ansatz ist anspruchsvoll und die Optimierung sehr aufwendig. Aufgrund der erreichbaren zusätzlichen Verbesserungen ist dieser Aufwand aber gerechtfertigt. expected, the best results are achieved with the non-causal optimal control strategy. The causal control strategy which is based on Stochastic Dynamic Programming is superior to the heuristic approach and permits notably additional savings.



 Bild 3:
 Betrachtete Fahrspiele

 Fig. 3:
 Considered drive cycles

Simultaneous Optimization of Design and Control Strategy

The optimal sizing of components and the control strategy go together. Nevertheless, often the components of the drive train are sized optimally first, whereby the parameters of the control strategy are constant. Finally, the parameters of the control strategy can be optimized, keeping the size of the

components constant. This sequential approach does not necessarily lead to a globally optimal solution. Therefore, LEA concentrates on the investigation of approaches for simultaneous optimization of component sizing and the design of the control strategy. In Table 3 the fuel consumption savings for different approaches are contrasted. By means of a simultaneous optimization, additional fuel consumption savings of approx. 7% can be made. The simultaneous approach is challenging and the optimization is very elaborate. But due to the additionally achievable improvements, the effort is justifiable.

48

Veröffentlichungen

Publications

- [1] T. Knoke, J. Böcker; "Potentials of a hybrid drive train for refuse collector vehicles," 9th International Forum, Trucks and Buses, München, Germany, 2007
- [2] T. Knoke, J. Boecker; "Optimal power train design of a hybrid refuse collector vehicle," IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Arlington, Texas, USA, 2007
- [3] T. Knoke, C. Romaus, J. Boecker; "Optimization and comparison of heuristic control strategies for parallel hybridelectric vehicles," in 23rd International Electric Vehicle Symposium (EVS23), Anaheim, Kalifornien, USA 2007

Energiemanagement für ein hybrides Energiespeichersystem von Dipl.-Ing. Christoph Romaus

Mobile Traktionsanwendungen wie Hybrid- und Elektrofahrzeuge sowie autonome Schienenfahrzeuge wie das RailCab benötigen zum Betrieb einen Energiespeicher an Bord des Fahrzeugs. An diesen werden vielzählige Anforderungen wie eine hohe Speicherkapazität und Leistung sowie ein hoher Wirkungsgrad bei niedrigem Gewicht, niedrigen Kosten und geringem Wartungsaufwand bzw. langer Lebensdauer gestellt. Da es aktuell noch keine Speichertechnologie gibt, die all diesen Anforderungen gerecht wird, wird der Idee nachgegangen, verschiedene Energiespeicher mit sich ergänzenden Eigenschaften zu einem hybriden Energiespeichersystem zu kombinieren. So können z. B. Langzeitspeicher wie Batterien mit einer hohen Energiedichte durch Kurzzeitspeicher wie Doppelschichtkondensatoren (DLC, Double Layer Capacitor) mit einer hohen Leistungsdichte und hoher Zyklenfestigkeit ergänzt werden. Durch die Kombination entsteht ein Speichersystem, welches die gewünschten Eigenschaften besser erfüllt.

Energy Management for a Hybrid Energy Storage System by Dipl.-Ing. Christoph Romaus

Mobile vehicular applications like hybrid-electrical and electrical cars as well as rail vehicles, e.g. the RailCab, require an on-board energy storage for operation. This has to satisfy numerous demands like high storage capacity and power as well as high efficiency while being lightweight, reasonably priced and requiring only little maintenance or offering low deterioration in usage. As current storage technologies do not meet all these demands, energy storage devices with complementary characteristics can be combined as a hybrid energy storage system (HES) instead. Thus, long-term storage like batteries featuring high energy density can be combined with short term storage like double layer capacitors (DLC) offering high power density and high cycliability. From this combination an energy storage results that complies with the desired specifications.



Bild 1: Struktur des hybriden Energiespeichersystems Fig 1: Structure of the hybrid energy storage system

Selbstoptimierende Betriebsstrategien für ein Energiemanagement

Durch die hybride Struktur des Energiespeichersystems ergibt sich ein Freiheitsgrad für die Aufteilung der zu speichernden Leistung auf die beiden Speicher. Da diverse Zustandsgrößen der Energiespeicher wie Ladegrade und Temperaturen von den Leistungsflüssen in der Vergangenheit abhängen und nicht sprungartig geändert werden können, ist

Self-Optimization Operating Strategies for Energy Management

The hybrid structure of the energy storage system offers a degree of freedom for the distribution of the power flows to the respective storage devices. Since several state variables of the energy storage system like state of charge and temperature are dependent on the former power flows and cannot be changed abruptly, the development of an en-

50

der Entwurf eines Energiemanagements, welches die jeweilige Leistung der Energiespeicher vorgibt, kein triviales Problem. Weiterhin ist es wünschenswert, dass das Energiemanagement selbsttätig auf veränderliche Einflüsse aus dem Umfeld des Fahrzeugs reagiert und sich entsprechend anpasst. Dabei können je nach Situation verschiedene Ziele wie ein hoher Wirkungsgrad, niedriger Verschleiß oder die Erhöhung der Verfügbarkeit im Vordergrund stehen.

Zum Entwurf einer Betriebsstrategie für das Energiemanagement unter Berücksichtigung der Umfeldbedingungen werden daher Methoden und Optimierungsverfahren aus dem Sonderforschungsbereich 614 - "Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus" angewendet [1, 2]. Dieser beschäftigt sich mit der Entwicklung selbstoptimierender Methoden und Konzepte, um mechatronische Systeme mit einer inhärenten Teilintelligenz auszustatten. Diese ermöglicht die situationsgerechte, selbstständige und flexible Festlegung bzw. Anpassung der Systemziele an veränderliche Betriebsbedingungen. Im Selbstoptimierungsprozess werden aktuelle Daten des Energiespeichersystems sowie des Fahrzeugs wie Temperaturen, Ladegrade oder aktuelle Energiekosten erfasst. Weiterhin wird der zukünftige Leistungsbedarf des Fahrzeugbordnetzes prognostiziert [3, 4]. Mithilfe dieser Situationsanalyse wird die Ausprägung der Systemziele bedarfsgerecht festgelegt und eine Betriebsstrategie für die nahe Zukunft mithilfe kontinuierlicher oder diskreter Mehrzieloptimierungsverfahren berechnet.

Bestimmung einer Betriebsstrategie mittels kontinuierlicher und diskreter Mehrzieloptimierungsverfahren

Abhängig vom zu befahrenden Streckenabschnitt sind unterschiedliche Mehrzieloptimierungsverfahren zur Bestimmung einer Betriebsstrategie einsetzbar. Auf gut bekannten, immer wiederkehrenden Strecken mit festgelegten Leistungsprofilen, wie sie vor allem im S-Bahn- oder Shuttleverkehr vorkommen, können die rechenzeitaufwändigen *kontinuierlichen Mehrzieloptimierungsverfahren* eingesetzt werden. Für charakteristische Leistungsprofile werden offline Betriebsstrategien berechnet, die in einer Datenbank abgelegt und bei Befahren eines bekannten Streckenabschnitts ergy management which decides on the respective power of the energy storages is a non-trivial problem. Beyond, the energy management should be able to react to varying influences from the surroundings of the vehicle and to adapt its behaviour adequately. Depending on the situation different objectives may be important, e.g. a high efficiency, low deterioration or increased availability.

