

# Jahresbericht 2017

der Lehrstühle für

- Elektrische Antriebssysteme
- Elektrische Netze und Erneuerbare Energie
- Elektromagnetische Verträglichkeit
- Leistungselektronik



FAKULTÄT FÜR  
ELEKTROTECHNIK UND  
INFORMATIONSTECHNIK



## Vorwort

Sehr geehrte Leserinnen und Leser,

das Jahr 2017 neigt sich dem Ende zu, und so möchten wir Sie mit diesem Jahresbericht wieder über die neuesten Entwicklungen, Lehrveranstaltungen und Forschungsaktivitäten an den Lehrstühlen für „Elektrische Antriebssysteme“, „Elektrische Netze und Erneuerbare Energie“, „Leistungselektronik“ und „Elektromagnetische Verträglichkeit“ informieren.

Besonders erfreulich ist, dass es gelungen ist, Frau Dr.-Ing. Hauer im März zur Juniorprofessorin für Elektrische Energiespeichersysteme zu berufen. Sie bereichert seitdem das Forschungsportfolio des Instituts tatkräftig um dieses zukunftssträngige Thema. Ich wünsche ihr für ihre Aufgaben alles Gute und viel Erfolg.

Ein weiterer Höhepunkt ist die Auszeichnung von Herrn Prof. Lindemann mit der „Medal of Merit“ der Elektrotechnischen Fakultät der Technischen Universität Breslau, mit der die OvGU eng kooperiert. Herr Prof. Lindemann hat sich im Rahmen des gemeinsamen Doppeldiplomstudiengangs seit mehr als 15 Jahren verdient gemacht und diesen aktiv mitgestaltet. Ich möchte ihm für diese Ehrung ganz herzlich gratulieren.

Auch in diesem Jahr haben wir in zahlreichen Forschungsprojekten Antworten auf die vielfältigen, drängenden Fragen der Energietechnik finden können. Neben den bereits laufenden großen Forschungsprojekten wie z. B. GENIAL oder DGCC konnten weitere wichtige Projekte gewonnen werden. Besonders hervorzuheben sind hierbei das vom Land Sachsen-Anhalt geförderte Projekt „SmartMES – Intelligentes Multienergiesystem“, welches sich mit Fragestellungen zur Sektorenkopplung befasst, sowie das vom BMWi geförderte Projekte STARTGrid, das die Ausgestaltung des Energieinformationsnetzes wissenschaftlich begleitet.

In der Lehre bieten wir fakultätsübergreifend über 40 Lehrveranstaltungen an. Besonders erfreulich ist hierbei, dass sich die neu geschaffenen Vorlesungen „Elektrische Energiespeichersysteme“, „Operative Systemführung“ und „Methoden der Optimierung elektrischer Netze“ bei den Studenten großer Beliebtheit erfreuen. Die im Jahr 2017 betreuten 47 studentischen Forschungsprojekte, 7 Bachelorarbeiten und 60 Masterarbeiten zeigen, dass die Energieforschung ein spannendes und nachgefragtes Themenfeld bietet.

Daneben konnte insbesondere die Kooperation mit der TU Ilmenau weiter vertieft werden. Hierzu war das Fachgebiet Elektrische Energieversorgung von Herrn Prof. Westermann zu einem zweitägigen wissenschaftlichen Gedankenaustausch zu Gast in Magdeburg. Auch die langjährige, enge Kooperation mit den Universitäten in Hannover, Dresden und Duisburg-Essen im Rahmen des Dresdener Kreises wurde fortgeführt.

Auch in diesem Jahr haben wir unsere wissenschaftlichen Erkenntnisse auf zahlreichen Konferenzen einem breiten, internationalen Fachpublikum vorgestellt. Besonders hervorzuheben sind hierbei das IEEE General Meeting in Chicago, die IEEE PowerTech in Manchester, die IEEE ISGT in Turin, die European Conference on Power Electronics and Applications in Warschau und die PCIM Europe in Berlin sowie die Übernahme der Tagungsleitung beim 7th ECPE SiC & GaN User Forum und der 7. ETG-Fachtagung „Bauelemente der Leistungselektronik“.

Ich möchte mich an dieser Stelle auch im Namen meiner Kollegen recht herzlich bei allen Freunden, Förderern und Kooperationspartnern für die Unterstützung und Zusammenarbeit bedanken. Unser Dank gilt auch dem BMWi, dem BMBF, dem Land Sachsen-Anhalt, der DFG und allen Firmen, die uns durch ihre Aufträge und ihre Spenden unterstützt haben. Wir freuen uns darauf, diese erfolgreiche Zusammenarbeit im kommenden Jahr fortzuführen.

Im Namen aller Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter wünsche ich Ihnen eine besinnliche Weihnachtszeit sowie ein gesundes und erfolgreiches Jahr 2018.

Magdeburg, im Dezember 2017

Prof. Dr.-Ing. habil. Martin Wolter  
Geschäftsführender Leiter des Instituts für elektrische Energiesysteme (IESY)

