

Liebe ehemalige und jetzige LEAner/innen, liebe Förderer des Fachgebiets LEA!

Herzlich willkommen zur 10. Ausgabe unseres LEAiD-Newsletters. Unser Symposium findet dieses Jahr am 01.07.2011 bei der Fa. Lenze in Aerzen bei Hameln im Anschluss an eine Exkursion statt. Ich möchte kurz über ausgewählte Neuigkeiten des letzten Jahres berichten, wobei ich den Fokus diesmal auf LEA-Internes lege. Denn allein schon die Zahl der 12 neuangestellten Mitarbeiter entspricht der Größe unseres Fachgebiets in guten Zeiten, wobei 2 ausgeschieden sind und wir nun 22 wissenschaftliche Mitarbeiter haben und Christoph Romas zum Oberingenieur befördert wurde, um den Betreuungsschlüssel der gestiegenen Mitarbeiterzahl anzupassen.

In den letzten Jahren dürfte die Universität Paderborn die größte Baustelle im Stadtgebiet gestellt haben: Vom Südring fallen das neue Technikgebäude K und das J-Gebäude auf. Die Bautätigkeiten in unserer unmittelbaren Nachbarschaft bescheren uns im Westen unserer IW Halle ein 97 m breites, 4-stöckiges Gebäude namens O, welches das PC², IMT und die Informatik am Campus It. Beschluss des Präsidiums beherbergen wird. Das zu gründende Kompetenzzentrum für Energietechnik mit uns als Partner wird Ende dieses Jahrs in die Ebenen 3 und 4 des Gebäudes E (zwischen A und N) umziehen, was uns endlich mal ein Zusammenziehen aller wissenschaftlichen Mitarbeiter erlaubt, die z.Z. in 4 Gebäuden untergebracht sind. Dazu stellt ein Zwischengebäude den Anschluss zwischen Gebäude O und IW her, dessen Treppenhaus direkt an die W-Wand des IW-Gebäudes andockt. Zwischenzeitlich werden deshalb die direkt angrenzenden Räume für einige Wochen nur eingeschränkt nutzbar sein. Am Pohlweg ist noch ein weiteres Studentenwohnheim entstanden, so dass Schafe eigentlich nur noch innerhalb des Railcabs grasen könnten. Der Rest des früheren freien Felds ist verbaut. Zwischen dem N-Gebäude und dem Südring entstand noch ein Vorlesungsgebäude für 2 mal 400 Sitzplätze plus Seminarräume, damit für die vorhandene Überlast von ca. 880 Studenten und die 500 zusätzlichen Studenten im Zusammenhang mit dem Doppeljahrgang ab 2012 bis ca. 2015 genug Räumlichkeiten bereitstehen.

Die Besetzung der Junior-Professur Automatisierungstechnik ist leider immer noch nicht gelungen. Zum Glück übernimmt Herr Prof. Gausch weiterhin mit viel Engagement die Lehrveranstaltungen dieses Bereichs. Das Fachgebiet Schaltungstechnik wird nach dem Wechsel von Herrn Prof. Rückert an die Universität Bielefeld derzeit kommissarisch von Herrn Dr. Porrmann geleitet. Mit der Wiederbesetzung kann aber in Kürze gerechnet werden. Zum Wintersemester 2010 hat Herr Prof. Stefan Krauter als Nachfolger von Prof. Voss die Professur Elektrische Energietechnik angetreten, so dass die Kontinuität in diesem wichtigen Fachgebiet gesichert ist. Spezialgebiet von Herrn Prof. Krauter sind photovoltaische Energiesysteme. Ebenfalls zum Wintersemester hat Frau Dr. Katrin Temmen ihren Dienst als Juniorprofessorin für Technikdidaktik angetreten. Damit steht ein wichtiger Bestandteil des Studiums „Berufsbildung“ nun zur Verfügung. Die Lehrveranstaltungen der Technikdidaktik sind aber auch für die „normalen“ Ingenieurstudenten offen. Auch die Nachfolge von Herrn Prof. Meerkötter ist gesichert. Seit dem Sommersemester vertritt Herr Prof. Peter Schreiber, der zuvor an der University of Newcastle in Australien lehrte, das Fachgebiet Signal- und Systemtheorie. Die Firma Hella hat eine neue Junior-Professur Lichttechnik gestiftet, die bereits ausgeschrieben wurde, aber noch nicht besetzt ist. Leider verlässt uns Herr Prof. Rolf Schuhmann (Theoretische Elektrotechnik) zum Ende des Semesters, der einen Ruf an die TU Berlin erhalten hat.

Wirtschaft und Hochschulen der Region OWL haben als herausragendes Kompetenz- und Handlungsfeld für Wachstum und Beschäftigung „Intelligente Technische Systeme“ identifiziert und realisieren das Forschungs- und Entwicklungscluster „Zukunftsmeile Fürstenallee“ in Paderborn. Als wesentlicher erster Teil dieser Zukunftskonzeption ist ein Fraunhofer Institut, das sich auf den Entwurf von mechatronischen Systemen und den dafür notwendigen Produktionssystemen konzentriert, gegründet. Das neu errichtete Gebäude wird im September dieses Jahres bezogen. Näheres dazu s. www.ipt.fraunhofer.de/mechatronik.

Im Winter/Frühjahr 2011 schlossen sich die Hochschulen OWL in Bielefeld, Lemgo und Paderborn unter der Leitung von Prof. Gausemeier zu einem Spitzencluster-Antrag „Intelligente Techni-

sche Systeme“ zusammen, der z.Z. in der Evaluierung ist. Hier wären wir im Falle eines „Überspringens der 1. Hürde“ mit erheblichem Volumen dabei, vorausgesetzt wir schaffen auch die „2.Hürde“ mit unseren langjährigen OWL-Industriepartnern. Aber warten wir erst mal die Entscheidung ab!

Nachdem die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) unseren Antrag der Fortsetzung des Sonderforschungsbereichs Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus (SFB 614) 2009 genehmigt hat, was für die UPB und unser Fachgebiet ein Eckfeiler kooperativer Forschung darstellt, stand im letzten Jahr, neben einem Generationswechsel der Mitarbeiter (Schneider, Romaus -> Schulte, Stille), das komplettierende Schreiben eines Transferprojektes an, damit das Selbstoptimierungskonzept auch Nutzen durch industrielle Anwendung bringt. Ein erstes Projekt wurde in Verbindung mit unserem langjährigen Industriepartner LTi formuliert, was das bisher erarbeitete Instrumentarium der Selbstoptimierung umfassend nutzt. Im Transferprojekt soll eine selbstoptimierende Antriebsregelung auf Basis rekonfigurierbarer FPGA ab Mitte 2011 entwickelt werden. Der angestrebte Nutzen liegt in der einfacheren Adaptierbarkeit eines Standardgeräts an verschiedenste Konfigurationen und Betriebsbedingungen. „*Transferprojekte* dienen lt. DFG Richtlinien dazu, Erkenntnisse der Grundlagenforschung eines Sonderforschungsbereichs unter Praxisbedingungen zu prüfen oder in eine prototypische Anwendung umzusetzen“. Dabei arbeiten im Projekt Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus dem Sonderforschungsbereich mit Kooperationspartnern (etwa einem Unternehmen, einem Verband oder einer öffentlichen Einrichtung) zusammen. Transferprojekte stehen allen Wissenschaftsgebieten offen. Anwendungsfelder reichen von der industriellen Produktion über Methoden- und Verfahrensentwicklungen und dem Dienstleistungssektor bis hin zu gesellschaftlichen Aufgaben.

Ein weiterer für die upb maßgeblicher Forschungsantrag, der die Resultate des o.g. Sonderforschungsbereichs (SFB 614) nutzen würde und i.R. der Exzellenzinitiative des Bundes steht, namens „Engineering Self-Coordinating Software Intensive Systems“, hat die Erste Hürde der Begutachtung genommen und der endgültige Antrag wird nun von den beteiligten Partnern der Informatik,

ET und MB ausgearbeitet. Ziel des Antrags ist eine systematische Fundierung selbstorg., Softwareintensiver Systeme und deren Umsetzung in eine integrierte ingenieurwissenschaftliche und softwaretechnische Konstruktionsmethode. Solche Systeme zeichnen sich durch Autonomie, Verteiltheit und nicht zentral ausprogrammiert zur Entwurfszeit aus, um durch Selbstorganisation, -adaptivität und -optimierung auf unerwartete Ereignisse im laufenden Betrieb zu reagieren. Wir sind daran ebenfalls beteiligt, weil diese Methodik und die entstehenden Tools an den Anwendungen Railcab, Fahrerassistenzsystemen und Roboterschwärmen validiert werden sollen. In einem weiteren DFG-Projekt geht es um „Reconfigurable System for Improved Control Performance and Fault Tolerance of Variable Speed AC Drives“. Ziel ist „To demonstrate the advantages of reconfigurable control applied to electrical drives. The concept of reconfigurable control is expected to achieve a control performance in the whole operation area close to the respective optimum as well as to provide fault tolerance with respect to sensor failures“. Erfreulicherweise konnten wir für dieses Projekt einen gut eingearbeiteten eigenen Diplomanden (Hr. Buchholz) gewinnen.

Auf der Seite der Industrieprojekte führen wir neben dem o.g. DFG-Transferprojekt mit unserem bewährten Partner LTi DRiVES in Unna die Forschungszusammenarbeit auch auf dem Gebiet hocheffizienter Solarwechselrichter hoher Leistung fort, wozu öffentliche Fördergelder eingeworben wurden. Eine 1. Publikation erscheint dieses Jahr und die öffentliche Projektförderung endet dieses Jahr. Daran arbeiten Hr. Preckwinkel bei LTi und Hr. Krishna bei uns, unterstützt von einem weiteren Stipendiaten Hr. Sharabash seit Kurzem.