To design an operating strategy for the energy management which respects the surroundings, methods and optimization procedures from collaborate research centre 614 - "Self-optimizing Systems and Concepts in Mechanical Engineering" are applied [1, 2]. In this research centre, selfoptimization methods and concepts are developed which add an inherent partial intelligence to mechatronic systems. Thus, the system objectives can be autonomously determined on or adapted to varying operating conditions in a flexible way dependent on the situation and system surroundings. The self-optimization process collects current measurements of the energy storage system and the vehicle, e.g. temperatures of the storage and periphery, state of charge or energy costs. Furthermore, the future power demand of the onboard electrical system is estimated [3, 4]. Subsequently, the specification of the system objectives is determined based on this system analysis. An operating strategy for the near future is computed by continuous and discrete multi-objective optimization procedures.

Computation of an Operating Strategy by Continuous and Discrete Multi-Objective Optimization

Depending on the sort of track section to travel on, different optimization methods are applicable to calculate an operating strategy. For well-known, often recurring track sections with specific power profiles, e.g. in shuttle or suburban rail service, *continuous multi-objective optimization* methods can be applied. As they are costly in terms of computing time, these operating strategies are computed offline for characteristic power profiles and applied from a database when travelling on a suitable track section.

Using a set oriented algorithm implemented in the software package GAIO [5], a numerical approxi-



abgerufen werden.

Die Optimierung der Betriebsstrategie erfolgt über mengenorientierte Algorithmen des Softwarepakets GAIO [5], mit denen eine numerische Abschätzung der Menge der optimalen Kompromisse, die sogenannte Paretomenge, berechnet wird. Diese Paretomenge wird aus diversen Paretopunkten gebildet, die jeweils eine Betriebsstrategie für das hybride Energiespeichersystem in Form eines Sollwertprofils für den Batteriestrom repräsentieren. Zur Laufzeit wird vor Befahren eines Streckenabschnitts eine zum gewählten Leistungsprofil gehörige Paretomenge aus der Datenbank abgerufen und ein geeigneter Paretopunkt entsprechend der nach der Situationsanalyse festgelegten Zielgewichtung ausgewählt. Dieser repräsentiert die entsprechend optimierte Betriebsstrategie für das hybride Energiespeichersystem.

In Bild 2 sind ein beispielhafter Ausschnitt eines charakteristischen Leistungsprofils und die zugehörige Paretomenge für zwei Zielfunktionen abgebildet. Die Ziele sind dabei zum einen die Minimierung der *bezogenen Energieverluste* des Energiespeichersystems (Zielfunktion f_1) und zum anderen die Maximierung der *Leistungsreserve* zur Kompensation unvorhergesehener Leistungsspitzen, was mathematisch durch die Minimierung der zugehörigen Zielfunktion f_2 (Abweichung des DLC-Ladegrads von einem ausgeglichenen Ladegrad)

ausgedrückt wird. Da die Zielfunktionen gegenläufig sind, kann kein globales Optimum erreicht werden. Sie können jedoch in einem weiten Bereich variiert werden, so dass je nach Ergebnis der Umfeldanalyse die Zielgewichtung geeignet eingestellt werden kann. So ist eine Reduzierung der Zielfunktion f_1 (Energieverluste) um 24% (Paretopunkt 1) und eine Reduzierung der Zielfunktion f_2 (Abweichung des DLC-Ladegrads) sogar um 98% (Paretopunkt 2) gegenüber der

mation of the set of optimal compromises, the socalled Pareto set, is computed. This Pareto set contains several Pareto points, each of them representing a correspondingly optimized operating strategy for the hybrid energy storage system in terms of a reference value profile for the battery current. Before travelling on a track section, an associated Pareto set is selected from the database and a suitable Pareto point is selected according to the weighting of the objectives determined during the situation analysis. This Pareto point represents the afore optimized operating strategy for the hybrid energy storage system.

As an example Fig. 2 shows a section of a characteristic power profile and the corresponding Pareto set for two objective functions. The objectives are on the one hand to reduce the energy losses of the energy storage system (objective function f_1) and on the other hand to maximize the power reserve for compensation of unexpected power peaks, which is indicated by the minimization of the corresponding objective function f_2 (deviation of the state of charge (SOC) of the double layer capacitor from a balanced SOC value). As the objective functions are conflicting, no global optimum can be determined. Yet, both functions can be varied in a wide range, so that depending on the result of the situation analysis the objective weights can be selected. Thus, the reduction of objective function f_1 (energy losses) by 24% (Pareto point 1) and



Bild 2: Charakteristisches Leistungsprofil des hybriden Energiespeichersystems (HES) und dazugehörige Paretomenge mit den bezogenen Zielfunktionen f₁: Energieverluste und f₂ : Abweichung des DLC-Ladegrads von einem ausgeglichenen Ladegrad

Fig 2: Characteristic power profiles of the hybrid energy storage system (HES) and corresponding pareto set with normalized objective functions f_1 : energy losses and f_2 : deviation of the SOC of the DLC from a balanced value



Einzieloptimierung der jeweiligen anderen Zielgröße möglich.

Für seltener wiederkehrende Strecken bzw. bei nicht gespeicherten Leistungsprofilen wird ein deutlich schneller zu berechnendes Optimierungsverfahren benötigt. Hier kann eine diskrete Optimierung, die *Intelligente Vorausschau* in Form eines Suchbaums, eingesetzt werden.

Aufgrund der Beschränkung auf eine geringe Zahl diskreter Optimierungsvariablen wird eine echtzeitfähige Berechnung ermöglicht, jedoch verschlechtert sich das Ergebnis der Optimierung je nach vorgegebenem Leistungsprofil mehr oder weniger deutlich. Nachteilig ist weiterhin, dass die Gewichtung der Zielfunktionen schon vor der Optimierung festgelegt werden muss, ohne eine Übersicht über den möglichen Wertebereich der Zielfunktionen zu bekommen, wie dies bei der Paretomenge möglich ist.

Potenziale einer selbstoptimierenden Betriebsstrategie unter veränderlichen Umfeldbedingungen

Das Potential der Selbstoptimierung liegt jedoch nicht nur in der Berücksichtigung verschiedener Zielfunktionen bei der Optimierung, sondern insbesondere in der Fähigkeit, das Zielsystem während der Laufzeit anzupassen. Als Beispiel werde ein Szenario betrachtet, in dem das untersuchte Fahrzeug den gleichen Streckenabschnitt zweimal in der gleichen Weise durchfahre. Damit gleichen sich auch die vom hybriden Energiespeichersystem angeforderten Leistungsprofile bei beiden Überfahrten. Allerdings sei das Leistungsprofil bei der ersten Überfahrt nur mit höherer Unsicherheit abschätzbar, da keine Daten einer vorherigen Fahrt vorliegen. Daher wird in diesem Fall das Ziel "Leistungsreserve maximieren" sehr stark gewichtet, um Reserven für eventuelle Abweichungen vorzuhalten. Bei der zweiten Überfahrt ist das Leistungsprofil nun jedoch sehr gut bekannt, so dass jetzt das Ziel "Energieverluste minimieren" vorrangig berücksichtigt werden kann.