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Personalia</b>	<b>1</b>
1.1	Lehrstuhl für Elektrische Antriebssysteme . . . . .	1
1.1.1	Hochschullehrer . . . . .	1
1.1.2	Wissenschaftliche Mitarbeiter/Stipendiaten . . . . .	1
1.1.3	Gastwissenschaftler . . . . .	1
1.1.4	Externe Promovenden . . . . .	1
1.1.5	Mitarbeiter in Technik und Verwaltung . . . . .	2
1.2	Lehrstuhl Elektrische Netze und Erneuerbare Energie . . . . .	2
1.2.1	Hochschullehrer . . . . .	2
1.2.2	Lehrbeauftragte . . . . .	2
1.2.3	Wissenschaftliche Mitarbeiter . . . . .	2
1.2.4	Externe Promovenden . . . . .	3
1.2.5	Mitarbeiter in Technik und Verwaltung . . . . .	3
1.3	Lehrstuhl für Elektromagnetische Verträglichkeit . . . . .	3
1.3.1	Hochschullehrer . . . . .	3
1.3.2	Wissenschaftliche Mitarbeiter . . . . .	3
1.3.3	Externe Promovenden . . . . .	3
1.3.4	Mitarbeiter in Technik und Verwaltung . . . . .	4
1.4	Lehrstuhl für Leistungselektronik . . . . .	4
1.4.1	Hochschullehrer . . . . .	4
1.4.2	Wissenschaftliche Mitarbeiter . . . . .	4
1.4.3	Mitarbeiter in Technik und Verwaltung . . . . .	4
1.5	Institutsebene . . . . .	4
1.5.1	Technik . . . . .	4
1.5.2	Verwaltung . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Studium und Lehre</b>	<b>5</b>
2.1	Lehrstuhl für Elektrische Antriebssysteme . . . . .	5
2.1.1	Vorlesungen, Übungen und Praktika . . . . .	5
2.1.2	Abgeschlossene Forschungsprojekte . . . . .	10
2.1.3	Abgeschlossene Bachelor- und Studienarbeiten . . . . .	11
2.1.4	Abgeschlossene Master- und Diplomarbeiten . . . . .	11
2.2	Lehrstuhl Elektrische Netze und Erneuerbare Energie . . . . .	12
2.2.1	Vorlesungen, Übungen und Praktika . . . . .	12
2.2.2	Abgeschlossene Forschungsprojekte . . . . .	18
2.2.3	Abgeschlossene Bachelor- und Studienarbeiten . . . . .	20
2.2.4	Abgeschlossene Master- und Diplomarbeiten . . . . .	20
2.2.5	Praktikantenbetreuung . . . . .	22
2.3	Lehrstuhl für Elektromagnetische Verträglichkeit . . . . .	23
2.3.1	Vorlesungen, Übungen und Praktika . . . . .	23
2.3.2	Abgeschlossene Forschungsprojekte . . . . .	30
2.3.3	Abgeschlossene Bachelor- und Studienarbeiten . . . . .	30
2.3.4	Abgeschlossene Master- und Diplomarbeiten . . . . .	30
2.4	Lehrstuhl für Leistungselektronik . . . . .	32
2.4.1	Lehrveranstaltungen für Bachelor-Studiengänge . . . . .	32

2.4.2	Lehrveranstaltungen für Master-Studiengänge . . . . .	34
2.4.3	Abgeschlossene Projekte . . . . .	37
2.4.4	Abgeschlossene Masterarbeiten . . . . .	37
2.5	Institutsebene . . . . .	39
2.5.1	IEEE Student Branch Magdeburg . . . . .	39
2.5.2	Kooperationen . . . . .	43
2.5.3	Exkursionen . . . . .	45
2.5.4	Studienwerbung . . . . .	47
2.5.5	Preise . . . . .	55
<b>3</b>	<b>Forschung</b>	<b>59</b>
3.1	Lehrstuhl für Elektrische Antriebssysteme . . . . .	59
3.1.1	Forschungsprofil . . . . .	59
3.1.2	Forschungsprojekte . . . . .	61
3.1.3	Veröffentlichungen . . . . .	67
3.2	Lehrstuhl Elektrische Netze und Erneuerbare Energie . . . . .	68
3.2.1	Forschungsprofil . . . . .	68
3.2.2	Forschungsprojekte . . . . .	68
3.2.3	Promotionen . . . . .	78
3.2.4	Veröffentlichungen . . . . .	78
3.3	Lehrstuhl für Elektromagnetische Verträglichkeit . . . . .	81
3.3.1	Forschungsprofil . . . . .	81
3.3.2	Forschungsprojekte . . . . .	82
3.3.3	Promotionen . . . . .	91
3.3.4	Veröffentlichungen . . . . .	92
3.4	Lehrstuhl für Leistungselektronik . . . . .	94
3.4.1	Forschungsprofil . . . . .	94
3.4.2	Forschungsprojekte . . . . .	94
3.4.3	Promotionen . . . . .	102
3.4.4	Veröffentlichungen . . . . .	102
3.4.5	Veranstaltungen . . . . .	103
3.5	Institutsebene . . . . .	106
3.5.1	Kooperationen . . . . .	106
3.5.2	Technische Gremien und Verbände . . . . .	106
3.5.3	Kolloquien . . . . .	107

# 1 Personalia

## 1.1 Lehrstuhl für Elektrische Antriebssysteme

### 1.1.1 Hochschullehrer

- Prof. Dr.-Ing. Roberto Leidhold  
(Lehrstuhlleiter)

### 1.1.2 Wissenschaftliche Mitarbeiter/Stipendiaten

- M. Sc. Shokoofeh Abbaszadeh
- Dipl.-Ing. Andreas Bannack
- M. Sc. Sebastian Benecke (ab 01.01.2017)
- Dipl.-Ing. Niklas Förster
- Dipl.-Ing. Andreas Gerlach
- M. Sc. Sebastian Hieke
- M. Sc. Benjamin Horn
- Dr.-Ing. Thomas Schallschmidt
- Dipl.-Ing. Mario Stamann
- M. Sc. Oleksandr Tyshakin
- M. Sc. Zhao Zhao (ab 01.09.2017)

### 1.1.3 Gastwissenschaftler

- Milkias Berhanu Tuka, Adama Science and Technology University, Äthiopien
- Zenachew Muluneh Hailemariam, Adama Science and Technology University, Äthiopien
- Prof. Dr. Pablo de la Barrera, Universidad Nacional de Rio Cuarto, Argentinien
- Prof. Dr. Guillermo Catuogno, National University of San Luis, Argentinien
- Prof. Dr. Guillermo Rubén Bossio, Universidad Nacional de Rio Cuarto, Argentinien
- Marcial Otero, Universidad Nacional de Rio Cuarto, Argentinien

### 1.1.4 Externe Promovenden

- Serhii Dymko, National Technical University of Ukraine „Kyiv Polytechnic Institute“
- Henning S. Vogt, Volkswagen AG, Konzernforschung
- Aleksej Kieselev, TH Mittelhessen, Friedberg
- Johannes M. Schäfer, Volkswagen AG, Konzernforschung

### **1.1.5 Mitarbeiter in Technik und Verwaltung**

- Andrea Wohner (Sekretärin)