Mit Delta Energy Systems (Soest) laufen zwei Forschungsprojekte weiter zu Stromversorgungen hoher Wirkungsgrade (Hr. Figge) und ihrer digitalen Steuerung und Regelung (Hr. Grote). Die beiden Forschungsprojekte laufen min. noch bis 2012. Das Kooperationsabkommen mit der chinesischen Universität in Hangzhou, initiiert von Delta-es hat zwar noch keinen Austausch von Diplomanden befördert, aber ein erster Doktorand mit einem Stipendium startete im Nov. 2010 bei LEA auf dem Gebiet der bidirektionalen dc/dc-Wandler.

Ein im Sommer 2007 gestartetes Projekt zur Entwicklung von Resonanzkonverter gespeisten Hochspannungsprüfgeräten mit Firmen aus dem Bodenseeraum, wobei eine sinusförmige Prüfspannung von 85 kV (RMS) mit 0,1 Hz generiert wird, ergab relativ viel Neuland auf leistungselektronischem Gebiet. Deshalb wurde ein Antrag auf EU Förderung für ein Konsortium mit 9 Partnern von uns gestellt. Er wurde bewilligt, inhaltlich auch auf hochdynamische DC-Quellen für die Speisung von Antrieben, PV-Wechselrichter, die Emulation von Batterien erweitert und seit dem Sept. 2009 werden drei Mitarbeiter (Hr. Cao, Rekers und Frau Hu) daraus finanziert, mit den entsprechenden Publikationen in den letzten Jahren.

Dann befasst sich ein neues Projekt mit der „Entwicklung der Ansteuerung für die frequenzvariable Umformung sehr großer Leistungen (>100MW) mit Thyristorstromrichtern zur Effizienzsteigerung von Turbo-Generator-Sätzen“. Hierbei soll bei mittelgroßen Kraftwerken die starre Kopplung zwischen dem elektrischen Netz und dem Generator zwecks Effizienzsteigerung durch einen Umrichter aufgehoben werden. Der Generator kann gegenüber dem elektrischen Netz eine andere Phasenlage, Frequenz und Amplitude aufweisen. Die Leistung wird durch einen Direktumrichter in das elektrische Netz übertragen und er kommt ohne einen Gleichspannungszwischenkreis aus. LEA beschäftigt sich mit einem neuen Steuerverfahren, dass an einem herunterskalierten Direktumrichter-Prüfstand für 50 kW, der z.Z.im Aufbau ist, noch dieses Jahr von Hr. Lönneker erprobt werden soll.

Ziel eines weiteren Förderprojekts mit der Industrie ist die Entwicklung eines sterilen Rührwerks mit einem berührungslos magnetisch gelagerten Rührer und integriertem Antrieb, welches die derzeitigen Nachteile mechanisch gelagerter Rührwerke für Lebensmittel und pharmazeutische Produkte ausschließt. Ein Prototyp wurde dazu aufgebaut und vermessen. Erhebliche Modifikationen sind demgemäß noch erforderlich.

Das vom Land NRW eingeworbene Projekt „Entwurfsumgebung E-Mobil“ wurde im Nov. 2010 begonnen, was auf der Seite von LEA durch die Herren Peter und Leuer bearbeitet wird. Im folgenden kurz zu den Inhalten: Im Gegensatz zu den bekannten Strukturen und Steuergeräten bei konventionellen Fahrzeugen, müssen bei der Elektrifi-

zierung des Antriebsstrangs bei Elektrofahrzeugen erst noch Erfahrungen gesammelt werden. Während des Entwicklungsprozesses werden daher üblicherweise kosten- und zeitintensive Untersuchungen an Prüfständen und Prototypen benötigt. Dies ist eine hohe Einstiegshürde für die Wirtschaft, speziell für kleine und mittlere Unternehmen. Vor diesem Hintergrund hat es sich ein Konsortium aus Industrieunternehmen aus NRW (dSPACE, DMecS) und der Universität Paderborn mit dem Fachgebiet LEA und dem C-LAB zur Aufgabe gemacht, eine Entwurfs- und Testumgebung zu entwickeln, mit deren Hilfe ein frühzeitiger simulationsgestützter Test virtueller Steuergeräte und deren Zusammenspiel in verschiedenen Fahrzeugstrukturen ermöglicht werden soll. Dadurch soll einerseits der Entwicklungsprozess für E-Fahrzeuge verkürzt und zum anderen durch umfangreiche Simulationen zu einem frühen Zeitpunkt optimiert werden können. Als Kooperationspartner dieses Projektes besteht der Arbeitsschwerpunkt der Universität Paderborn in der Entwicklung einer Entwurfsmethodik zur durchgängigen Validierung der Steuergerätesoftware, der Unterstützung dieser Methodik durch Simulation mittels virtueller Prototypen sowie dem Entwurf neuartiger Regelungs- und Optimierungsalgorithmen für Elektromotor und Energiemanagement von E-Fahrzeugen.

Zu guter Letzt möchte ich noch zwei aus der Industrie finanzierte Projekte mit neuen Partnern nennen. Die AEG-PS fördert Untersuchungen zu Industriestromrichtern mit hohem Wirkungsgrad und Leistungsfaktor für Industrieanwendungen, wofür wir den F&E-erfahrenen Hr. Solanki gewinnen konnten. Und das durch Hr. Cao erfolgreich abgeschlossene Vorprojekt „Development of Simulation Platform for Electric Drive System of an AC Electric Locomotive“ erschloss uns auch das gleichgenannte Hauptprojekt mit der Fa. CSR Zhuzhou Electric Locomotives, wofür wir ebenfalls einen industrieerfahrenen Mitarbeiter Hr. Sun gewinnen konnten, der ab dem Winter von Hr. Cao unterstützt wird.

Im abgeschlossenen Jahr konnten wir zwei Promotionen feiern: Unser Warburger Landkind Tobias Knoke und unser erster indischer Gastarbeiter Shashidar Mathapati haben längst neue Arbeitgeber gefunden. Dennoch steht eine halbe Fußballmannschaft von Doktoranden noch an zu erfahren, was ein echter Lastabwurf ist. Die Teilnahme an

Tagungen war im Berichtszeitraum dank der nach wie vor erfreulich hohen Akzeptanz unserer vorgeschlagenen Beiträge bei den Gutachtern wieder hoch und 2 Beiträge brachten den Autoren sogar den Best Paper Award ein.

Ich hoffe auf ein Wiedersehen bei der einen oder anderen Promotionsfeier, aber zuvor bei unserem LEAiD Treffen am 01.07.2011 bei der Fa. Lenze in Aerzen bei Hameln.

Wünsche euch allen einen guten Wirkungsgrad, Kreativität beim Schaffen und Ausdauer

Mit freundlichen Grüßen

Für den Vorstand

Norbert Fröhleke

LEAiD 10. Symposium

Das diesjährige LEAiD-Symposium findet am *01.07.2011 ab 14 Uhr* statt. Tagungsstätte ist nach 2009 wiederum ein Industrieunternehmen: Die Firma *Lenze* an ihrem Stammsitz in Aerzen/Groß Berkel. Eine Anfahrtsbeschreibung ist dem Newsletter angehängt. Neben den sicher interessanten Vorträgen und einer Betriebsführung wird auch die jährliche Mitgliederversammlung unseres Vereins durchgeführt. Vormittags haben Studenten der UPB und LEA-Mitarbeiter zudem die Möglichkeit im Rahmen einer Exkursion die Firma Lenze eingehender kennen zu lernen. Im Anschluss an den offiziellen Teil wollen wir selbstverständlich wieder die Möglichkeit des geselligen Beisammenseins nutzen. Hierfür wurde die Weser Insel Werder in Hameln ausgewählt (www.dieinsel-hameln.de, Geodaten 52.103904,9.351125 in Google-Maps). Parkmöglichkeiten unter www.hameln-stadtmarketing.de/service/parken-in-hameln.html, besonders geeignet ist das Parkhaus Rattenfängerhalle (52.099689,9.354965) oder mit etwas Glück auch direkt auf der Insel (52.103145,9.351671).

Tagesordnung

14:00-14:30 Eröffnung und Vorstellung der Firma Lenze

14:30-16:00 Vortragsblock 1

- Kurzvortrag Mechatronik
- Fachvorträge der Firma Lenze

16:00-16:45 Große Kaffeepause

16:45-17:45 Vortragsblock 2

- Fachvortrag 1 (n.n.)
- Bekanntgabe des LEAiD-Award Gewinners und Verleihung
- Fachvortrag 2 (Gewinner des LEAiD-Awards)

17:45-18:15 Mitgliederversammlung

1. Begrüßung und Eröffnung
2. Feststellen der Beschlussfähigkeit
3. Wahl der Versammlungsleitung
4. Wahl der Protokollführung
5. Bericht des Vorstandes
6. Bericht der Kassenprüfer
7. Entlastung des Vorstandes
8. Wahlen
9. Verschiedenes

18:45-00:00 Gemütliches Beisammensein

Neue Mitarbeiter



Herr **Dipl.-Ing. Christoph Romaus** unterstützt seit dem 1. Sept. 2010 als Akademischer Rat die Fachgebietsleitung bei der Projektabwicklung, Projektführung und Anleitung der mittlerweile 22 wissenschaftlichen Mitarbeiter und Doktoranden. Der

Schwerpunkt seiner Tätigkeiten liegt im Bereich Antriebstechnik. Zuvor war Herr Romaus seit 2005 wissenschaftlicher Mitarbeiter bei LEA und im Sonderforschungsbereich 614. Er erforschte selbstoptimierende Betriebsstrategien für das Energiemanagement eines hybriden Energiespeichersystems aus Batterien und Doppelschichtkondensatoren. Sein Studium der Elektrotechnik und Informationstechnik an der RWTH Aachen schloss er 2004 mit einer Diplomarbeit zum Thema „Dynamic Voltage Restorer für Mittelspannungsnetze“ ab.