Für dieses Szenario sind in Bild 3 die zeitlichen Verläufe der Gesamtverlustleistung des hybriden Speichersystems und des Ladegrads des DLCs sowie die erreichten Zielfunktionswerte für eine selbstoptimierende Betriebsstrategie und für eine of f_2 (deviaton of the SOC of the DLC) by even 98% (Pareto point 2) is possible, compared to a single objective optimization of the other objective respectively.

For sections recurring less often or for power profiles which are not stored in the database, a much faster optimization method is necessary. Here, a discrete optimization algorithm, the *intelligent forecast* using a search tree can be applied.

Because of the small number of discrete optimization variables, a real-time computation is possible. However, the tradeoff is a generally lower quality of the results compared to the continuous methods. A further disadvantage is that the weighting of objectives has to be fixed before the optimization starts, not having an overview of the range of values of the objective functions, as within the Pareto set.

Potentials of a Self-Optimization Operating Strategy under Changing Conditions of Surroundings

The potential of self-optimization resides not only in considering different objective functions while optimizing, but especially in the possibility to adjust the system of objectives during runtime. The following scenario shows this: The considered vehicle travels on a single track section twice with the same velocity and thus the same power demand from the HES. During the first travel, however, the demanded power can be estimated only with high uncertainty, as no data concerning a previous travel is available. Thus, the objective of "maximizing the power reserve" is rated very essentially to hold ready reserves for potential deviations of the estimated power demand. During the second travel, the power demand is known quite exactly, so now the objective of "minimizing losses" can be prioritized.

Fig. 3 shows the courses of the total power dissipation of the hybrid energy storage system and of the state of charge of the DLC as well as the values of the objective functions accomplished by a selfoptimization operating strategy compared to an operating strategy with static system of objectives. The modification of the system of objectives takes place at t = 123 s, as indicated by the vertical dashed line.





Bild 3: Vergleich einer selbstoptimierenden Betriebsstrategie mit veränderlichem Zielsystem mit einer Betriebsstrategie mit statischem Zielsystem

Fig 3: Self-Optimization operating strategy with variable system of objectives in comparison to an operating strategy with static system of objectives

Betriebsstrategie mit statischer Zielgewichtung dargestellt. Die Änderung des Zielsystems der selbstoptimierenden Betriebsstrategie erfolgt zur Zeit t = 123 s und ist durch die senkrechte gestrichelte Linie angedeutet.

Es ist zu erkennen, dass die selbstoptimierende Betriebsstrategie bei der ersten Überfahrt vorrangig das Ziel 2 (Maximierung der Leistungsreserve) verfolgt, während Zielfunktion f_1 (Energieverluste) nur nachrangig minimiert wird. Bei der zweiten Überfahrt erfolgt jedoch eine stärkere Gewichtung der Zielfunktion f_1 . Der Wert der Zielfunktion f_2 verschlechtert sich zwar deutlich, was jedoch bei der zweiten Überfahrt irrelevant ist. Im Gegensatz dazu bleibt die Zielgewichtung der statischen Betriebsstrategie zwar ausgeglichen, aber über die gesamte Überfahrt konstant.

Während der ersten Überfahrt, auf der besonderer Wert auf die Maximierung der Leistungsreserve gelegt wird, erreicht die selbstoptimierende Betriebsstrategie für diese Zielfunktion bis zu 51% bessere Werte als die Strategie mit konstanter Zielgewichtung. Bei der zweiten Überfahrt, bei der insbesondere die Energieverluste minimiert werden sollen, sind dagegen die Verluste bei der selbstoptimierenden Betriebsstrategie um 22% geringer. Die bei den jeweiligen Überfahrten relevanten Ziele werden also von der selbstoptimierenden Betriebsstrategie deutlich besser erfüllt als von der StrateIt becomes apparent that the self-optimization strategy mainly follows objective 2 (maximization of power reserve) during the first travel while objective function f_1 (losses) has only minor importance. However, during the second travel, objective function f_1 is prioritized instead. The value of objective function f_2 declines distinctly, but this is irrelevant during this second travel. By contrast, the weighting of the objectives of the static operating strategy is balanced but constant during both travels.

During the first travel, when particular consideration is put to the maximization of the power reserve, the self-optimization operating strategy reaches better values up to 51% for this objective function compared to the strategy with static weighting of the objectives. During the second travel, when especially the losses are to be minimized, in contrast the power dissipation is lower by 22% with the self-optimization strategy. Obviously, the objectives relevant during the respective travels are performed better by the selfoptimization strategy than by the operating strategy with static system of objectives. The adaptation of the system of objectives by selfoptimization hence offers an optimal operation adapted to the environment of the system.

Evaluation at the Test Rig

A further focal point is the validation of the simula-



gie mit statischer Zielgewichtung. Die selbstoptimierende Anpassung des Zielsystems ermöglicht somit einen an die jeweilige Umfeldsituation angepassten optimalen Betrieb.

Erprobung am Prüfstand

Einen weiteren Schwerpunkt bildet die Erprobung der simulativ ermittelten Betriebsstrategien an einem Prüfstand, der das hybride Energiespeichersystem und das Bordnetz eines Fahrzeugs, z. B. des RailCabs, skaliert nachbildet (Bild 4). Die Energiespeicher sind jeweils über bidirektionale Gleichstromsteller mit einem gemeinsamen Zwischenkreis verbunden, der die Anbindung an das Bordnetz darstellt. Die angeforderten Leistungsprofile des Bordnetzes werden über ein Netzteil, eine Last und weitere Gleichstromsteller eingeprägt.

Die Herausforderungen bestehen darin, die anhand eines Modells der Energiespeicher entworfenen Betriebsstrategien in der Realität anzuwenden und dabei auf Parameterabweichungen, z. B. durch Alterung und Temperatureinflüsse, sowie fehlerhafte Schätzungen der Systemzustände angemessen zu reagieren bzw. diese in den Optimierungsprozess der Betriebsstrategien einfließen zu lassen. Um den unterschiedlichen Echtzeit- und Hardwareanforderungen der Optimierungsstrategien, der Sicherheits- und Identifikationsmethoden sowie der hardwarenahen Regelung des Prüfstandes gerecht zu werden, wurde die Informationsverarbeitung des Prüfstands entsprechend dem im Sonderforschungsbereich 614 entwickelten Operator-Controller-Moduls (OCM) strukturiert (Bild 5). Die Regelung und Überwachung des Prüfstands erfolgen dabei auf einem dSPACE-Echtzeitsystem, die Optimierung auf einem PC. Die Kommunikation der Rechner wird über eine UDP-Direktverbindung abgewickelt.

Die Experimente am Prüfstand ergaben eine gute Übereinstimmung der simulierten Ergebnisse mit den Messungen. Die mittels kontinuierlicher Mehrzieloptimierung offline bestimmten Betriebsstrategien konnten genauso wie die online per Suchbaum berechneten Betriebsstrategien erfolgreich eingesetzt und verifiziert werden.



Bild 4: Prüfstand des hybriden Energiespeichersystems Fig 4: Test rig of the hybrid energy storage system

tion based operating strategies at a test rig which emulates the hybrid energy storage system and the on-board electrical system of a vehicle, e.g. the RailCab (Fig. 4). The energy storage devices are each connected to a common dc-link by bidirectional power converters. The dc-link establishes the connection to the on-board system of the vehicle. The power demand of the on-board system is emulated by a power supply, a load and further power converters.