## **1.2 Lehrstuhl Elektrische Netze und Erneuerbare Energie**

### **1.2.1 Hochschullehrer**

- Prof. Dr.-Ing. habil. Martin Wolter  
(Lehrstuhlleiter)
- Prof. Dr.-Ing. Rainer Krebs – Siemens AG, Erlangen  
(Honorarprofessor: Fachgebiet Netzschutz und Leittechnik)
- Prof. Dr.-Ing. Antje Orths – Energinet.dk, Dänemark  
(Honorarprofessorin: Fachgebiet Windenergie)

### **1.2.2 Lehrbeauftragte**

- Dr.-Ing. Przemyslaw Komarnicki, Fraunhofer Gesellschaft, IFF Magdeburg
- Dr.-Ing. Pio Lombardi, Fraunhofer Gesellschaft, IFF Magdeburg
- Dr.-Ing. André Naumann, Fraunhofer Gesellschaft, IFF Magdeburg

### **1.2.3 Wissenschaftliche Mitarbeiter**

- M. Sc. Stephan Balischewski
- M. Sc. Iryna Chychykina
- M. Sc. Jonte Dancker (seit 01.11.2017)
- M. Sc. Nicola Gast (seit 01.03.2017)
- M. Sc. Marc Gebhardt
- M. Sc. Mahmood Gholizadeh
- M. Sc. Eric Glende
- Jun.-Prof. Ines Hauer
- M. Sc. Sebastian Helm (seit 01.11.2017)
- Dr.-Ing. Maik Heuer
- M. Sc. Mykola Ivanchykov (seit 01.11.2017)
- M. Sc. Christian Klabunde
- M. Sc. Philipp Kühne
- M. Sc. André Richter
- Dr.-Ing. Marc Richter (bis 28.02.2017)
- M. Sc. Christian Rinne
- M. Sc. Przemyslaw Trojan
- M. Sc. Tamara Schröter (seit 01.06.2017)
- Dipl.-Ing. Michael Wenske
- M. Sc. Tahaguas Woldu (seit 01.05.2017)

- M. Sc. Yonggang Zhang (seit 01.01.2017)
- M. Sc. Christian Ziegler (seit 01.11.2017)

#### 1.2.4 Externe Promovenden

- M. Eng. Maik Plenz, Brandenburgische Technische Universität Cottbus - Senftenberg
- M. Eng. Karsten Schatz, HanseWerk AG, Quickborn
- Dipl.-Ing. Mike Weber, 50Hertz Transmission GmbH, Berlin
- M. Sc. Anna Shchetkina, Netze Magdeburg GmbH
- M. Sc. Jenny Gronau, 50Hertz Transmission GmbH, Berlin
- M. Sc. Liang Tao, Siemens AG, Erlangen

#### 1.2.5 Mitarbeiter in Technik und Verwaltung

- Melanie Baumgarten (Sekretärin)

### 1.3 Lehrstuhl für Elektromagnetische Verträglichkeit

#### 1.3.1 Hochschullehrer

- Prof. Dr.-Ing. Ralf Vick  
(Lehrstuhlleiter am Institut für Medizintechnik, Dekan der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik)

#### 1.3.2 Wissenschaftliche Mitarbeiter

- Dr. rer. nat. Sergey Tkachenko
- Dr.-Ing. Moawia Al-Hamid
- Dr.-Ing. Mathias Magdowski
- Dipl.-Phys. Jörg Petzold
- M. Sc. Anke Fröbel
- M. Sc. Johanna Kasper
- M. Sc. Xiaowei Wang (bis 31.03.2017)
- M. Sc. Matthias Hirte
- M. Sc. Enrico Pannicke
- M. Sc. Moustafa Raya
- M. Sc. Benjamin Hoepfner
- M. Sc. Felix Middelstädt

#### 1.3.3 Externe Promovenden

- M. Sc. Benjamin Willmann, Volkswagen AG, Wolfsburg
- M. Sc. Farzin Godarzi, Solibra System Montage GmbH, Koblenz

### **1.3.4 Mitarbeiter in Technik und Verwaltung**

- Janet Morscheck (Sekretärin)

## **1.4 Lehrstuhl für Leistungselektronik**

### **1.4.1 Hochschullehrer**

- Prof. Dr.-Ing. Andreas Lindemann  
(Lehrstuhlleiter)

### **1.4.2 Wissenschaftliche Mitarbeiter**

- Dr.-Ing. Reinhard Döbbelin  
(Mitglied des Vorstandes des Instituts für elektrische Energiesysteme)
- Dr.-Ing. Wolfgang Fischer
- M. Sc. Carsten Kempiak
- Dr.-Ing. Xudan Liu (bis 31.10.2017)
- M. Sc. Lars Middelstädt
- Dipl.-Ing. Bastian Strauß

### **1.4.3 Mitarbeiter in Technik und Verwaltung**

- Melanie Baumgarten (Sekretärin)

## **1.5 Institutsebene**

### **1.5.1 Technik**

- Dipl.-Ing. Uwe Göranson (Leiterplattenlabor und Rechnernetz)
- Dipl.-Ing. Katharina Mecke (Werkstofflabor und Videotechnik)
- Jens-Uwe Schulz (Meister, Werkstatt)
- Lothar Griep (Werkstatt)
- Helge Müller (Werkstatt)
- Paula-Lilith Fötsch (Auszubildende Werkstatt, seit 01.08.2017)
- Hannes Albrecht (Auszubildender Werkstatt, seit 01.08.2017)

### **1.5.2 Verwaltung**

- Martina Krieger (Ökonomie, Buchhaltung am Institut für elektrische Energiesysteme)
- Katja Grohe-Gottschling und vertretungsweise Sabine Lutz (Ökonomie, Buchhaltung am Institut für Medizintechnik)

## 2 Studium und Lehre

Abkürzungen:

SS	Sommersemester
WS	Wintersemester
V	Vorlesung
Ü	Übung
P	Praktikum
S	Seminar
SWS	Semesterwochenstunden