Herr **Dipl.-Ing. Christoph Schulte** ist seit dem 1. Oktober 2010 im Fachgebiet LEA als wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig. Er beschäftigt sich hierbei im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 614 mit selbstoptimierenden Antrieben. Sein Studium der

Elektrotechnik hat Herr Schulte an der Universität Paderborn absolviert und im September 2010 mit einer Diplomarbeit über die FEM-gestützte Feldanalyse eines Permanentmagnet-Synchronmotor mit eingebetteten Magneten abgeschlossen. Im Jahr 2010 wurde er zudem mit dem erstmalig verliehenen LEAiD-Award für herausragende Studienleistungen im Bereich der elektrischen Antriebstechnik ausgezeichnet.



Herr **Dipl.-Ing. Michael Leuer** ist seit dem 1. Dezember 2010 im Fachgebiet Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik (LEA) als wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig. Schwerpunktmäßig wird sich Herr Leuer mit Fragestellungen rund um Elektrofahrzeuge be-

schäftigen. Das Projekt findet in Kooperation mit Partnern aus der Automobilindustrie, sowie der Universität Paderborn statt. Während seiner Diplomarbeit an der Universität Paderborn hat sich Herr Leuer mit dem Thema „Entwurf und Evaluation einer modellprädiktiven Regelung für einen permanenterregten Synchronmotor“ befasst.



Herr **Dipl.-Ing. Karl Stephan Stille** ist seit dem 1. September 2010 im Fachgebiet LEA als wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig. Er beschäftigt sich hierbei im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 614 mit selbstoptimierenden Betriebsstrategien für das Energiema-

agement eines hybriden Energiespeichersystems aus Batterien und Doppelschichtkondensatoren und setzt damit die von Herrn Romaus begonnene Arbeit fort. Sein Studium der Mechatronik hat Herr Stille an der Johannes-Kepler-Universität in Linz/Donau absolviert und im April 2009 mit einer Diplomarbeit über die Positionsensorlose Regelung eines Permanentmagnet-Synchronmotors abgeschlossen.



Herr **Dipl.-Ing. Oleg Buchholz** ist seit dem 1. Dezember 2010 als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik tätig. Seine Forschungsarbeiten konzentrieren sich auf den Bereich rekonfigurierbarer

Systeme zur Steigerung der Regelungsperformance und Fehlertoleranz frequenzvariabler Antriebe. Sein Studium der Elektrotechnik schloss er an der Universität Paderborn mit einer Diplomarbeit zum Thema „FPGA-basierte Regelung eines geschalteten Reluktanzmotors mit Delta-Sigma-Wandlern zur Messwerterfassung“ erfolgreich ab.



Herr **M.Sc. Klaus Peter** ist seit dem 01. Juni 2010 am Fachgebiet Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik (LEA) als wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig. Im Rahmen seiner Arbeit beschäftigt er sich mit der Antriebsregelung und dem Energiemanagement auf dem Gebiet der Elektromobilität. Das Projekt findet in Kooperation mit Partnern aus der Automobilindustrie, sowie einem weiteren Institut der Universität Paderborn statt. Sein Masterstudium der Elektrotechnik und Informationstechnik absolvierte Herr Peter an der TU München. In seiner Masterarbeit befasste er sich mit der energiesparenden Fahrweise von Straßenbahnen.



Herr **Dipl.-Ing. Alexander Peters** ist seit dem 1. Juni 2010 beim Fachgebiet Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik (LEA) als wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig. Er beschäftigt sich hierbei mit der Neu-

en Bahntechnik Paderborn. Sein Studium der Elektrotechnik an der Universität Paderborn hat Herr Peters im Februar 2010 mit einer Diplomarbeit zum Thema Ansteuerung eines DMD-Scheinwerfersystems zur Erzeugung definierter Lichtverteilungen abgeschlossen.



Mr. **M.Sc. Krishna Dora** has joined LEA in July 2010. He received his M.Tech. degree in „Power Electronics and Power Systems“ from the Indian Institute of Technology, Bombay, India in 2004. Thereafter he joined Indian Space Research

Organization (ISRO) as a Scientist and worked in the field of low power DC-DC power supply development for satellite applications. He joined GE India Innovation Centre Hyderabad India in August 2006 and worked in the product development team of High power Industrial UPS systems, where he was into GE's Technical leadership program. His present research focus is on high efficiency power electronics for renewable energy applications.



Mr. **M.Tech. Jitendra Solanki** has joined LEA on Sept 2010. He received B.Tech. degree in „Electrical Engineering“ from G. B. Pant University of Agriculture and Technology, Pantnagar, India and the M.Tech. degree in „Power Electronics, Electrical

Machines and Drives“ from the Indian Institute of Technology, New Delhi, India in 2004 and 2006 respectively. Thereafter he joined GE Global Research Bangalore and handled projects in the field of high power UPS, medical power supplies, traction motor drives and rural electrification. From Aug 2009 to Aug 2010 he worked with Philips Research Asia, Bangalore. His research focus is on high power converters for power system applications.



Mr. **M.Sc. Junbing Tao** has joined LEA on Nov 2010. He received the M.Tech degree in „Power Electronics and Motor Drives“ from Zhejiang University, Hangzhou China in March 2010. During his master studying, he work with

Siemens, on a project about Hybrid Electrical Vehicle (HEV) bi-directional DC-DC converter. From Nov 2010, he started a new project about bi-directional DC-DC converter with isolation, with the Delta Power Systems. His research focus is bi-directional DC-DC converters, which have a wide application prospect in the future.



Mr. **M.Sc. Milind Paraskar** has joined LEA on March 2011. He received the M.Sc(Engg). degree from the Indian Institute of Science, Bangalore, India in 2005. Later he joined GE Global Research, Bangalore where he was

involved in design of IPM motor for traction application. From March 2007 to April 2009 he was with Integrated Electric Co. Pvt Ltd, Bangalore designing Brushless Motors. From June 2009 to Feb 2011 he worked as a Wissenschaftlicher Mitarbeiter at TU Darmstadt where he was involved in design of Permanent Magnet Generators for Wind and Tidal energy.



Mr. **M.Sc. Hosam Sharabash** has joined Lea on April 2011. He received the Bachelor of Engineering and Technology and Master of Science degree in „Electrical Engineering Technology“ from Benha High Institute of Technology „BHIT“, Benha University, Egypt

in 2003 and 2009 respectively. In 2010, he got a DAAD scholarship to study for his PHD at LEA in the field of renewable energy and power

electronics systems. His research focus is on Multilevel inverter as efficient utility interface for renewable energy systems.



Herr **M.Sc. Meng Sun** ist seit April 2011 als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik tätig. Im Rahmen eines Drittmittelprojektes beschäftigt er sich mit Echtzeit Simulation der elektrischen Antriebe

unter Verwendung von paralleler und rekonfigurierbarer Rechenhardware. Sein Masterstudium der Regelungstheorie und -technik hat Herr Sun in 2006 an der Tongji Universität (Shanghai, VR China) mit der Masterarbeit „Sensorless Control of Brushless DC Motor“ abgeschlossen. Von Feb 2008 bis April 2011 war Herr Sun bei der dSPACE GmbH und deren Tochterfirma in China jeweils als Software Entwickler und Field Application Engineer tätig. Bei dSPACE hat sich Herr Sun hauptsächlich mit Entwicklung der HiL und RCP Geräte und deren Anwendung auf Automobile und elektrische Antriebe beschäftigt.

Highlights 2010/11



Übergabe des Dr.-Hutes an Tobias Knoke nach erfolgreicher Verteidigung



Die Startaufstellung für den diesjährigen Sommerausflug



Der obligatorische Besuch des Media Marktes im Südring-Center



Ein weiterer Absolvent: Shashidhar Mathapati hat erfolgreich verteidigt



In diesem Jahr stand wieder Wasserski auf dem Programm des Sommerausflugs



Der gleichzeitige Konsum des Taufmittels bei der Dr.-Taufe ist ein Ausdruck von Rohstoff-Effizienz

Neue DC-Einspeisung für Antriebsprüfstand

TOBIAS HUBER

In den LEAiD Newslettern von 2007 und 2008 haben wir bereits über unsere beiden Prüfstände für elektrische Fahrzeugantriebe berichtet. Bis Mitte 2010 wurden die Prüfstände von einer 96 kW DC-Versorgung gespeist. Insbesondere bei dynamischen Vorgängen hat sich diese jedoch als eher ungeeignet erwiesen, was auf folgende Gründe zurückzuführen ist:

- Langsame Spannungsregelung der DC-Versorgung: Große Drehmomentsprünge können kurzfristig zu starken Einbrüchen in der Zwischenkreisspannung führen. Diese regen wiederum Schwingungen im mechanischen System an, was grundsätzlich die Gefahr der Instabilität birgt.
- Die Zwischenkreise des Prüfling- sowie des Lastumrichters sind direkt gekoppelt: Da die derzeit am Prüfstand eingesetzten Prüflingmotoren üblicherweise mit Spannungen zwischen 200V und 300 V betrieben werden, die Nennspannung der Lastmaschine dagegen bei 400 V liegt, ist die eigentliche Nennleistung der Lastmaschine (260 kW) nicht abrufbar. So wirkt die Lastmaschine hinsichtlich Drehmomentsprünge bei hohen Drehzahlen unterdimensioniert, was sich durch mehr oder weniger starke Drehzahlschwankungen bemerkbar macht.
- Relativ niedrige Nennleistung (96 kW) der DC-Versorgung schränkt den dynamischen Motorbetrieb weiter ein.
- Keine Rückspeisung ins Netz bei Bremsvorgängen: Die Bremsleistung wird durch Zuschalten eines Bremswiderstandes in Wärme umgesetzt (unwirtschaftlich, Wärmeentwicklung verhindert die Platzierung des Bremswiderstandes in der Prüfstandskabine).