The challenge is to implement the operating strategies, developed by use of models of the energy storage, in a real system and to react adequately to parameter fluctuations caused e.g. by deterioration or temperature changes as well as inaccurate estimations of the system variables, or to incorporate these fluctuations into the optimization process of operating strategies. To meet the different real-time and hardware requirements of the optimization strategies and safety and identification methods as well as the test rig control which is close to hardware level, the information processing of the test rig was structured according to the Operator Controller Module (OCM), developed by Collaborative Research Centre 614 (Fig. 5). Control and monitoring of the test rig are implemented on a real time computation system by dSPACE while a standard PC is used for calculation of the operating strategy. Communication between both computers is handled via a UDP direct connection.



Resümee

Der Einsatz selbstoptimierender Methoden erlaubt die Bestimmung optimaler Betriebsstrategien für ein hybrides Energiespeichersystem bezüglich mehrerer teilweise gegenläufiger Zielfunktionen. Dabei wird die Relevanz der Zielfunktionen entsprechend der externen und internen Umfeldbedingungen des Systems zur Laufzeit geeignet berücksichtigt und gewichtet.

Durch die Prognostizierung zukünftiger Leistungsverläufe für die nähere Zukunft und Berücksichtigung in den Optimierungsverfahren können zukünftige Leistungsspitzen erkannt werden und durch geeignete aktive Änderung der Ladung des Kurzzeitspeichers kompensiert werden, so dass gegenüber klassischen Betriebsstrategien wie der Begrenzung des Batteriestroms die Spitzenleistung des hybriden Energiespeichersystems deutlich erhöht werden kann. Durch schnelle diskrete Optimierungsverfahren kann eine Berechnung in weicher Echtzeit gewährleistet werden. Beim Befahren bekannter Strecken kann weiterhin durch die Offlineberechnung einer Betriebsstrategie mittels einer kontinuierlichen Mehrzieloptimierung die Ergebnisqualität gesteigert werden

Experiments at the test rig showed a good correlation between the results by simulation and experimental measurements. Operating strategies determined offline by continuous multi objective optimization as well as online by a search tree could be applied and tested successfully.

Summary

The use of self-optimization methods offers the computation of optimal operating strategies for a hybrid energy storage system taking into account several partly opposed objective functions. Their relevance is considered and weighted depending on external and internal conditions of system surroundings during run-time.

By means of estimation of power demands by the near future and the consideration in the optimization process future power peaks can be identified and compensated by active modification of the charge of the short-time storage. Thus, the peak power of the hybrid energy storage system can be considerably increased compared to the classical operating strategies like the limitation of the battery current. With the help of fast discrete optimization methods a computation in soft real-time is possible. Furthermore, when travelling on wellknown track sections, the quality of the operating strategy can be enhanced by the use of continuous multi-objective optimization in combination with an offline computation and a database.

Veröffentlichungen

Publications

- [1] C. Romaus, J. Böcker, K. Witting, A. Seifried, O. Znamenshchykov; "Optimal Energy Management for a Hybrid Energy Storage System Combining Batteries and Double Layer Capacitors," 1st IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE2009), San Jose, California, USA, 2009
- [2] P. Adelt, J. Donoth, J. Gausemeier, J. Geisler, S. Henkler, S. Kahl, B. Klöpper, A. Krupp, E. Münch, S. Oberthür, C. Paiz, H. Podlogar, M. Porrmann, R. Radkowski, C. Romaus, A. Schmidt, B. Schulz, H. Vöcking, U. Witkowski, K. Witting, O. Znamenshchykov; *"Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus Definitionen, Anwendungen, Konzepte,"* Band 234 der HNI Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Deutschland, 2008
- [3] B. Klöpper, C. Romaus, A. Schmidt, H. Vöcking; "A Multi-Agent Planning Problem for the Coordination of Functions Modules," In: J. Gausemeier, F. Rammig, W. Schäfer, (Hrsg): 7th International Heinz Nixdorf Symposium – Selfoptimizing Mechatronic Systems: Design the Future, Band 223 der HNI-Verlagsschriftenreihe, Seiten 377 – 393. Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn, Germany, 2008
- [4] B. Klöpper, C. Romaus, A. Schmidt, H. Vöcking, J. Donoth; "Defining Plan Metrics for Multi-Agent Planning Within Mechatronic Systems," International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference (AME), New York, USA, 2008
- [5] Lehrstuhl für Angewandte Mathematik, Universität Paderborn: GAIO Global Analysis of Invariant Objects. http://math-www.uni-paderborn.de/~agdellnitz.



Concept

Testbed



Bild 5: Konzept und Realisierung des Operator-Controller-Moduls für das hybride Energiespeichersystem Fig 5: Concept and realization of the Operator-Controller-Module for the hybrid energy storage system



Labor von Dipl.-Ing. Helmut Foth

Das Labor des Fachgebietes im IW-Gebäude umfasst insgesamt eine Fläche von 450 m², die sich in Bereiche für Leistungselektronik und Antriebstechnik aufteilt. Das Labor verfügt über eine zentrale Laborstromversorgung (3 AC 400 V / 600 A, DC 200 V / 100 A), welche es erlaubt, an allen Laborplätzen verschiedene Spannungen und Frequenzen zur Verfügung zu stellen.

Arbeitsplätze

Im Bereich der Leistungselektronik stehen 6 Versuchsplätze zur Verfügung. Der Bereich ist mit diversen Messgeräten wie Waveform Generatoren, AC/DC-Leistungsmessgerät (1 und 3 phasig), Impedanz-Analysator und allgemeiner Messtechnik wie Digital-Oszilloskopen, Netzgeräten und Funktionsanalysator ausgestattet.

Für die Antriebstechnik stehen insgesamt 9 Versuchsplätze mit Spannbänken bis zu 3x3 m zur Verfügung. Alle Laborplätze sind mit modernen Prüfstandsrechnern, aktueller Software sowie einem leistungsfähigen Netzwerk ausgestattet.

Neben den reinen Forschungsplätzen stehen weitere 8 Praktikumsplätze für Studenten zur Verfügung, an denen Versuche im Rahmen des Bachelor - und Masterstudiengangs durchgeführt werden. Zusätzlich existiert ein Computerraum für Studenten, welcher mit Rechner-Arbeitsplätzen und aktueller Software ausgestattet ist. Fertigungen für Versuchsaufbauten können in einer fachgebietseigenen Werkstatt ausgeführt werden.

Motorenprüfstände

Neben einigen konventionellen Versuchsständen stehen auch Versuchseinrichtungen zur Untersuchung von elektrischen Antrieben, insbesondere aus dem Fahrzeugbereich, zur Verfügung. Die Motorensätze sind in einer klimatisierten Kabine von 30 m² untergebracht. Durch eine leistungsstarke geregelte Wasserkühlung mit bis zu 58 kW Kühlleistung ist der Betrieb von wassergekühlten Prüflingen bei definierter Temperatur möglich. Die Prüflinge können auch gezielt auf eine geforderte Temperatur aufgeheizt werden. Eine ebenfalls wassergekühlte Lastmaschine mit einer Bemessungs-

Laboratory by Dipl.-Ing. Helmut Foth

The department's laboratory with its fields of power electronics and electrical drives is located in the IW building and covers an area of 450 m².The laboratory has a central power supply (3 AC 400 V / 600 A, DC 200 V / 100 A) which is capable of providing different voltages and frequencies at all workstations.