### 2.1 Lehrstuhl für Elektrische Antriebssysteme

#### 2.1.1 Vorlesungen, Übungen und Praktika

##### Allgemeine Elektrotechnik 2

— Electrical engineering and electronics —

SS	V 2 SWS:	Prof. Dr.-Ing. Roberto Leidhold
	P 1 SWS:	Dipl.-Ing. Andreas Bannack
	P 1 SWS:	Dr.-Ing. Peter Milde
	P 1 SWS:	Dipl.-Ing. Niklas Förster
	P 1 SWS:	Dipl.-Ing. Detlef Baumecker
	P 1 SWS:	MSc Marc Richter
	Ü 1 SWS:	Dr.-Ing. Reinhard Döbbelin
	Ü 1 SWS:	Dr.-Ing. Thomas Schallschmidt

Die Lehrveranstaltung wendet sich an Studenten nichtelektrotechnischer Studienrichtungen und vermittelt anwendungsbezogenes Grundwissen. Die Studierenden sollen in die Lage versetzt werden, die grundlegende Wirkungsweise und das Verhalten von elektrischen Maschinen und elektronischen Schaltungen nachzuvollziehen. Die wichtigsten Einsatzmöglichkeiten der Elektrotechnik sollen erkannt werden. Einfache Berechnungen und elementare Versuche im Labor werden durchgeführt.

- Elektrische Maschinen
- Analog- und Digitalschaltungen
- Grundlagen der Elektronik
- Leistungselektronik
- Messung elektrischer Größen
- Schutzmaßnahmen in elektrischen Anlagen

— Allgemeine Elektrotechnik 1 vgl. auch Abschnitt 2.4.1 —

## Elektrische Antriebssysteme

— Electrical drive systems —

WS	V 2 SWS:	Prof. Dr.-Ing. Roberto Leidhold
	Ü 1 SWS:	Dr.-Ing. Thomas Schallschmidt
	P 1 SWS:	Dr.-Ing. Thomas Schallschmidt Dipl.-Ing. Mario Stamann
SS	P 1 SWS:	Dr.-Ing. Thomas Schallschmidt Dipl.-Ing. Andreas Bannack

Die Studierenden werden durch das Modul in die Lage versetzt, die Einsatzmöglichkeiten der elektrischen Maschinen zu bewerten und elektrische Antriebssysteme grundlegend zu berechnen. Nach Abschluss des Moduls können die Studierenden, die stationären und dynamischen Modelle der einzelnen Bestandteile eines Antriebssystems, sowie dessen Wechselwirkung nachvollziehen. Sie sind befähigt, elektrische Maschinen und einfache Antriebssysteme im Labor zu prüfen.

- Aufgaben, Funktionsgruppen und Struktur der elektrischen Antriebssysteme
- Stationäres und dynamisches Verhalten der Arbeitsmaschinen
- Modell der Gleichstrommaschine
- Drehmomentregelung
- Raumzeigerdarstellung zur Analyse von Drehfeldmaschinen
- Modell der permanentenerregten Synchronmaschine
- Vereinfachtes Modell der Asynchronmaschine
- Thermische Vorgänge
- Wirkungsgrad des Antriebssystems

## Geregelte elektrische Antriebe

— Controlled electrical drives —

SS	V 2 SWS:	Dr.-Ing. Thomas Schallschmidt
	Ü 1 SWS:	Dipl.-Ing. Mario Stamann
	P 1 SWS:	Dr.-Ing. Thomas Schallschmidt Dipl.-Ing. Mario Stamann

Die Studierenden verfügen am Ende des Moduls über Kenntnisse zur Regelung von elektrischen Antrieben. Sie lernen geeignete Methoden für die Optimierung des Führungs- und Störverhaltens im Zeit- und Frequenzbereich kennen und anzuwenden. Neben kontinuierlichen Systemen, werden auch die speziellen Eigenschaften abgetasteter Systeme behandelt und die Möglichkeiten diskontinuierlicher, rechnergestützter Antriebsregelungen aufgezeigt. In themenbezogenen Praktika und Übungen werden die vermittelten Methoden vertieft, eigenständig implementiert und nach technischen Gesichtspunkten beurteilt.

- Einführung geregelte elektrische Antriebe
- Dynamische Eigenschaften von elektrischen Antrieben
- Reglerentwurfverfahren für kontinuierliche und abgetastete (digital) Antriebssysteme
- Sollwertvorsteuerung und optimale Trajektorienplanung
- Störgrößenbeobachter

## Regelung von Drehstrommaschinen, früher Elektrische Antriebe II

— Control of AC Machines —

SS V 2 SWS: Prof. Dr.-Ing. Roberto Leidhold  
Dr.-Ing. Thomas Schallschmidt  
Ü 1 SWS: Dipl.-Ing. Mario Stamann

Die Studierenden werden durch das Modul in die Lage versetzt, die Modelle der einzelnen Drehstrommaschinen und die damit verbundene Raumzeigerdarstellung nachzuvollziehen. Sie sind befähigt die Methoden zur Regelung von Drehstrommaschinen anzuwenden und die entsprechenden Regelkreise auszulegen. Sie können Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Maschinentypen und Regelungsmethoden je nach Anwendung bewerten.

- Optimierung von Regelkreisen
- Wechselrichter als Stellglied
- Raumzeigerdarstellung
- Modell der permanenterregten Synchronmaschine
- Feldorientierte Regelung der permanenterregten Synchronmaschine
- Modell der Asynchronmaschine
- Feldorientierte Regelung der Asynchronmaschine
- Direct Torque Control (DTC)
- Doppelt-gespeiste Asynchronmaschine als Generator
- Fremderregte Synchronmaschine als Generator

## Elektrische Fahrtriebe

— Electric traction drives —

WS V 2 SWS: Prof. Dr.-Ing. Roberto Leidhold  
Ü 1 SWS: Prof. Dipl.-Ing. Mario Stamann

- Aufgaben und Struktur von Antriebssystemen
- Kenngrößen von Bewegungsvorgängen und Lasten - insbesondere elektrischer Fahrtriebe
- Mechanik des Antriebssystems, typische Widerstandsmomenten-Kennlinien von Lasten - insbesondere elektrischer Fahrtriebe
- das mechanische Übertragungssystem
- stationäres und dynamisches Verhalten von ausgewählten elektrischen Maschinen, ihre Drehzahl-Drehmomenten-Kennlinien, sowie Verfahren und Funktionsgruppen für die Drehzahlstellung
- Schaltungsanordnungen und Steuerverfahren für den Anlauf, die Bremsung und die Drehzahlstellung von Drehstromantrieben
- Strukturen geregelter elektrischer Antriebe