Vor diesem Hintergrund wurde im Rahmen eines Industrieprojektes eine neue DC-Versorgung angeschafft, die den oben beschriebenen Problemen sinnvoll begegnet und zukünftig einen dynamischen Betrieb von Prüflingmotoren gestattet.

Dabei ist die Wahl auf die in Bayern ansässige und auf Stromversorgungslösungen spezialisierte Firma Gustav Klein gefallen. Die 2,2 m breite, 2 m hohe, 80 cm tiefe und c.a. 1500 kg schwere DC-Versorgung (s. Abbildung 1 und 2) ist rückspeisefähig und hat eine Nennleistung von 200 kW. Die maximal zulässigen Ausgangsströme betragen ± 500 A.

Der Einsatz eines Bremswiderstandes wird durch die Rückspeisefähigkeit der DC-Versorgung während des normalen Betriebs überflüssig. Er dient lediglich noch dem Zwecke der Schnellentla-



Bild 1: Eingangsstufe der DC-Versorgung: Netzfilter, Netztransformator und Gleichrichter



Bild 2: Ausgangsstufe der DC-Versorgung: DC/DC Steller zur Entkopplung der Zwischenkreise

derung der Zwischenkreiskondensatoren im Fehlerfall bzw. nach Abschalten der DC Versorgung.

Darüber hinaus kann das Spannungsniveau des Prüflingsmotors unabhängig vom Spannungsniveau der Lastmaschine variabel zwischen 50 V und 600 V eingestellt werden. Ermöglicht wird dies durch einen ausgangsseitigen DC/DC Steller, der die Spannungsniveaus für Prüfling und Lastmaschine voneinander entkoppelt und damit den Betrieb beider Maschinen in ihren jeweiligen optimalen (Nenn) Arbeitspunkten gewährleisten kann. Eine schnelle Spannungsregelung sorgt zudem für stabile Zwischenkreisspannung und ermöglicht den dynamischen Motorbetrieb. Die DC-Versorgung kann entweder über das angebrachte Control-Panel oder auch bequem über die CAN Schnittstelle vom Prüfstandsrechner aus bedient werden.

Prüfstandskonzept

Unser derzeitiges Prüfstandskonzept unter Einbeziehung der neuen DC-Versorgung von Gustav Klein soll in Abbildung 3 nochmal abschließend dargestellt werden. Der Prüflingsmotor und die Lastmaschine werden auf separaten Spannungsniveaus betrieben. Während die Zwischenkreisspannung des Prüflingsmotors (PMSM) mittels des ausgangsseitigen DC/DC Stellers variabel eingestellt

werden kann, wird die Lastmaschine (ASM) mit einer konstanten Zwischenkreisspannung (Abgriff am Ausgang des Gleichrichters) betrieben. Die Antriebsumrichter für Prüfling und Lastmaschine sind aus jeweils 3 parallel geschalteten Leistungsmodulen (IGBT Halbbrücken) der Fa. Semikron aufgebaut. Bei Prüfung eines gesamten Antriebes kann der industrielle Prüflingsumrichter zudem durch einen automobilkonformen Fremdumrichter problemlos ersetzt werden. Die Leistungsmodule der Frequenzumrichter werden über Digital I/Os der Rapid Prototyping Umgebung der Fa. dSpace angesteuert. Auf dieser sind auch die entsprechenden Regelalgorithmen für Lastmaschine und Prüfling implementiert. Für die separate Kühlung von Umrichter, Lastmaschine und Prüfling kommen Kühl- bzw. Temperiergeräte der Fa. Single zum Einsatz.

Fazit

Im Rahmen zahlreicher Motorvermessungen und Dynamiktests konnte die hohe Leistungsfähigkeit der neuen DC-Versorgung sowie des gesamten Prüfstandes unter Beweis gestellt werden. Die eingangs beschriebenen Probleme des bisherigen Prüfstandes konnten durch den Einsatz der neuen DC-Versorgung komplett behoben werden.

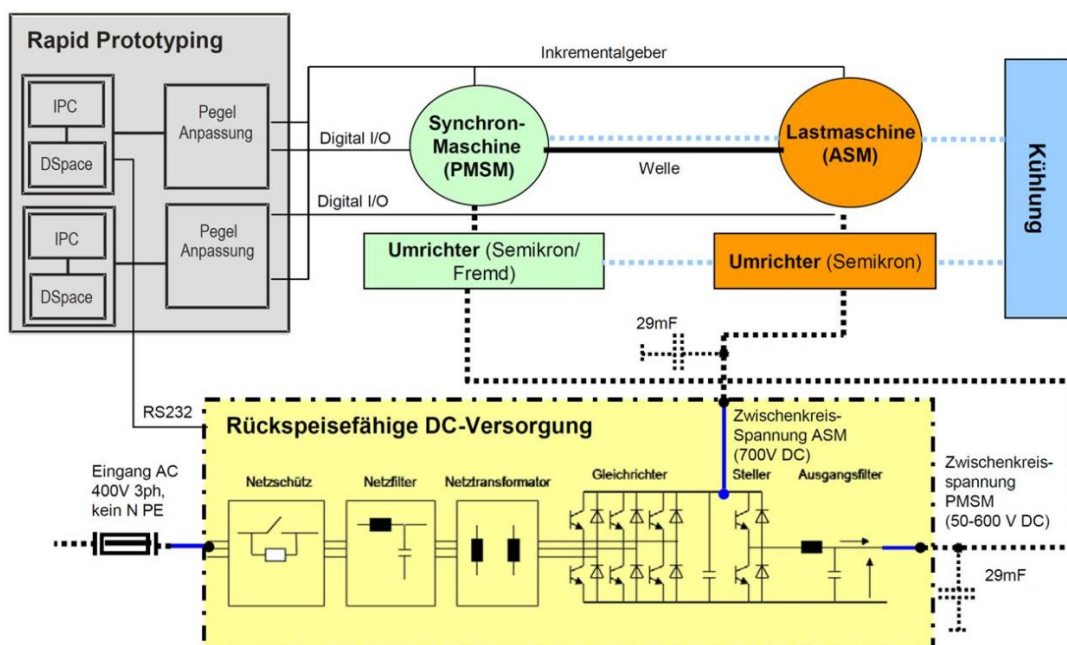


Bild 3: Schematischer Aufbau eines Motorenprüfstands am LEA

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und Fraunhofer-Gesellschaft verleihen DRIVE-E-Studienpreis 2011 für die Bachelorarbeit von Oliver Wallscheid

WILHELM PETERS

Die von B.Sc. Oliver Wallscheid am Fachgebiet LEA verfasste Bachelorarbeit „Entwurf einer Stromregelung mit definiertem dynamischen Verhalten für einen Permanentmagnet-Synchronmotor mit eingebetteten Magneten (IPMSM)“ wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und der Fraunhofer-Gesellschaft mit dem 2. Platz der DRIVE-E-Studienpreise für Innovationen im Bereich der Elektromobilität prämiert. Die Preisverleihung fand im Rahmen einer Festveranstaltung im Umspannwerk Ost in Berlin statt.



Bild 4: B.Sc. Oliver Wallscheid (Mitte) bei der Preisverleihung mit Prof. Dr. Ulrich Buller (Links), Forschungsvorstand in der Fraunhofer-Gesellschaft, und Dr. Georg Schütte (Rechts), Staatssekretär im Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (Quelle Foto: BMBF)

Die DRIVE-E-Studienpreise wurden 2011 erstmals in zwei verschiedenen Kategorien ausgelobt. In der Kategorie „Studien-/Bachelorarbeiten“ wurde die Studienarbeit über Fahrzeugsicherheit von Marcus Walter von der TU Kaiserslautern für den ersten Preis ausgewählt, der zweite Preis wurde an Oliver Wallscheid vergeben. In der Kategorie „Diplom- und Masterarbeiten“ teilen sich Mareike Hübner und Michael Reiter, beide RWTH Aachen, den ersten Preis für ihre Diplomarbeiten zum

Thema Antrieb. Der zweite Preis ging an Peter Keil von der TU München für seine Diplomarbeit im Bereich Batterieforschung. Dotiert ist der erste Preis mit je 5.000 Euro (3.500 Euro pro Person, wenn der Preis geteilt wird), für den zweiten Preis erhalten die Preisträger je 2.000 Euro.



Bild 5: B.Sc. Oliver Wallscheid (Mitte) bei der Preisverleihung mit den Betreuern der Arbeit, Prof. Dr.-Ing. Joachim Böcker (Rechts) und Dipl.-Ing. Wilhelm Peters (Links) (Quelle Foto: BMBF)

Nähere Informationen zum DRIVE-E-Programm, zu den Preisträgern sowie Bilder von der Preisverleihung sind unter <http://www.drive-e.org/> zu finden. Im folgenden Fachbeitrag „Entwurf einer Stromregelung mit definiertem dynamischem Verhalten für einen Permanentmagnet-Synchronmotor mit eingebetteten Magneten (IPMSM)“ sind die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst.