Workstations

In the field of power electronics 6 workstations are available. The field is equipped with various measuring devices such as waveform generators, AC/ DC power measuring device (1-and 3-phase), impedance analyser and the common measuring equipment such as digital oscilloscopes, power supply units and function analyser.

In the field of electrical drives in total 9 work stations and several clamping benches up to 3x3 m are provided. All work stations are equipped with modern computers, updated software and a high capacity network. Apart from the work stations for scientific purposes, 8 working places for students are available, where they can carry out practical work within their bachelor's and master's program. Additionally, a computer room for students provides PC workstations and updated software. Manufacturing of test set-ups can be done in the institute's workshop.



LABOR LABORATORY



Bild 2: Klimatisierte Schallschutzkabine für Antriebsversuche Fig 2: Air-conditioned soundproof cabin for motor

test beds

leistung von 260 kW und einem Bemessungsdrehmoment von 500 Nm erlaubt Drehzahlen bis zu 12000 min⁻¹.

Die Umrichter für diese Prüf- und Lastmaschinen sind mit wassergekühlten Semikron SKiiP Modulen (Mod. 1242GB 120, U_{CE} =1200 V, I_C =1200 A bei 25°C) aufgebaut. Sie haben eine nominelle Scheinleistung von über 500 kVA und bieten direkten Zugriff auf Ventilsteuerung und Messwerte. Damit bieten sie Flexibilität zur Erprobung auch solcher Regelungen, die vom üblichen industriellen Standard abweichen. Insbesondere ist die Pulsmustererzeugung flexibel einstellbar. Eine variable DC-Einspeisung der Fa. Regatron, die aus 3 parallel geschalteten TopCon-Geräten aufgebaut ist, erlaubt den Versuchsbetrieb mit veränderbarer Zwischenkreisspannung bis maximal 600 V, 192 A und 96 kW Leistung, so dass u.a. der Betrieb von fahrzeugtypischen Antrieben mit Batteriespannungen von 200-350V möglich ist. Die Semikron-Umrichter sind erheblich überdimensioniert, damit auch solche Versuche wie Kurzschlüsse von Permanentmagnet-Synchronmotoren ohne Gefahr von Schäden untersucht werden können. Die Regelungsalgorithmen werden in einer Rapid-Prototyping-Umgebung der Firma dSpace implementiert.

Für die Überwachung der Kabine stehen insgesamt 4 Kameras zur Verfügung. Die Videosignale können mittels eines Harddisk-Videosystems mit einem Zeitstempel versehen aufgezeichnet werden.

Motor test beds

In addition to conventional test benches test facilities for electrical drives, particularly in the automotive field are also available. The motor sets are located in an air-conditioned cabin which covers 30 m^2 . A powerful controlled water cooling of 58 kW cooling capacity ensures to operate devices under test at well-defined temperature. The test objects can also be specifically heated up to the required temperature. A water-cooled load machine of 260 kW rated power and of 500 Nm rated torque permits speeds up to 12.000 min-1.

The converters for the test and load machines consist of water-cooled Semikron SKiiP modules (Mod. 1242GB 120, U_{CE} =1200 V, I_{C} =1200 A at 25°C). Their rated apparent power is more than 500 kVA and they allow direct access to valve gating and measuring data. Their flexibility is beneficial for the testing of control systems that deviate from the common industry standards. Particularly, the generation of the pulse pattern is easy to handle. A variable DC power supply, which consists of 3 paralleled TopCon devices of the company Regatron, makes it possible to carry out tests with variable DC link voltages up to 600 V, 192 A, and 96 kW. Thus, typical battery voltages of electric vehicles 200 to 350 V can be provided.

The Semikron converters are significantly oversized, even allowing extreme testing conditions, like short circuits of permanent magnet synchronous motors. The control algorithms are implemented in a dSPACE rapid-prototyping environment.

Four cameras are used to monitor the cabin. The video signals can be recorded with time stamps by means of a harddisk video system. The video system is network compatible, i.e. the video data can be accessed remotely for analysis. The four video signals can be continuously recorded over a maximum period of 32 hours and visualised on a TFT monitor with split-screen for control purposes.

59

LABOR LABORATORY



Bild 4:Wechselrichter mit drei einzeln aufgebauten Wechselrichtersträngen; hinter den einzelnen Konden-
satormodulen auf der Rückwand des Schrankes befinden sich die LeistungshalbleiterFig 4:Converter with three separate phases; the power semi conductors are on the back board of the
cabinet behind the capacitor modules

Das Videosystem ist netzwerkfähig, so dass die Videodaten zur Auswertung auch remote verfügbar sind. Die vier Videosignale können kontinuierlich über max. 32 h aufzeichnet werden. Gleichzeitig werden diese auf einem TFT-Monitor in Split-Screen Technik zur Kontrolle dargestellt.

Motor equipment

In order to implement different test set-ups, the department has a wide range of motors, covering permanent magnet synchronous motors up to a power class of 48 kW, over DC generators (up to 32 kW), induction motors (up to 260 kW) and reluctance motors (both linear and rotating).



Motorenausstattung

Um unterschiedlichste Versuchsaufbauten zu realisieren, verfügt das Fachgebiet über ein breit gefächertes Magazin von Motoren. So sind diverse Permanentmagnet-Synchronmotoren bis zu 48 kW verfügbar. Auch diverse Gleichstrommaschinen (bis 32 kW), Asynchronmotoren (bis 260 kW) und Reluktanzmotoren (bis 15 kW, linear / rotatorisch) sind vorhanden.

Linearversuchsstand

Im Rahmen des Projekts Neue Bahntechnik Paderborn (Railcab) wird als Antriebsmodul ein doppeltgespeister Linearmotor verwendet, welcher im Labor mit zwei Statorsegmenten mit einer Länge von jeweils 3,60 m aufgebaut ist. Ein Statorsegment besteht wiederum jeweils aus sechs Elementen mit einer Länge von 60 cm. Diese Elemente sind in Reihe geschaltet.

Um Läufer und Stator unabhängig voneinander speisen zu können, werden insgesamt vier Umrichter der Firma LTi Drives eingesetzt. Zwei versorgen die Statoren und zwei weitere die Läufer. Die verwendeten Umrichter können jeweils einen Nennstrom von 64 A bzw. 16 A liefern und arbeiten mit einer Schaltfrequenz von 8 kHz. Die gesamte Anordnung wird mit einer digitalen Informationsverarbeitung der Firma dSpace geregelt.

Prototypisches Steuerungs- und Regelungssystem

Für die modellbasierte Entwicklung von Steuerund Regelsystemen werden im Fachgebiet diverse Prototyping Systeme der Firma dSpace (DS1103 Single-Board-System mit umfassender I/O, DS1005 PPC Board, DS2004 High-Speed A/D Board, DS5101 Digital Waveform Output Board, DS 3002 Incremental Encoder Interface Board, DS4003 Digital I/O Board etc.) genutzt. Des Weiteren werden sowohl in den Bereichen Leistungselektronik als auch Antriebstechnik FPGA Prototyping Systeme für verschiedene Forschungsprojekte, wie z. B. für die Stromrichterregelung einer piezoelektrisch betriebenen Flugzeug-bremse, die im Rahmen eines EU-Projektes entwickelt wurde.