## Modellierung und Simulation elektrischer Antriebe, Seminar

— Modelling and simulation of electrical drives —

WS V 3 SWS: Prof. Dr.-Ing. Roberto Leidhold  
Dipl.-Ing. Niklas Förster

Die Studierenden werden befähigt, komplexe elektromechanische Systeme zweckmäßig zu modellieren. Sie erwerben Kenntnisse zur Nutzung geeigneter Simulationssoftware (MATLAB, Comsol) und zur Interpretation von Simulationsergebnissen. Anhand von Modellen und unter Verwendung von Simulationen lernen die Teilnehmer elektromechanische Systeme zu analysieren, auszulegen und zu optimieren sowie Regelungen zu entwerfen.

- Simulationssoftware
- Modellbildung von elektrischen Maschinen, mechanischen Systemen, leistungselektronischen Stellgliedern, Sensoren und Regler in Betrachtung der Komplexität und Qualität
- Modellreduktion
- Schnittstellen zwischen mechanischen, elektrischen, magnetischen und thermischen Systemen
- Einheitlicher Ansatz zur Modellierung von elektromechanischen Systemen
- Modellierung komplexer elektromechanischer Systeme
- Regelungstechnische Modelle
- Validierung der Modelle, Planung der Simulationsversuche und Auswertung der Ergebnisse
- Simulationsbasierte Auslegung elektromechanischer Systeme

## Speicherprogrammierbare Antriebssteuerungen

— Programmable-logic controlled drives —

SS V 2 SWS: Dipl.-Ing. Andreas Bannack  
Ü 1 SWS: Dipl.-Ing. Andreas Bannack  
P 1 SWS: Dipl.-Ing. Andreas Bannack

- Aufgaben und Einsatzgebiete von Speicherprogrammierbaren Antriebssteuerungen
- Steuerschaltung für Asynchronmaschinen (zum Anlassen, Bremsen, Reversieren und zur Drehzahlsteuerung)
- binäre Steuerungstechnik (Realisierungsarten, Automatenstrukturen, dynamisches Verhalten und Optimierung binärer Steuerungen, Vollständigkeit und Widerspruchsfreiheit)
- SPS-Anlagen für Antriebssteuerungen (Darstellung, Beschreibungsarten, Fachsprachen, Programmierung, Testung und Inbetriebnahme)
- binäre Maschinen- und Anlagensteuerungen
- Programmierübungen an SPS-gesteuerten Antriebsanlagen
- speicherprogrammierbare Antriebsregelungen (Realisierungsarten, Programmstrukturen, digitale Messwerterfassung von Strom, Spannung, Drehzahl und Lage, Beschreibungsarten und Programmieroberflächen, Parametrierung von Umrichteranlagen, praktische Übungen an einer Antriebsautomatisierungsanlage)

## Elektrische Maschinen

— Electrical machines —

SS V 2 SWS: Prof. Dr.-Ing. Roberto Leidhold  
Ü 1 SWS: Dipl.-Ing. Niklas Förster  
Dr.-Ing. Thomas Schallschmidt  
Dipl.-Ing. Mario Stamann

Studierende sollen in die Lage versetzt werden, die Wirkungsweise der relevanten elektrischen Maschinen nachzuvollziehen. Sie können Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Maschinentypen und Aufbauvarianten bewerten. Sie sind befähigt die Modelle der Maschinen in stationären Zustand, zur Analyse des Betriebsverhaltens und Berechnung grundlegenden Einsatzfällen, anzuwenden. Sie können einschlägige Maßnahmen zur Wirkungsgradverbesserung der elektrischen Maschinen ergreifen.

- Magnetkreise
- Gleichstrommaschine
- Transformator
- Drehfeld
- Asynchronmaschine
- Synchronmaschine
- Wirkungsgrad
- Auswahl elektrischer Maschinen

## Unkonventionelle elektrische Maschinen

— Unconventional Electrical Machines —

WS V 2 SWS: Prof. Dr.-Ing. Roberto Leidhold  
Ü 1 SWS: Dr.-Ing. Thomas Schallschmidt

Die Lehrveranstaltung vermittelt erweiterte Kenntnisse zu den elektrischen Maschinen und Aktoren, die in den Grundvorlesungen nicht angesprochen werden. Die Studenten können somit die Wirkungsweise, das dynamischen Verhalten und die Regelung der behandelten Maschinen nachvollziehen. Sie werden befähigt, die Integration der Maschinen in mechanischen Systemen zu analysieren und zu projektieren.

- Elektromechanische Energiewandlung
- Elektrische Maschinen mit begrenzter Bewegung
- Reluktanzmaschinen
- Schrittmotoren
- Elektronisch kommutierte Gleichstrommaschine
- Linearmotoren
- Piezoaktoren

## Generatorsysteme zur regenerativen Energieerzeugung

— Generator Systems for Renewable Energy —

SS V 2 SWS: Prof. Dr.-Ing. Roberto Leidhold  
Ü 1 SWS: Dr.-Ing. Thomas Schallschmidt

Dieses Modul soll die Studierenden in die Lage versetzen, die Randbedingungen der regenerativen Energieerzeugung und die Einsatzmöglichkeiten der unterschiedlichen elektrischen Maschinen nachzuvollziehen. Die Studierenden sind befähigt die elektrische Maschinen zu dimensionieren und die grundlegende Regelungsmethoden zur Optimierung der Energiegewinnung auszulegen (Maximum-Power-Point-Tracking).