Entwurf einer Stromregelung mit definiertem dynamischem Verhalten für einen Permanentmagnet-Synchronmotor mit eingebetteten Magneten (IPMSM)

OLIVER WALLSCHEID, WILHELM PETERS

Der Permanentmagnet-Synchronmotor mit eingebetteten Magneten (IPMSM) zeichnet sich durch eine hohe Leistungs- und Drehmomentdichte aus und wird daher zunehmend als Traktionsantrieb in Hybrid- und Elektrofahrzeugen eingesetzt. Ein wesentlicher Grund für die steigende Beliebtheit des IPMSM sind verbesserte Magnetmaterialien

aus Metallen der Seltenen Erden, mit denen sich sehr hohe Energiedichten realisieren lassen. Um den Motor effektiv als Traktionsantrieb einzusetzen, bedarf es einer Regelung, welche dem Motor ein gefordertes Verhalten aufprägt. Dabei kommt eine feldorientierte Stromregelung zum Einsatz, der weitere Regelkreise wie z.B. eine Schlupfregelung oder eine aktive Schwingungsdämpfung überlagert werden können. Insbesondere aufgrund von Eisen-Sättigungseffekten und Stellgrößenbeschränkungen weist die Stromdynamik, und somit auch die Drehmomentdynamik, ein stark arbeitspunktabhängiges Verhalten auf. Dies erschwert die Auslegung überlagerter Regelungsfunktionen, da für diese das Verhalten der unterlagerten Stromregelung bekannt sein muss. Im Zuge dieser Arbeit wird eine auf dem Internal Model Control (IMC)-Verfahren basierende quasi-kontinuierliche und adaptive Stromregelung entworfen, welche dem betrachteten System ein weitgehend lineares und somit arbeitspunktunabhängiges Verhalten aufprägt. Dieses definierte Verhalten kann dann hinsichtlich überlagerter Regelkreise vorausgesetzt werden. Hierdurch ist ein erleichterter Entwurf und eine bessere Regelgüte für überlagerte Regelkreise zu erwarten. Die Funktionsfähigkeit des Verfahrens wurde mittels Simulation in MATLAB/Simulink und durch Prüfstandsuntersuchungen verifiziert.

Einleitung

In dieser Arbeit wird ein Permanentmagnet-Synchronmotor mit eingebetteten Magneten (IPMSM) betrachtet, dessen Magnete oberflächenfern im Rotor eingebracht sind. Diese Konfiguration hat gegenüber Permanentmagnet-Synchronmotoren mit aufgebrauchten Magneten den Vorteil eines zusätzlichen Reluktanzdrehmoments. IPMSM, die als Traktionsantriebe hinsichtlich einer hohen Drehmoment- und Leistungsdichte entworfen wurden, weisen ausgeprägte Eisen-Sättigungseffekte auf. Die dabei auftretende Kreuzsättigung führt zu einer starken arbeitspunktabhängigen Verkopplung der d - und q -Regelkreise und zu einem stark nichtlinearem dynamischem Verhalten. Im Folgenden soll daher eine adaptive Stromregelung entworfen werden, welche dem System ein weitgehend lineares Verhalten aufprägt. Als gewünschte Dynamik kann

dabei zweckmäßigerweise ein PT1-Verhalten angenommen werden. Prinzipiell sind auch Verzögerungsglieder höherer Ordnung denkbar, um eine kürzere Einregelzeit zu realisieren, was jedoch auf Kosten von einem Überschwingen über den Sollwert erkauft wird. Dieses ist insbesondere bei Arbeitspunkten nahe der Stromgrenze als kritisch zu bewerten, da es dabei zu einer Überstromabschaltung des Antriebssystems kommen kann. Dies gilt es im Straßenverkehr zu vermeiden und es wird daher eine PT1-Stromdynamik angestrebt. Eine vorgelagerte Drehmomentsteuerung wurde ebenfalls realisiert.

Modellierung

Die Spannungsdifferentialgleichung für den IPMSM im orthogonalen und rotorfesten d - q -Koordinatensystem lautet:

$$u_d = R_S i_d + \dot{\psi}_d - \omega_{RS} \psi_q \quad (1a)$$

$$u_q = R_S i_q + \dot{\psi}_q + \omega_{RS} \psi_d \quad (1b)$$

Dabei bezeichnet u die Spannungen, R_S den Statorwiderstand, ψ die verketteten Flüsse, i die Ströme und ω_{RS} die elektrische Drehkreisfrequenz.

Um die auftretenden Eisen-Sättigungseffekte zu modellieren wird ein Ansatz über Kennfelder (LUT - Lookup Tables) gewählt. Diese können per FEM-Simulation oder Vermessung des Motors am Prüfstand gewonnen werden und beschreiben den Zusammenhang zwischen den aktuellen Statorströmen und dem verketteten Fluss im rotorfesten d - q -Koordinatensystem. Dieses kann wie folgt dargestellt werden:

$$\psi_d = f_d(i_d, i_q) \quad \psi_q = f_q(i_d, i_q) \quad (2a)$$

$$i_d = f_d^{-1}(\psi_d, \psi_q) \quad i_q = f_q^{-1}(\psi_d, \psi_q) \quad (2b)$$

Die Kennfelder können während des Betriebs im Speicher der Regelungseinheit hinterlegt werden. Auf Basis der oben beschriebenen Gesamtflussverkettung lassen sich differentielle Induktivitäten bestimmen, die sich aus den partiellen Ableitungen der Flussverkettungen nach den beiden Stromkomponenten in d - und q -Richtung ergeben und in

der differentiellen Induktivitätsmatrix zusammengefasst werden:

$$\underline{L}_{diff} = \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial \Psi_d}{\partial i_d} \right|_{i_d, i_q} & \left. \frac{\partial \Psi_d}{\partial i_q} \right|_{i_d, i_q} \\ \left. \frac{\partial \Psi_q}{\partial i_d} \right|_{i_d, i_q} & \left. \frac{\partial \Psi_q}{\partial i_q} \right|_{i_d, i_q} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Wird die differentielle Induktivitätsmatrix in Gl. (1) eingesetzt, ergibt sich:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = R_S \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \underline{L}_{diff} \begin{bmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_q \end{bmatrix} + \omega_{RS} \underline{J} \begin{bmatrix} \Psi_d(\dot{i}_{dq}) \\ \Psi_q(\dot{i}_{dq}) \end{bmatrix} \quad (4)$$

wobei für die Matrix \underline{J} gilt:

$$\underline{J} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Feldorientierte Stromregelung

Basierend auf Gl. (4) kann das Konzept der feldorientierten Stromregelung von Drehfeldmaschinen angewendet werden. Hierfür wird eine Entkopplung der beiden Regelkreise in d - und q -Richtung vorgenommen, welche als Vorsteuerung am Reglerausgang realisiert wird. Folgende Spannungsterme sind dabei vorzusteuern:

$$u_{vor,d} = -\omega_{RS} \Psi_q(\dot{i}_{dq}) + L_{12,diff}(\dot{i}_{dq}) \dot{i}_q \quad (6a)$$

$$u_{vor,q} = \omega_{RS} \Psi_d(\dot{i}_{dq}) + L_{21,diff}(\dot{i}_{dq}) \dot{i}_d \quad (6b)$$

Unter Annahme einer idealen Entkopplung ergeben sich demnach zwei entkoppelte Eingrößen-Regelstrecken:

$$G_d(s) = \frac{1/R_S}{1 + sT_d} \quad T_d = \frac{L_{11,diff}(\dot{i}_{dq})}{R_S} \quad (7a)$$

$$G_q(s) = \frac{1/R_S}{1 + sT_q} \quad T_q = \frac{L_{22,diff}(\dot{i}_{dq})}{R_S} \quad (7b)$$

Außerdem werden die durch die digitale Realisierung verursachten Totzeiten, welche durch die Messwerterfassung, die Sollwertberechnung sowie die Pulsweitenmodulation entstehen, als summarische Totzeit von eineinhalb Abtastschritten T_A modelliert und als Umrichtertotzeit T_U bezeichnet.

Die Übertragungsfunktion des Umrichters $G_U(s)$ ergibt sich zu:

$$G_U(s) = e^{-1,5T_A s} \quad \text{mit } T_U = 1,5T_A \quad (8)$$

Wird die Umrichtertotzeit der Regelstrecke beaufschlagt, ergeben sich als Gesamtübertragungsfunktionen:

$$G_{d,Ges}(s) = \frac{1}{R_S} \frac{1}{1 + sT_d} e^{-T_U} \quad (9a)$$

$$G_{q,Ges}(s) = \frac{1}{R_S} \frac{1}{1 + sT_q} e^{-T_U} \quad (9b)$$

Abschließend ist die Gesamtstruktur der feldorientierten Regelung mit adaptivem Ansatz durch Nachführung der Statorzeitkonstanten mittels Gl. (3) in Abb. 6 dargestellt. Dabei wird angenommen, dass durch eine überlagerte Arbeitspunktsteuerung geeignete Stromsollwerte sprunghaft auf die Stromregelung gegeben werden. Diese soll dann die Ströme in d - und q -Richtung mit der gewünschten PT1-Dynamik einregeln. Die Arbeitspunktsteuerung wurde unter Einbeziehung des Ankerstell- und Flußschwächbereichs als Teil dieser Arbeit ebenfalls realisiert. Es ist sowohl eine MTPC (Maximum Torque per Current) als auch eine MTPF (Maximum Torque per Flux) Strategie implementiert worden.

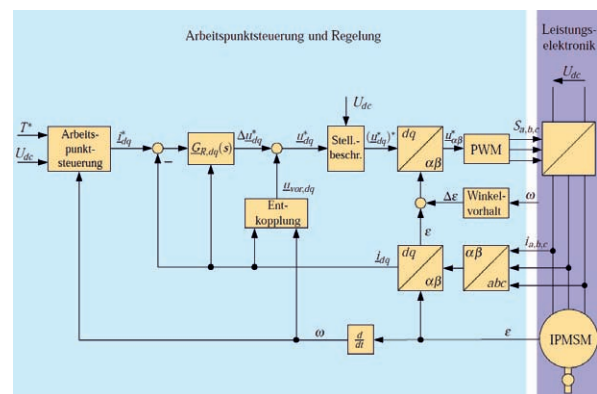


Bild 6: Gesamtstruktur der feldorientierten Regelung mit adaptiven Stromreglern

Internal Model Control

Das Internal Model Control (IMC)-Verfahren ist bereits längerfristig im Bereich der chemischen Prozesstechnik bekannt und wird dort erfolgreich

eingesetzt, um stark nichtlinearen Prozessen ein gewünschtes Verhalten aufzuprägen. Hierfür wird der eigentlichen Regelstrecke ein Modell dieser parallel geschaltet und die Differenz der Ausgangswerte für die klassische einschleifige Regelkreisgegenkopplung benutzt. Dieses ist in Abb. 7 zu sehen. Der grau hinterlegte Block stellt dabei den gesamten Stromregler $G_R(s)$ dar, welche aus einem internen IMC-Regler $G_{R,IMC}(s)$ und dem Modell der Regelstrecke $\hat{G}(s)$ besteht.