Bild 5:Wassergekühlte Lastmaschine: P=260 kW;
M = 500 Nm, $n_{max} = 12000 \text{ min}^{-1}$ Fig 5:Water-cooled load machine: P = 260 kW;
M = 500 Nm, $n_{max} = 12000 \text{ min}^{-1}$

Linear test bed

In the course of the Railcab project a doubly-fed linear motor is used as a drive unit. This linear motor consists of two stator segments, each of them with a length of 3.60 m. A stator segment, in turn, consists of 6 elements that are 60 cm long. These elements are series-connected, thus, they are comparable to a three-phase alternating current. In order to supply rotor and stator separately, four converters of the drive engineering company LTi Drives with ratings of 64 A and respectively 16 A are employed. Two of them supply the stators, whereas the other two supplies the rotors. They operate with switching frequencies of 8 kHz. The whole arrangement is controlled by a digital information processing system of the dSPACE company.

Rapid control prototyping

For model-based control development, the department uses various dSPACE prototyping systems (DS1103 Single-Board-System, DS1005 PPC Board, DS2004 High-Speed A/D Board, DS5101 Digital Waveform Output Board, DS 3002 Incremental Encoder Interface Board, DS4003 Digital I/O Board). Furthermore, in the field of power electronics as well as in electrical drives, FPGA prototyping systems are employed in various research projects, e.g., for the control of a power converter of a piezo-electrical aircraft brake that was developed in an EU-funded project.



LABOR LABORATORY



Bild 6: Aufbau Linearversuchsstand Fig 6: Linear test set-up

Software und Hardware

Leistungsfähige Software für Simulationen, Berechnungen, Logik-Analyse, Design und FEM (Matlab, Simplorer, Maxwell, PExpert, Mathcad) stehen den Wissenschaftlern und Studenten im Fachgebiet für unterschiedlichste Aufgaben auf diversen Mehrprozessor-Rechner und Einzelplatzrechnern zur Verfügung. Hinzu kommen Compiler, FPGA-Tools und Implementierungs-software zur Ausführung und Virtualisierung von Modellen für Prototyping Syteme (ControlDesk / RTI) der Firma dSpace.

MATLAB / Simulink / Stateflow-Modelle können komfortabel auf dSPACE-Hardware implemen-tiert werden. I/O-Konfigurationen werden mittels umfang-reicher Simulink-Bibliotheken grafisch unterstützt.

Messtechnik

Dem Lehrstuhl steht ein breit gefächertes Spektrum modernen Analog-Digitalan und Oszilloskopen, Logik-Analysatoren, Leistungs-Analysatoren, Wave- und Impedanz-Analysatoren zur Verfügung. Hinzu kommen mehrere hochwertige AC/DC-Leistungs- und Strommess-geräte (bis 500 A) für 1- und 3-phasige Anwendungen. Mit diversen leistungselektronischen Netzgeräten (bis 80 V / 200 A) lassen sich an den Versuchsständen die unterschiedlichsten Konfigurationen erstellen und durchführen.

Hinzu kommen verschiedene Drehmoment-Messwellen (Hottinger) für die Antriebsversuchsstände.



Bild 7:FPGA Prototyping SystemFig 7:FPGA prototyping system

Software and hardware

Scientists and students can use efficient software for simulations, calculations, logic analysis, design and FEM (Matlab, Simplorer, Maxwell, PExpert, Mathcad) for different assignments with various multiprocessor computers and individual PC work places. In addition to that, compiler, FPGA tools and implementation software can be used for the realisation and virtualisation of models for dSPACE-based prototyping systems (ControlDesk / RTI).

MATLAB / Simulink / Stateflow-models can be easily implemented on the dSpace hardware. I/O configurations are supported graphically by means of comprehensive Simulink libraries.

Measuring instrumentation

The institute provides a huge variety of modern analogue and digital oscilloscopes, logic analysers, power analysers, and wave and impedance analysers. Additionally, there are also several highquality AC/DC- power and current measuring devices (up to 500 A) for one- and three- phase applications. Various electronic power supplies (up to 80 V / 200 A) make it possible to build up different test set-up configurations.

Furthermore, different torque measuring shafts (Hottinger) are available at the drive test beds.



Lehrveranstaltungen

Grundlagen der Elektrotechnik – Teil B

Dozent: Böcker

Umfang: 4 SWS Vorlesung, 2 SWS Übung, 8 ECTS-Punkte*, im Sommersemester

Teilnehmer: Bachelor-Studenten im 2. Semester

Inhalte:

- Dynamische Vorgänge in elektrischen Netzwerken: Beschreibung durch Differenzialgleichungen
- Elektrische Arbeit, Energie, Leistung, Wirkungsgrad
- Lineare Netzwerke mit periodischen Vorgängen: komplexe Rechnung
- Frequenzkennlinien, Ortskurven
- Schwingkreise, Resonanz
- Wirk-, Blind-, Scheinleistung, Effektivwert
- Magnetische Felder, Materialien und Komponenten
- Transformatoren und Übertrager: Funktionsprinzip, Eigenschaften, Ersatzschaltbild, Bemessung, Einsatzgebiete
- Prinzipien elektromechanischer Energiewandlung und deren Anwendungen
- Gleichstromsteller

Elektrische Antriebstechnik

Dozent: Böcker

Umfang: 2 SWS Vorlesung, 2 SWS Übung, 4 ECTS-Punkte*, im Wintersemester

Teilnehmer: Bachelor-Studenten im 5. Semester

Inhalte:

- Antriebstechnische Aufgaben und Problemstellungen, elementare Begriffe und Zusammenhänge, stationäres und dynamisches Verhalten, Lastcharakteristika
- Antriebsauslegung f
 ür station
 äre und dynamische Anforderungen



Fundamentals of electrical engineering – Part B

Lecturer: Böcker

Duration: 4h lecture and 2h exercise per week 8 ECTS points*, summer semester

Participants: Bachelor students in their 2nd semester

Contents:

- Dynamic processes in electric networks: Application of differential equations
- Electric work, energy, power, efficiency
- Periodic processes in linear networks: complex calculus
- Bode plots and frequency response loci
- Oscillators, resonant circuits
- Real, reactive and apparent power, RMS-values
- Magnetic fields, materials and components
- Transformers and transducers: Functional principle, properties, equivalent circuit diagrams, rating, applications
- Principles of electromechanic energy conversion
- DC-DC converter

Electric drives

Lecturer: Böcker

Duration: 2h lecture and 2h exercise per week 4 ECTS points*, winter semester

Participants: Bachelor students in their 5th semester

Contents:

- Task and problems of drive engineering: General definitions and interrelationships, stationary and dynamic behavior, load characteristics
- Drive engineering for stationary and dynamic requirements



- Gleichstrommotor: Wirkprinzip, Aufbau, Modellierung, Schaltungsarten, Universalmotor
- Leistungselektronik: Tiefsetzsteller für Speisung aus DC-Quelle, B4- und B6-Brücken, Wechselstrom-Steller (Phasenanschnitt) für Universalmotoren
- Strom- und Drehzahlregelung
- Wechselstromantriebe: Einphasenmotor, Kondensatormotor, Spaltpolmotor
- Asynchronmotor: Aufbau und Funktionsweise, stationäres Drehmoment-Drehzahl-Verhalten, Klosssche Formel, Zeigerdiagramme, Ortskurven, Leistungsfaktor
- Synchronmotor bzw. -generator, Aufbau, Wirkungsweise, Zeigerdiagramme, stationäres Verhalten