- Ziele der Regelung in Generatorsystemen
- Elektrische Maschinen im Generatorbetrieb
- Leistungselektronische Systeme für Generatoren
- Generatorsysteme mit konstanter Drehzahl
- Drehzahlvariable Generatorsysteme
- Optimierung der Energiegewinnung durch Regelung
- Generatorsysteme für alternierenden Energiequellen (z. B. Wellenkraftwerke)
- Lineargenerator
- Glättung der Ausgangsleistung (z. B. Schwungradspeicher, Ultracaps)

## Analyse und Berechnung elektromechanischer Strukturen Teilmodul II, Seminar

— Analysis and calculation electromechanical structures —

WS S 3 SWS: Prof. Dr.-Ing. Roberto Leidhold  
Dr.-Ing. Niklas Förster

- Modellbildung von elektrischen Maschinen, mechanischen Systemen, leistungselektronischen Stellgliedern, Sensoren und Regler in Betrachtung der Komplexität und Qualität
- Simulationssoftware
- Modellreduktion
- Einheitlicher Ansatz zur Modellierung von elektromechanischen Systemen
- Schnittstellen zwischen mechanischen, elektrischen, magnetischen und thermischen Systemen
- Regelungstechnische Modelle
- Modellierung komplexer elektromechanischer Systeme

### 2.1.2 Abgeschlossene Forschungsprojekte

1. Chris Steinhauer: Erwärmungsverhalten von Motoren in unterschiedlichen Arbeitspunkten
2. Gökay Gönen: Electrical Traction Machines for E-Mobility
3. Dmytro Kissa: Weiterentwicklung des Prototypen eines Stromrichters

### 2.1.3 Abgeschlossene Bachelor- und Studienarbeiten

1. René Inkhaimer : Energieoptimales Ansteuerungskonzept für Elektro-Permanentmagneten

### 2.1.4 Abgeschlossene Master- und Diplomarbeiten

1. Tom Engel: Entwurf verschiedener Sensor- und Aktorschnittstellen für die Inbetriebnahme von Range Extendern
2. Madleen Plich: Regelungstechnische Optimierung eines Transversalflussgenerators mit zweidimensionaler Flussführung
3. Gowtham Chandranna: Active torque damping of an ICE based on cylinder pressure feedback

## 2.2 Lehrstuhl Elektrische Netze und Erneuerbare Energie

### 2.2.1 Vorlesungen, Übungen und Praktika

#### Elektrische Energieversorgung

— Electric Power Supply—

SS V 2 SWS: Prof. Dr.-Ing. habil. Martin Wolter  
Ü 1 SWS: M. Sc. André Richter  
P 1 SWS: M. Sc. André Richter

- Einführung in die Aufgaben der Netzplanung und Netzbetriebsführung
- Einführung in die Hochspannungsgleichstromübertragung
- Lastflusssteuernde Betriebsmittel und Kompensationsanlagen
- Grundlagen der Supraleitung
- Einführung in die Thematiken der Sternpunktbehandlung, Traforegelung und des Netzschutzes

#### Elektrische Netze 1

— Electric Power Networks 1 —

SS V 2 SWS: Prof. Dr.-Ing. habil. Martin Wolter  
Ü 1 SWS: M. Sc. André Richter

- Statische Betriebsmittelmodellierung
- Statische Netzberechnungsverfahren
  - Modale Komponenten
  - Topologiebeschreibung elektrischer Netze
  - Leistungsflussberechnung
  - Kurzschlussstromberechnung
  - Netzzustandsschätzung (State Estimation)
  - Winkelstabilität
  - Fehlerberechnung
- Netzberechnung mit MATLAB

## Elektrische Netze 2

— Electric Power Networks 2 - Power System Dynamics —

WS 2016/17 V 2 SWS: Prof. Dr.-Ing. habil. Martin Wolter  
Ü 1 SWS: M. Sc. Christian Klabunde  
WS 2017/18 V 2 SWS: Prof. Dr.-Ing. habil. Martin Wolter  
Ü 1 SWS: Jun.-Prof. Ines Hauer

- Dynamische Netzberechnungsverfahren
  - Modale Komponenten
  - Zustandsraumdarstellung
  - Erweitertes Knotenpunktverfahren
  - Netzstabilitätsanalyse
- Dynamische Betriebsmittelmodellierung
  - Generatoren und Motoren
  - Effekte elektrischer Schalthandlungen
- Regelungsverfahren elektrischer Generatorsysteme
- Spannungsqualität (Power Quality)

## Elektromobilität

— Electromobility —

SS V 2 SWS: Dr.-Ing. Przemyslaw Komarnicki  
Ü 1 SWS: Dr.-Ing. Przemyslaw Komarnicki

- Einführung
- Physikalisch-technische Grundlagen (Stufen der Elektrifizierung, Kräfte, Energiewandlungskette)
- Modellierung und Simulation
- Komponenten (Energiespeicher, Bordnetz)
- Mobilitätssysteme (Motivation, Potential, Ladeinfrastruktur, Komponenten, Standardisierung, Softwareentwicklung)
- Geschäftsmodelle

## Grundlagen der elektrischen Energietechnik

— Introduction to Electrical Power Systems —

WS 2016/17	V 2 SWS:	Prof. Dr.-Ing. habil. Martin Wolter
	Ü 1 SWS:	Dr.-Ing. Marc Richter M. Sc. Christian Klabunde
WS 2017/18	V 2 SWS:	Prof. Dr.-Ing. habil. Martin Wolter
	Ü 1 SWS:	M. Sc. André Richter

- Einführung in den Aufbau und die Funktionsweise des elektrischen Energieversorgungssystems
- Eigenschaften und Funktionsweise der Betriebsmittel
- Grundlagen der Kraftwerkstechnik
- Übersicht über Erneuerbare Energien
- Grundlagen des Energiemarktes
- Grundlagen der Netzberechnung

## Energiespeichersysteme

— Energy storage systems —

WS 2017/18	V 2 SWS:	Jun.-Prof. Dr.-Ing. Ines Hauer
	Ü 1 SWS:	Jun.-Prof. Dr.-Ing. Ines Hauer

- Elektrochemische Energiespeicher
- Mechanische Speicher
- Sektorenkopplung
- Anwendungen
  - Dimensionierung, Betrieb und Systemtechnik von Solarspeichersystemen
  - Dimensionierung, Betrieb und Systemtechnik von Energiespeichern in elektrischen Versorgungsnetzen
  - Energiespeicher in der Elektromobilität