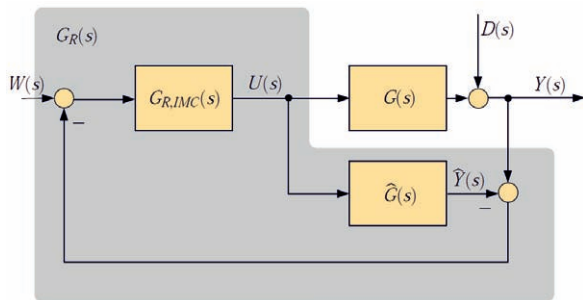


Bild 7: Klassische Struktur eines IMC-Regelkreises

Für den Fall, dass das Regelstreckenmodell $\hat{G}(s)$ von der tatsächlichen Regelstrecke abweicht, kann die Führungsübertragungsfunktion angegeben werden als:

$$G_W(s) = \frac{G(s)G_{R,IMC}(s)}{1 + (G(s) - \hat{G}(s))G_{R,IMC}(s)} \quad (10)$$

Führt man eine H_2 -Optimierung bezüglich der gewünschten PT1-Dynamik und unter der Randbedingung der technischen Realisierbarkeit durch, erhält man als optimale Lösung für die Stromregler:

$$G_{R,d}(s) = R_S \frac{T_d}{T_{f,d}} \left(1 + \frac{1}{sT_d}\right) \quad (11a)$$

$$G_{R,q}(s) = R_S \frac{T_q}{T_{f,q}} \left(1 + \frac{1}{sT_q}\right) \quad (11b)$$

Dabei ist T_f die Zeitkonstante eines PT1-Filters, welches aufgrund der Kausalitätsbedingung benötigt wird. T_f stellt gleichzeitig die gewünschte Zeitkonstante der PT1-Solldynamik dar.

Das IMC-Verfahren hat den Nachteil, dass es nur über eine sehr schlechte Störgrößenunterdrückung verfügt und insbesondere Abweichungen von der Soll- zur Ist-Größe transient nicht ausgeregelt werden können. Dies stellt ein wesentliches Problem für die feldorientierte Regelung dar, da die hierbei

benötigte Entkopplung i.d.R. nicht perfekt ist und Entkopplungsfehler als Störgrößen wirken. Als wesentliche Ursache für eine nicht perfekte Entkopplung kann die durch die Totzeit verursachte Verzögerung zwischen Regelstrecke und Regelung genannt werden, sodass die Entkopplung nur die um einen Abtastschritt verzögerten Stromwerte des Motors erhält. Zusätzlich wirken Parameterunsicherheiten und Messungenauigkeiten als Störgrößen. Untersuchungen am Prüfstand haben gezeigt, dass eine reine IMC-Regelung aufgrund der genannten Störfaktoren nicht in der Lage ist, der Regelstrecke das vorgegebene dynamische Verhalten aufzuprägen.

Um dieses zu kompensieren, kann der Regelkreis aus Abb. 7 umgeformt und um eine Sollwertvorsteuerung ergänzt werden. Dieses ist in Abb. 8 dargestellt. Hierbei wird der Stromregler nach dem IMC-Verfahren um einen sollwertgefilterten Hilfsregler $G_{R,h}(s)$, der nach dem Symmetrischen Optimum (SO) ausgelegt wurde, ergänzt. Die Sollwertfilterung wird dabei als PT1-Glied $G_f(s)$ mit der Zeitkonstante T_f , welche wiederum das gewünschte Sollverhalten ausdrückt, realisiert. Dabei wirkt der zusätzliche Regler hinsichtlich der Störübertragungsfunktion, während dessen Einfluss hinsichtlich der Führungsübertragungsfunktion durch die Sollwertvorsteuerung kompensiert wird. Der Hilfsregler nach dem SO weist eine gute Störunterdrückung auf und kann transient auftretene Abweichungen schnell ausregeln, wodurch der IMC-Regler in der Lage ist die gewünschte Führungsdynamik einzuprägen.

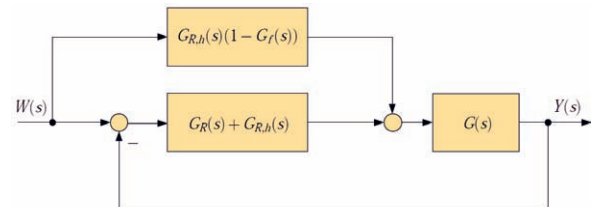


Bild 8: Umgeformter und ergänzter IMC-Regelkreis

Messergebnisse

Das vorgestellte Regelungsverfahren wurde abschließend an einem Prüfstand des Fachgebietes getestet. In Abb. 9 & 10 ist ein entsprechender Messschrieb dargestellt. Hierbei sind die Ist-Strome rot, der stationäre Endsollwert, welcher als

Führungsgröße auf die Regelung gegen wird, blau und der Verlauf der Wunschdynamik grün dargestellt. Der Motor wurde mit Hilfe einer Lastmaschine konstant bei einer Drehzahl von 1000min^{-1} betrieben. Die gewünschte Sollverzögerungszeitkonstante der PT1-Charakteristik beträgt $T_f = 1\text{ms}$.

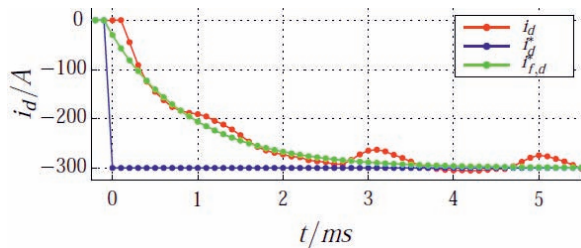


Bild 9: Messschrieb: Sollwertsprung in i_d

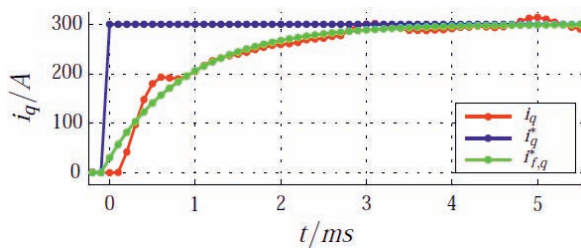


Bild 10: Messschrieb: Sollwertsprung in i_q

Es ist zu erkennen, dass die gewünschte Dynamik aufgeprägt werden konnte. Nur leichte Abweichungen vom Sollverhalten sind festzustellen. Insbesondere ein Überschwingen über den stationären Endwert konnte vermieden werden. Die Ströme i_d und i_q sind nach einer Zeit von $5T_f$ eingeregelt. Ein Teil der Schwankungen um die Solltrajektorie ist durch Messungenauigkeiten zu erklären. Weitere Messungen ergaben u.a., dass mit steigendem T_f die Regelgüte hinsichtlich der Solltrajektorie zunimmt.

Fazit

In dieser Arbeit wurde ein Regelungsansatz entwickelt, mit dem es möglich ist einem hochausgenutzten IPMSM eine definierte lineare Stromdynamik aufzuprägen. Der entwickelte Ansatz besteht aus einem nach dem IMC-Verfahren entworfenen Regler, der um einen Hilfsregler zur Verbesserung der Störunterdrückung ergänzt wurde. Die Eignung der realisierten Regelung für die Praxis wurde durch Messungen am Prüfstand nachgewiesen. Die Stromdynamik ist somit bekannt

und über T_f innerhalb gewisser Grenzen einstellbar. Es ist ersichtlich, dass je nach überlagerter Regelungsfunktion, ein Kompromiss zwischen Einregelzeit und Regelgüte der Stromdynamik hinsichtlich des Sollverhaltens zu finden ist. Die angestrebte PT1-Dynamik kann für die Auslegung überlagerter Regelungsfunktionen angenommen werden. Diese Arbeit bildet somit die Grundlage für die Verbesserung wesentlicher Sicherheits- und Komfortfunktionen in Hybrid- und Elektrofahrzeugen, wie z.B. für eine Schlupfregelung oder eine aktive Schwingungsdämpfung. Für zukünftige Arbeiten auf diesem Gebiet ist eine zeitdiskrete Streckenmodellierung zur Verbesserung der Regelperformance denkbar. Dies kann mit einer Strom- und Flussprädiktion zur Kompensation der Totzeit zwischen Regelstrecke und Regelung kombiniert werden.

State of the Art of Real-Time Hardware-in-the-Loop Simulation Technology for Rail Vehicles

ZHIYU CAO

Introduction

Nowadays modern electrical locomotives are powered by converter-fed AC motors and controlled by digital controllers. Since dynamics of such traction drive systems are determined not only by power components, but also by real-time software, distributed computing and inter-controllers communication, a simulative investigation and an integration test of such systems are order of magnitude more complex than those in previous generations. Based on conventional simulation platforms on non-real-time mode the real-time effects of the control system and the effects of controller hardware cannot be studied. In order to achieve a maximum test depth at a minimized risk and cost, a real-time hardware-in-the-loop (HIL) simulation platform is very considerable. Using it, closed-loop behaviors of the traction drive system can be simulated utilizing the original traction control unit [1] [2]. In this contribution the historical and recent developments of hardware technologies in real-time HIL simulation are reviewed first, and second modeling techniques for electrical traction drive systems are introduced, and at last technical trends are pointed out.