Mechatronik und elektrische Antriebe

Dozent: Böcker

Umfang: 2 SWS Vorlesung, 2 SWS Übung, 6 ECTS-Punkte*, im Wintersemester

Teilnehmer: Master-Studenten

Inhalte:

- Einführung und Definition mechatronischer Systeme (Mechanik, Elektrotechnik, Informationstechnik)
- Charakteristika mechatronischer Systeme: Energie-, Material-, Informationsflüsse, Regelkreis
- Energieprinzipien: Elektromechanischer Vierpol, Leistungsbilanz, innere Energie, Koenergie
- Ferromagnetische Materialien: Magnetisierungskennlinie, Hysterese, Magnetisierungsverluste, Permanentmagnetmaterialien
- Berechnung von magnetischen Kreisen: Felder, Reluktanz, Induktivität, Fluss, Durchflutung
- Modellierung und Regelung eines mechatronischen Systems am Beispiel eines Magnetlagers
- Geschalteter Reluktanzmotor
- Gleichstrommotor
- Elektronisch kommutierter Gleichstrommotor

- DC motor: Basic principle, construction, modeling, circuit arrangements, universal motor
- Power electronics: Buck converter, B4 und B6 full bridges, AC converters for universal motors
- Current and speed control
- AC motors: One-phase motor, capacitor motor, shaded-pole motor
- Induction motor: Basic principle and construction, stationary characteristics of torque vs. speed, Kloss' formula, phasor diagrams, frequency loci, power factor
- Synchronous motor and generator: Basic principle and construction, phasor diagrams, stationary behavior

Mechatronics and electrical drives

Lecturer: Böcker

Duration: 2h lecture and 2h exercise per week 6 ECTS points*, winter semester

Participants: Master students

Contents:

- Introduction and definition of mechatronic systems (mechanics, electrical engineering, information technology)
- Characteristics of mechatronic systems: Flow of energy, material and information, closed-loop control
- Energetic principles: electromechanic quadropole, power balance, internal energy, co-energy
- Ferromagnetic materials: Magnetizing curve, hysteresis, magnetizing losses, permanent magnet materials
- Analysis of magnetic circuits: Fields, reluctance, inductance, flux, magnetomotive force
- Modelling and control of a mechatronic system with a magnetic bearing as example
- Switched reluctance motor
- DC motor
- Electronically commutated DC motor

* Modulhandbuch zum Akkreditierungsbericht Bachelor-Master-Studienprogramm Elektrotechnik Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik der Universität Paderborn, Februar 2009



Geregelte Drehstromantriebe

Dozent: Böcker

Umfang: 2 SWS Vorlesung, 2 SWS Übung, 6 ECTS-Punkte*, im Sommersemester

Teilnehmer: Master-Studenten

Inhalte:

- Drehstrommaschinen: Synchronmotor und Asynchronmotor (Aufbau, Wirkungsweisen, Modellierung, Ersatzschaltbilder, Kennlinien, Arbeitsbereiche)
- Drehmoment und Drehzahl-Steuerung
- Raumzeigertheorie: Grundwellenfelder, Bezugssysteme, Koordinatentransformationen
- Prinzipien der flussorientierten Regelung f
 ür Drehstrommaschinen
- Strom-, Drehmoment- und Drehzahl-Regelung, Methoden des Regelungsentwurfs
- Direkte Drehmoment Regelung (DTC)
- Beobachter

Antriebe für umweltfreundliche Fahrzeuge

Dozent: Böcker

Umfang: 2 SWS Vorlesung, 2 SWS Übung, 6 ECTS-Punkte*, im Wintersemester

Teilnehmer: Master-Studenten

Inhalt:

- Elementare Fahrdynamik: Kräfte, Bewegungsgleichungen, Kraftschluss
- Energiespeicher: Treibstoffe, Schwungräder, Batterien, Superkondensatoren
- Elektromotoren und Umrichter: Asynchronmotor, Permanentmagnet-Synchronmotor, Geschalteter Reluktanzmotor
- Verbrennungsmotoren: Drehmoment-Drehzahl-Verhalten, Wirkungsgrade, Kennfelder
- Brennstoffzelle: Wirkungsweise, Betriebseigenschaften
- Strukturen elektrischer und hybrider Antriebe: Elektroantriebe, dieselelektrische Antriebe, Serien,- Parallel-, Split-Hybrid, Brennstoffzellenantrieb

Controlled three-phase drives

Lecturer: Böcker

Duration: 2h lecture and 2h exercise per week 6 ECTS points*, summer semester

Participants: Master students

Contents:

- AC motors: Synchronous and induction motor (basics, construction, modelling, equivalent circuit diagrams, characteristics, applications)
- Control of torque and speed
- Space vector theory: Fundamental waves, reference systems, coordinate transforms
- Principles of field oriented control for AC motor drives
- Current, torque and speed control, control design methods
- Direct Torque Control (DTC)
- Observers

Drives for environmentally compatible vehicles

Lecturer: Böcker

Duration: 2h lecture and 2h exercise per week, 6 ECTS points*, winter semester

Participants: Master students

Contents:

- Elementary drive dynamics: Forces, equations of motion, adhesion
- Energy storage: Fuel, flywheels, batteries, double layer capacitors
- Electric motors and converters: induction motor, permanent magnet synchronous motor, switched reluctance motor
- Internal combustion engines: characteristics of torque vs. speed, efficiency, engine characteristics
- Fuel cell: Principles, operating properties
- Structures of electric and hybrid drives: Electrical drive, diesel-electrical drive, serial hybrid, parallel hybrid, split hybrid drive, fuel cell drive

66

- Systemverhalten und Betriebsstrategien
- Beispiele von Straßen- und Schienenfahrzeugen

Leistungselektronik

Dozent: Böcker

Umfang: 2 SWS Vorlesung, 2 SWS Übung, 6 ECTS-Punkte*, im Sommersemester

Teilnehmer: Master-Studenten

Inhalte:

- Idealisierung leistungselektronischer Schaltungen als schaltende Netzwerke
- Grundschaltungen selbstgeführter Stromrichter: Tiefsetzsteller, Hochsetzsteller
- Grundschaltungen fremdgeführter Stromrichter
- Kommutierung, Entlastungsschaltungen
- Mittelwertmodellierung, Regelungsstrukturen
- Pulsweitenmodulation, Strom- und Span nungsschwankungen, Oberschwingungen
- Thermische Modellierung und Auslegung
- Beispielanwendungen aus den Bereichen Bahn, Straßenfahrzeuge, Industrie

Elektronische Stromversorgungen

Dozent: Böcker/Fröhleke

Umfang: 2 SWS Vorlesung, 2 SWS Übung, 6 ECTS-Punkte*, im Wintersemester

Teilnehmer: Master-Studenten

Inhalt:

- Grundlagen selbstgeführter Stromrichter: Transistoren als Schaltelemente, Schaltungen, Modulation, Regelung
- Grundschaltungen potentialtrennender
 Gleichstromumrichter
- Resonanztechnik für verlustarmes Schalten
- Regelungstechnische Modellierung von Schaltnetzteilen
- Netzgleichrichter mit sinusförmiger Stromaufnahme: Leistungsteil und Regelungskonzepte