## Methoden der Optimierung elektrischer Energieversorgungsnetze

— Optimization Methods for Electrical Grids —

SS	V 2 SWS:	Prof. Dr.-Ing. habil. Martin Wolter
	Ü 1 SWS:	Jun.-Prof. Ines Hauer

- Kennenlernen des Programms MATLAB
- Einführung in Optimierungsalgorithmen
- Einführung in genetische Algorithmen, Partikelschwarmoptimierung, Fuzzy Logic
- Einführung in Prognosealgorithmen mit neuronalen Netzen und weiteren Prognosealgorithmen
- Darstellungsmöglichkeiten von Ergebnissen in MATLAB

## Netzschutz und Leittechnik

— Power System Protection and Control —

WS 2016/17	Blockseminar 3 SWS:	Prof. Dr.-Ing. Rainer Krebs M. Sc. Iryna Chychykina
WS 2017/18	Blockseminar 3 SWS:	Prof. Dr.-Ing. Rainer Krebs Jun.-Prof. Dr.-Ing. Ines Hauer

- Grundlagen
- Schutzgenerationen
- Schutzprinzipien
- Analoge und digitale Signalaufbereitung
- Digitale Messalgorithmen
- Entscheidungsmethoden und Logik
- Künstliche Intelligenz für Schutzzwecke
- Beispiele

## Operative Systemführung elektrischer Netze

— System Operation of Electric Power Networks —

WS 2016/17	V 2 SWS:	Prof. Dr.-Ing. habil. Martin Wolter
	Ü 1 SWS:	M. Sc. André Richter
WS 2017/18	V 2 SWS:	Prof. Dr.-Ing. habil. Martin Wolter
	Ü 1 SWS:	Jun.-Prof. Dr.-Ing. Ines Hauer

- Regulatorische Rahmenbedingungen
- Operative Aufgaben eines Netzbetreibers
  - Betriebsführung
  - Regelleistung
  - Engpassmanagement
  - Spannungshaltung
  - Netzwiederaufbau
- Leittechnik
- Planungsprozesse
- Kooperationsprozesse
- Praxisberichte
- Exkursion

## Photovoltaische Energiesysteme

— Photovoltaic Energy Systems —

SS V 2 SWS: Prof. Dr.-Ing. habil. Martin Wolter  
Jun.-Prof. Dr.-Ing. Ines Hauer  
Ü 1 SWS: Jun.-Prof. Dr.-Ing. Ines Hauer

- Energetisches Potential der Sonne
- Physikalische Grundlagen
- Photoelektrische Effekte in Halbleitern
- Photovoltaische Energiewandlung mit Solarzellen
- Komponenten, Eigenschaften, Aufbau und Betriebsverhalten von Photovoltaikanlagen
- Berechnung und Auslegung von Photovoltaikanlagen
- Solar-Wechselrichter
- Anwendung photovoltaisch erzeugter Elektroenergie
- Trends und Entwicklungsszenarien

## Regenerative Elektroenergiequellen - Systembetrachtung

— Renewable Energy Sources —

WS 2016/17 V 2 SWS: Dr.-Ing. André Naumann  
Ü 1 SWS: Dr.-Ing. Ines Hauer  
M. Sc. Iryna Chychykina  
WS 2017/18 V 2 SWS: Jun.-Prof. Dr.-Ing. Ines Hauer  
Ü 1 SWS: M. Sc. André Richter

- Einführung, Energiebegriffe, Elektrische Energiesysteme, Smart Grid
- Grundlagen des regenerativen Energieangebots, Energiebilanz
- Photovoltaische Stromerzeugung
- Stromerzeugung aus Wind
- Stromerzeugung aus Wasserkraft
- Brennstoffzellen
- Elektrische Energiespeicher
- Netzintegration regenerativer Erzeuger
- Netzbetrieb lokaler Energieerzeuger

## Windenergie

— Wind Energy —

SS V 2 SWS: Prof. Dr.-Ing. habil. Martin Wolter  
M. Sc. André Richter  
Ü 1 SWS: M. Sc. André Richter

- Geschichte der Windnutzung
- Potential der Windenergie
- Physikalische Grundlagen
- Aerodynamik
- Komponenten der Windkraftanlage
- Generatoren
- Netzanschluss
- Ökonomische Effizienz
- Windenergie in der öffentlichen Diskussion

## Power Network Planning and Operation

WS 2016/17 V 2 SWS: Prof. Dr.-Ing. habil. Martin Wolter  
Ü 1 SWS: M. Sc. Stephan Balischewski  
M. Sc. André Richter  
WS 2017/18 V 2 SWS: Prof. Dr.-Ing. habil. Martin Wolter  
Ü 1 SWS: Jun.-Prof. Dr.-Ing. Ines Hauer

- Introduction to the tasks of network planning and system operation
- Equation systems to describe steady-state and quasi-steady-state problems in electric power networks
- Grid modeling using modal component systems
- Basic algorithms of power flow, short-circuit and stability calculations as well as state estimation
- Introduction to power grid modelling with MATLAB

## Power System Economics and Special Topics

WS 2016/17 V 2 SWS: Prof. Dr.-Ing. habil. Martin Wolter  
Dr.-Ing. Pio Lombardi  
Ü 1 SWS: Dr.-Ing. Pio Lombardi  
M. Sc. Przemyslaw Trojan  
WS 2017/18 V 2 SWS: Prof. Dr.-Ing. habil. Martin Wolter  
Dr.-Ing. Pio Lombardi  
Ü 1 SWS: Jun.-Prof. Dr.-Ing. Ines Hauer

- Basics of economy and overview of markets
- Electric market architecture
- Economic electric dispatch
- Market for ancillary Services

## 2 Studium und Lehre

- Planning of investment in transmission and generation sectors
- Kyoto Protocol and other environmental mechanisms
- Smart Grids and other special topics

### Renewable Energy Sources

SS V 2 SWS: Prof. Dr.-Ing. Martin Wolter  
Dr.-Ing. André Naumann  
Ü 1 SWS: Dr.-Ing. André Naumann