Hardware Technologies

Analog Processor-Based Simulator: The concept of real-time HIL simulation was first used in rail vehicle industry in the early 1960s. The simulator was based on analog technology. A representative of this generation is AD4-simulator from ABB Transportation Systems [2]. The heart of the simulator consisted of analog integrators (Operational Amplifier or ab. op-amps), which had very good frequency response characteristics and were used to fulfill the computationally demands. Together with fast electronic switches and control-logic, the steady-state and transient behaviors of the traction drive system of locomotives were well simulated. However, a major disadvantage of the analog

processor-based simulators was the poor flexibility, reliability and stability with temperature. "Programming" the simulated system was done through hardwiring on a patch panel, which requires the end-user to master both knowledge about traction drives and a great deal of knowledge about the simulator hardware. In order to overcome this drawback, a hybrid solution including digital and analog processors was developed in the mid-1980s. Thanks to the benefits of digital techniques a relatively comfortable and hardware independent programming environment were implemented. However, due to the computational limitation of digital processors in that time, the integrators, which are the most important computational parts, were implemented by analog technique [1].

Digital Processor-Based Simulator: Since the mid-1990s the digital processors provided enough power to simulate rail vehicle traction systems. In comparison with the hybrid solution in 1980s, integrators were implemented digitally. By using modular hardware structure system flexibility and extensionality were achieved. In combination with advanced software technologies, user-friendly model-based graphical programming environments were implemented. Due to these benefits developing and maintenance costs are distinctly reduced.

One of the popular selected HIL simulators is from the German company dSPACE GmbH. These simulators are based on specially designed dedicated processor boards. Communications between processor boards are implemented by using Gigalink modules. Communication between processor boards and input/output (I/O) boards are implemented by peripheral high speed bus (PHS bus) [5]. Based on this simulator an electrical traction drive system of locomotives was simulated with a step-size of 30 μ s in real-time by Adtranz [1].

Another alternative to implement a digital processor-based simulator is using standard personal computers (PC) or PC cluster. In comparison with dedicated real-time simulators, the PC-based solution has great advantage in hardware cost. However, since PC systems are not specially designed for real-time applications, great challenges in I/O accesses, parallel distributed computation and hard real-time computation should be solved. In

order to deal with these challenges, the Canadian company Opal-RT developed a PC-based HIL simulation solution. Based on this solution, the high-speed communications are implemented with shared-memory technique and the low-speed communications are implemented with IEEE 1394 (Fire Wire) technique. Field-Programmable Gate Array (FPGA) based coprocessors are used to process I/O, which enhance the I/O access speed [4]. This simulator was successfully used for simulating diesel-electrical locomotives by General Electric [2]. Based on this solution a very low step-size of 10 μ s was achieved by simulating a single PMSM drive system [4].

The main drawback of digital processor-based simulators is the relative long simulation step size from 10 μ s to some 10 μ s. In simulation of a converter-fed electrical drive system errors will be introduced, if a switching event is located within a simulation step. Actually, because of the fixed step size requirement in real-time simulation, switching events occur almost always within simulation steps. In order to minimize these errors, two approaches are used:

- Utilization of interpolation technique
- Reduction of the simulation step size

The first approach can be implemented on dedicated or PC processor-based simulation systems. However, using this approach the errors can only partly be compensated. In order to achieve more accurate simulation results, the simulation step size should be reduced by using faster computational hardware.

FPGA-Based Simulator: Since the introduction of Field-Programmable Gate Array (FPGA) technology in the mid-1980s, its capacity has roughly doubled every year. According to the current state of the art, FPGA devices containing in excess of 300,000 logic cells are available, which enable to implement a large control or simulation system on a single FPGA chip. In the area of power electronics and electrical drives, FPGA technologies have hitherto been used mainly for implementing control algorithms and PWM gating pattern generations, either as stand-alone processors or as companion processors for DSPs [5].

In the area of real-time HIL simulation, FPGAs are mainly used in interface hardware, e.g. PWM measurement and position sensor simulation, and I/O coprocessor [4]. [5] presents a real-time simulator based on FPGA in combination with a DSP, in which the DSP facilitates the sequential process, while the FPGA boosts the performance of the simulator. With this approach a simulation step size of 2.5 μ s is achieved. In [6] FPGAs were firstly used as stand-alone processors for modeling and real-time simulation of a complete AC drive system including rectifier, DC link, inverter and induction motor (IM). The controller is also implemented on the same FPGA chip. An ultra small simulation step size of 12.5 ns was achieved, which allows a highly detailed and precise simulation of the electrical drive system. However, references of stand-alone FPGA processor implementation of large scale simulation systems are not available, yet.

Modeling and Numerical Computation

Since analog processor-based HIL simulators are no longer the state of the art, only digital modeling and computation technique are discussed in this contribution. Converter-fed electrical drive systems consist of components of continuous nature, e.g. inductors, capacitors, resistors, transformers, motors, etc., and of discontinuous (discrete) switching components (converters). The continuous parts can be described by using state space models, solved by using numerical methods. Numerical integration algorithms are distinguished by explicit and implicit, one-step and multistep methods. A detailed classification will be involved in the full paper. It is noteworthy that because of the incontinuity of converter-fed traction drive systems, multistep methods cannot be used after the switching events. Power converters are mainly modeled by using behavior approach (ideal switch approach, switching function approach or average model approach). Since the switching frequency of rail vehicles are limited to some 100 Hz, ideal switch approach or switching function approach is proper for this application. Thanks to the ultra small simulation step-size of the FPGA-based simulators a linearized detailed approach was used for modeling power converters in [6].

Conclusion, Technical Trends and Outlook

The state of the art and technical trends of HIL simulation technology for rail vehicles are characterized as:

- Digital multiprocessor-based real-time HIL simulation systems utilizing FPGA techniques for I/O processing is the state of the art in rail vehicle application. Because of the step size limitation of some 10 μ s, errors introduced by switching events can only partly be compensated for by using interpolation algorithms.
- FPGA-based real-time simulator presents an ultra small simulation step-size. But no reference shows that it has been utilized for simulating large scale systems like rail vehicles, yet.
- In the coming years a hybrid solution including digital and FPGA processors seems to be a good approach for simulating large scale systems. The high dynamic components, e.g. converter-fed IM, are simulated on FPGA processors and the low dynamic components, e.g. railway grid and mechanical parts, are simulated on digital processors.

Based on the hybrid solution a HIL-simulator for traction drive systems of locomotives is now developed by LEA.

References

- [1] Terwiesch, P.; Keller, T. and Scheiben, E., Rail Vehicle Control System Integration Testing, IEEE Trans. on Control Systems Technology, vol. 7, pp. 352-362, 1999'.
- [2] Dufour, C.; Dumur, G. Paquin, J.N. and Belanger, J., A Multi-Core PC-based Simulator for the Hardware-In-the-Loop Testing of Modern Train and Ship Traction Systems, in Proc. 13th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC 2008), pp. 1498-1503, 2008.
- [3] Wagener, A.; Schulte, T.; Waeltermann, P. and Schuette, H., Hardware-in-the-Loop Test Systems for Electric Motors in Advanced Powertrain Applications, in Proc. SAE World Congress 2007, 2007.
- [4] Abourida, S.; Belanger, J. and Dufour, C., Real-time HIL simulation of a complete PMSM drive at 10 μ s time step, in Proc. Power Electronics and Applications, 2005 European Conference, pp. 719-723, 2005.
- [5] Bahri, I.; Naouar, M.; Monmasson, E.; Slama-Belkhdja, I. and Charaabi, L., Design of an FPGA-Based Real-Time Simulator for Electric System, in Proc. Power Electronics and Motion Control Conference, pp. 1365-1370, 2008.
- [6] Parma, G. and Dinavhi, V., Real-Time Digital Hardware Simulation of Power Electronics and Drives, IEEE Trans. on Industrial Electronics', vol. 22, pp. 1235-1246, 2007.

Aktuelles LEA-Personal

Leitung

Prof. Dr.-Ing. Joachim Böcker
AOR Dr.-Ing. Norbert Fröhleke
AR Dipl.-Ing. Christoph Romaus

Emeritus

Prof. Dr.-Ing. Horst Grotstollen

Sekretariat

Gabriela Rittner

Wissenschaftliche Mitarbeiter

Dipl.-Ing. Oleg Buchholz
Dipl.-Ing. Zhiyu Cao
M.Sc. Krishna Dora V.
Dipl.-Ing. Heiko Figge
Dipl.-Ing. Tobias Grote
M. Sc. Manli Hu
Dipl.-Ing. Tobias Huber
Dipl.-Ing. Michael Leuer
Dipl.-Ing. Michael Lönneker
M.Sc. Milind Paradkar
M.Sc. Klaus Peter
Dipl.-Ing. Alexander Peters
Dipl.-Ing. Wilhelm Peters
Dipl.-Phys. Philipp Rekers
Dipl.-Ing. Christoph Schulte
Dipl.-Ing. Andreas Specht
M.Tech. Jitendra Solanki
Dipl.-Ing. Karl Stephan Stille
M.Sc. Meng Sun

Doktoranden bei LEA

M. Sc. Ayman Ahmed
M. Sc. Hosam Sharabash
M. Sc. Junbing Tao

Technische Mitarbeiter

Dipl.-Ing. Helmut Foth
Hans Josef Glunz
Norbert Sielemann

Information zu LEAiD

Weitere Informationen wie die Satzung unseres Vereins und Aufnahmeanträge sowie ältere LEAiD-Newsletter sind auf unserer Webseite: www.lea-id.de zu finden.

Der Vorstand von LEAiD e.V. ist unter der Emailadresse vorstand@lea-id.de erreichbar.