- System behavior and operation strategies
- Examples of road and rail vehicles

Power electronics

Lecturer: Böcker

Duration: 2h lecture and 2h exercise per week 6 ECTS points*, summer semester

Participants: Master students

Contents:

- Idealization of power electronic circuits as switching networks
- Basic circuits of self-commutated converters, buck converter, boost converter
- Basic circuits of load- and grid-commutated converters
- Commutation, snubber circuits
- Average modeling, control structures
- Pulse width modulation, current and voltage ripple, harmonics
- Thermal modeling and design
- Application examples from rail and road vehicles, and industry

Electronic power supplies

Lecturer: Böcker/Fröhleke

Duration: 2h lecture and 2h exercise per week 6 ECTS points*, winter semester

Participants: Master students

Contents:

- Basics of self-commutated converters: transistors as circuit elements/components, circuits, modulation, control
- Basic circuits of electrically insulated DC converters
- Resonance technique for low-loss switching
- Control design of switched-mode power supplies
- High power factor rectifiers: power electronics and control concepts

* Modulhandbuch zum Akkreditierungsbericht Bachelor-Master-Studienprogramm Elektrotechnik Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik der Universität Paderborn, Februar 2009



Bauelemente der Leistungselektronik

Dozent: Böcker/Fröhleke

Umfang: 2 SWS Vorlesung, 2 SWS Übung, 6 ECTS-Punkte*, im Sommersemester

Teilnehmer: Master-Studenten

Inhalte:

- Leistungshalbleiter-Bauelemente: Dioden, BJT, GTO, MOSFET, IGBT, MCT
- Beschaltung, Ansteuerung und Schutz von Halbleiterventilen und Bauelementen Kühleinrichtungsauslegung
- Magnetwerkstoffe, Kernverluste, Messschaltungen, Wicklungsarten
- Konzept der magnetischen Integration
- Elektromechanisch-thermischer Entwurf ungekoppelter, linearer-gekoppelter, nichtlinearer Spulen und von Schaltnetzteiltransformatoren und ihre Modellbildung
- Kondensatoren in der Leistungselektronik
- Filterentwurf und Schutzbauelemente

Rechnergestützter Entwurf leistungselektronischer Schaltungen

Dozent: Böcker/Fröhleke

Umfang: 2 SWS Vorlesung, 2 SWS Übung, 6 ECTS-Punkte*, im Wintersemester

Teilnehmer: Master-Studenten

Inhalte:

- Schaltungsanalyse mit Hilfe analytischer und numerischer Verfahren der Computeralgebra
- Modellbildungsansätze und Modelle für Leistungshalbleiter Bauelemente und magnetische Komponenten
- Mittelwertmodellbildung geschalteter elektrischer Netzwerke und Verhaltensmodelle integrierter analoger/digitaler Schaltungen
- Simulationsverfahren und Simulation f
 ür die Leistungselektronik, Analysearten, Bauteilbibliotheken, Modellierungssprachen, Anwendungen
- Entwurf und Optimierung magnetischer Bauteile; Zielfunktionen, Optimierungsalgorithmen

Components of Power Electronics

Lecturer: Böcker/Fröhleke

Duration: 2h lecture and 2h exercise per week 6 ECTS points*, summer semester

Participants: Master students

Contents:

- Power semiconductor components: Diodes, BJT, GTO, MOSFET, IGBT, MCT
- Circuit/wiring, control and protection of semiconductor valves and components, cooling device layout
- Magnetic material, core-loss, measurement circuits, winding types
- Concept of magnetic integration
- Electromechanic thermal design of not coupled, linear coupled, non-linear chokes/coils and of switched-mode power supply transformers and their modeling
- Capacitors in power electronics
- Filter design and protective components

Computer-aided design of power electronic circuits

Lecturer: Böcker/Fröhleke

Duration: 2h lecture and 2h exercise per week 6 ECTS points*, winter term

Participants: Master students

Contents:

- Circuit analysis by means of analytical and numerical methods of computer algebra
- Modeling of power semiconductor components and magnetic components
- Averaging methods for switched model electrical circuits and response models of integrated analog/digital circuits
- Simulation methods in power electronics, analysis types, component library, modeling languages, applications
- Design and optimization of magnetic components, objective functions, optimization algorithms



Seminar Antriebstechnik und Leistungselektronik

Dozent: Böcker

Umfang: 2 SWS Seminar, jedes Semester

Teilnehmer: Bachelor- und Master-Studenten

Inhalte:

- Vorträge über aktuelle Themen der Antriebstechnik und Leistungselektronik
- Abschlussvorträge über Studien-, Diplom-, Bachelor- und Masterarbeiten am Fachgebiet

Projektseminar

Dozent: Böcker

Umfang: 6 SWS Seminar

Teilnehmer: Bachelor- und Master-Studenten

Inhalte:

- Selbstständige Projektarbeit in Gruppen zu Themen der Leistungselektronik und elektrischen Antriebstechnik wie:
 - Hybrid-elektrischer Antrieb für ein Kart
 - Digital geregelter netzfreundlicher Gleichrichter

Seminar in Power Electronics and Electrical Drives

Lecturer: Böcker

Duration: 2h seminar per week both semesters

Participants: Bachelor- and Master students

Contents:

- Lecturing on current topics of drive systems and power electronics
- Final presentations on diploma-, bachelor- and master thesis at our department

Project seminar

Lecturer: Böcker

Duration: 6 hours per week seminar

Participants: Bachelor- and Master students

Contents:

- Self-reliant project work in groups addressing topics of power electronics and electrical drives such as:
 - Hybrid-electrical drive for a kart
 - Digitally-controlled rectifier

* Modulhandbuch zum Akkreditierungsbericht Bachelor-Master-Studienprogramm Elektrotechnik Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik der Universität Paderborn, Februar 2009



Kooperationen

Kooperationen innerhalb der Universität Paderborn

 Sonderforschungsbereich SFB614 "Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus"

Cooperations

Cooperation within the University of Paderborn

• Collaborative Research Centre 614 – Selfoptimizing Concepts and Structures in Mechanical Engineering

Sonderforschungsbereich 614 Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus

http://www.sfb614.de/

- Institut für Industriemathematik (IFIM)
- Institute for Industrial Mathematics (IFIM)

Cooperation beyond the University of



http://ifim.uni-paderborn.de/

Kooperationen außerhalb der Universität Paderborn

• European Center for Power Electronics e.V.

http://www.ecpe.org/home/home_e.php

 Hochschulnetzwerk Leistungselektronik und Antriebstechnik Nordrhein-Westfalen



Hochschulnetzwerk Leistungselektronik und Antriebstechnik Nordrhein-Westfalen

Paderborn

Competence Centre



Impressum

Herausgeber

Prof. Dr.-Ing. Joachim Böcker Fachgebiet Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik

Redaktion und Koordination

Prof. Dr.-Ing. Joachim Böcker Dipl.-Ing. Tobias Schneider

Anschrift

Universität Paderborn Fachgebiet Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik Warburger Straße 100 33098 Paderborn Telefon +49-5251-60-2210 Telefax +49-5251-60-3443 http://wwwlea.upb.de

Stand

Januar 2010



Fachgebiet Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik

Warburger Straße 100 33098 Paderborn

Telefon +49-5251-60-2210 Telefax +49-5251-60-3443

http://wwwlea.upb.de