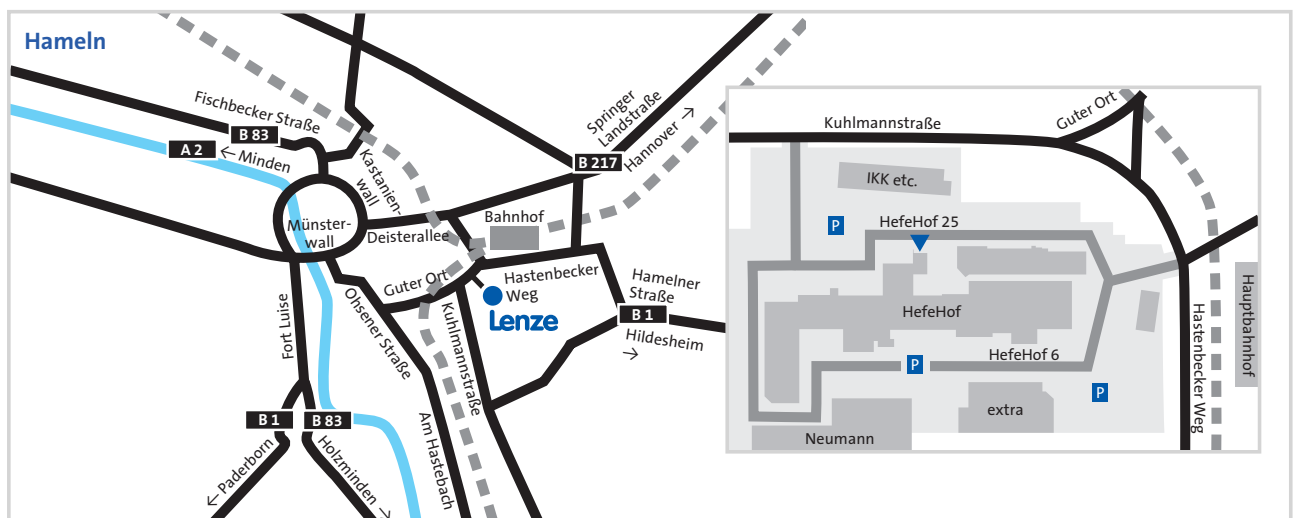
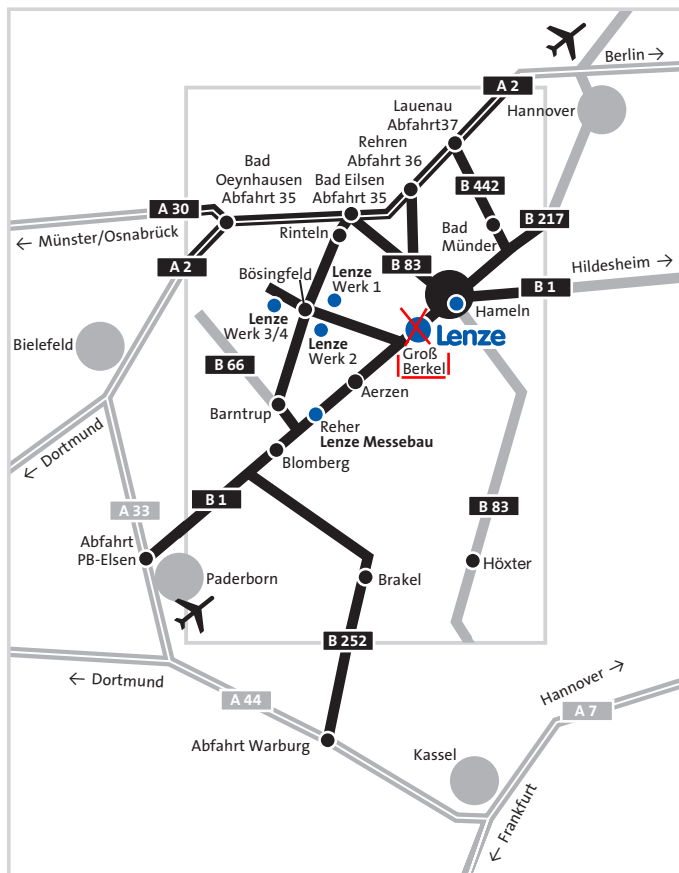
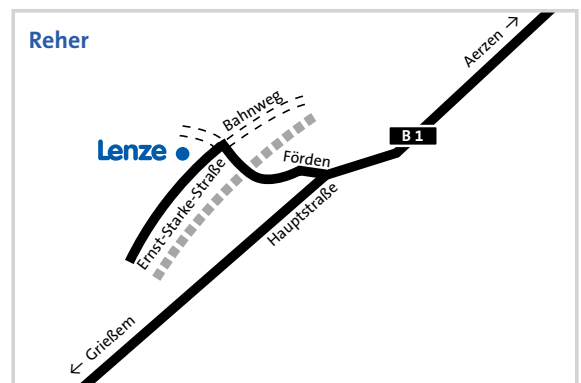
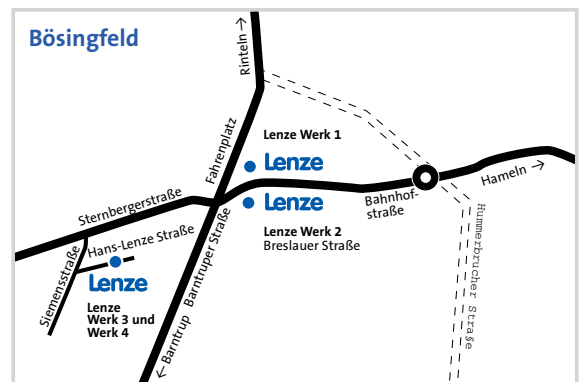
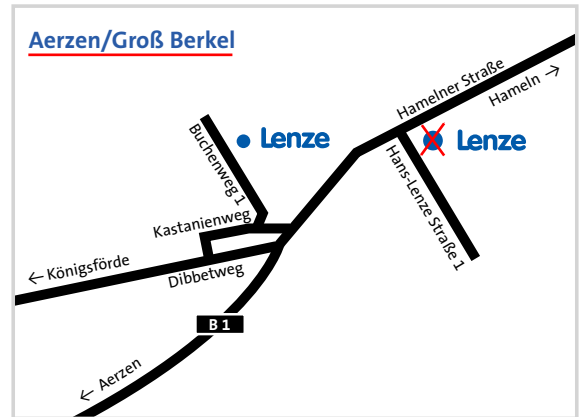
Anreise | so finden Sie uns



Unter folgenden Adressen finden sie uns.

- | | | |
|---|---|--|
| <p>Lenze SE
 Lenze Automation GmbH
 Lenze Operations GmbH
 ▶ 31855 Aerzen/Groß Berkel
 <u>Hans-Lenze-Straße 1</u>
 ▶ 31855 Aerzen/Reher
 Ernst-Stärke-Straße 1
 ▶ 31785 Hameln
 HefeHof 25</p> | <p>Lenze GmbH & Co KG
 Anlagenbau
 31855 Aerzen/Groß Berkel
 Buchenweg 1</p> <p>Lenze GmbH & Co KG
 Kleinantriebe
 32699 Extertal/Bösingfeld
 Werk 4
 Hans-Lenze-Straße 3</p> | <p>bhn
 Dienstleistungs GmbH Co. KG
 31855 Aerzen/Groß Berkel
 Hans-Lenze-Straße 1</p> |
| <p>Lenze Drives GmbH
 Lenze Operations GmbH
 ▶ 32699 Extertal/Bösingfeld
 Werk 1 bis 4
 Breslauer Straße 3
 ▶ 31855 Aerzen/Groß Berkel
 Hans-Lenze-Straße 1</p> | <p>Lenze Service GmbH
 32699 Extertal/Bösingfeld
 Werk 1
 Breslauer Straße 3</p> | |

Telefon +49 (0)51 54/82-0



Lenze
Hans-Lenze-Straße 1
D-31855 Aerzen, Ortsteil Groß Berkel (Direkt an der B1)
Telefon +49 (0)51 54/82-0

Anreise per Bus und Bahn

- ▶ Zielbahnhof Hameln
Fahrplaninformationen unter www.bahn.de
- ▶ Buslinie 30 bis Groß Berkel, Haltepunkt: Freiheit

Fahrplaninformationen unter www.efa.de

Anreise per Auto

Anreise aus dem Ruhrgebiet:

- ▶ Autobahn (A44) bis Autobahnkreuz Wünnenberg Haaren,
- ▶ Autobahn (A33) bis Abfahrt Nr. 26 Paderborn-Elsen,
- ▶ Bundesstraße (B1) ca. 60 km bis Aerzen, Ortsteil Groß Berkel

Anreise aus der Mitte/aus dem Süden Deutschlands:

- ▶ Autobahn (A7) bis zum Kasseler Kreuz,
- ▶ Autobahn (A44) bis Abfahrt Nr. 65 Warburg,
- ▶ Bundesstraße (B252) bis Blomberg,
- ▶ Bundesstraße (B1) ca. 25 km bis Aerzen, Ortsteil Groß Berkel

Anreise aus dem Norden/Osten Deutschlands über Hannover:

- ▶ Autobahn (A7) bis zum Dreieck Hannover-Nord,
- ▶ Autobahn (A352) bis zum Dreieck Hannover West,
- ▶ Autobahn (A2) bis Abfahrt Nr. 37 Lauenau,
- ▶ Bundesstraßen (B442) und (B217) bis Hameln,
- ▶ Bundesstraße (B1) ca. 5 km bis Aerzen, Ortsteil Groß Berkel

Anreise aus dem Nordwesten Deutschlands über Münster:

- ▶ Autobahn (A1) bis Abfahrt Nr. 72, Kreuz Lotte/Osnabrück,
- ▶ Autobahn (A30) bis Abfahrt Nr. 35 Bad Oeynhausen,
- ▶ Autobahn (A2) bis Abfahrt Nr. 35 Bad Eilsen,
- ▶ Bundesstraße (B83) bis Hameln,
- ▶ Bundesstraße (B1) ca. 5 km bis Aerzen, Ortsteil Groß Berkel

Anreise aus dem Nordwesten Deutschlands über Osnabrück:

- ▶ Autobahn (A30) bis Abfahrt Nr. 35 Bad Oeynhausen,
- ▶ Autobahn (A2) bis Abfahrt Nr. 35 Bad Eilsen,
- ▶ Bundesstraße (B83) bis Hameln,
- ▶ Bundesstraße (B1) ca. 5 km bis Aerzen, Ortsteil Groß Berkel