- Introduction to renewable energy
- Legal framework, priority and subsidies
- Functionality of energy conversion
- Introduction to different technologies:
  - Photovoltaic energy
  - Wind energy
  - Hydroelectric power plants
  - Geothermal energy
  - Biomass
  - Fuel cells
  - Energy storage systems
- Grid connection of renewables

#### 2.2.2 Abgeschlossene Forschungsprojekte

- |                              |  |
|------------------------------|--|
| 1. Mohammad Islam:           | Potentials of an AA-CAES for Voltage Control   |
| 2. Ponnanna Muthanna Kekada: | Approach of Multi-Agent systems in autonomous voltage control in power system through distributed generation |
| 3. Taimoor Tahir:            | Experimental investigation of an URFC system   |
| 4. Kostiantyn Troitskyi:     | Systemauslegung für kombinierte Systeme aus erneuerbarer Energieerzeugung und Speichern                      |
| 5. Maciej Gradoń:            | Analysis of bipolar plates for the construction of a unitized regenerative fuel cell                         |
| 6. Jaysheel Dave:            | Adaptive voltage control strategies in distributed power system  |
| 7. Manasa Sanjeev Joshi:     | Technical and economic analysis of the new emerging photovoltaic systems                                     |
| 8. Muhammad Tayyab:          | Technologies for sector coupling   |
| 9. Sven-Moritz Kasten:       | Entwicklung eines MATLAB-Algorithmus zur Kraftwerkseinsatzplanung  |
| 10. Sri Teki:                | Literature research about the recent evolution in smart grid – update of training material                   |
| 11. Prakash Joshi:           | Investigation on renewable energy prediction   |

12. Hemapriyadharshini Kamarajan: Analysis of the LIONSIMBA battery model
13. Manoj Kumar Pesaru: Agent-based grid restoration
14. Markus Fichtner: Analyse der technischen und wirtschaftlichen Parameter aktuell realisierter Großspeichersysteme
15. Lukas Frisque: Entwicklung eines SCD-Files nach dem Standard IEC 61850 zur Implementierung auf einem Schutzgerät
16. Tim Reinking: Detaillierte Nachbildung von HGÜ-Kabeln durch konzentrierte Elemente
17. Yifan Cao: Development of an under-frequency load shedding model
18. Danish Sami Ilyas: Demand response and Demand Side Management Technologies
19. Ankit Singh: Literature research on the importance of instantaneous reserve
20. Sebastian Helm: Anforderungsanalyse von Systemdienstleistungsbereitstellung durch erneuerbare Energien
21. Markus Eppler: Bestimmung der optimalen Betriebsbedingungen für ausgewählte Speichersysteme
22. Viktor Butkov: Comparing methods for network visualization
23. Evgenii Semshchikov: Nonlinear Congestion Management Concepts
24. Maciej Sobczak: Combined Heat and Power plants with operation of non-standard gas fuels
25. Kseniia Ostapenko: Literaturrecherche zur Optimierung des Redispatches
26. Soham Choudhury: Congestion Management Concepts
27. Jean Bourdin Mbakam Kebankeu: Modellierung eines Pumpspeicherkraftwerkes
28. Ponnanna Muthanna Kekada: Operation strategies for storage systems in wind farms
29. Marcel Hallmann: Automatisierung eines Batteriespeichers zur Gebäudeintegration
30. Holger Gebhardt: Auswertungs- und Bewertungsalgorithmus für Großbatteriespeicheranlagen
31. Veeranjanyulu Punati: Determination of heat and power consumption for efficient use of fuel cells
32. Manasa Sanjeev Joshi: Technical and economic analysis potential clean
33. Caroline Lenz: Aufbau einer synchronen Messeinrichtung für Gleichstromübertragungstrecken
34. Prakash Joshi: Development of wind forecast combination method in MATLAB

### 2.2.3 Abgeschlossene Bachelor- und Studienarbeiten

1. Kristin Lena Dunker: Gebäudeabhängige Wärmeverbrauchsanalyse zur Identifikation wirtschaftlich attraktiver Einsatzgebiete von BZ-Heizgeräten
2. Alexander Ziervogel: Entwicklung eines Kataloges zur Erfassung von Kosten im Sinne der Stromnetzentgelteverordnung (StromNEV)
3. Gunnar Wende: Identifizierung von Kopplungsstellen zwischen dem Strom- und Gasnetz
4. Markus Eppler: Potentiale von Solarstromspeichern in elektrischen Netzen

### 2.2.4 Abgeschlossene Master- und Diplomarbeiten

1. Nicola Gast: Preiszonenübergreifende Kraftwerkseinsatzplanung in Verbundnetzen mit mehreren Marktgebieten
2. Usmain Hassnain: Power System Reconfiguration through Distribution Generation
3. Jonte Dancker: Entwicklung eines Simulationsmodells zur Beschreibung des elektrischen und thermischen Betriebsverhaltens von Batteriespeichersystemen
4. Hannes Dinh: Optimierung einer Messeinrichtung zur Zellspannungsüberwachung von Brennstoffzellen- und Batteriesystemen
5. Julian Reumann: Zusammenführung einzelner Komponenten zum Gesamtkonzept Virtuelles Kraftwerk und Entwicklung zukünftiger Strommarkt-konzepte
6. Tamara Schröter: Entwicklung einer Methodik zur optimalen Vorhersage der Einspeisung aus Erneuerbaren Energien in einem Netzgebiet
7. Jan-Simon Telle: Potentialanalyse verschiedener Betriebsstrategien und Geschäftsmodelle eines Quartierspeichers innerhalb einer PV-Klimaschutzsiedlung unter Berücksichtigung einer Sektor-kopplung
8. Tobias Streng: Simulation und Erprobung von adaptiven Schutzmechanismen
9. Abhik Ghosh: Development of an Energy Management System for Demand Response Programms within Smart DC houses
10. Charan K. Raghava Rao: Analysis and Comparison of two Competing Medium-Speed Generator Systems for Large Offshore Wind Turbines
11. Bhargava Undrakonda: Determination of the failure influence on different indices in dynamic security assessment
12. Alexander Ulrich: Technische und wirtschaftliche Analyse zur Integration eines Diagnosegerätes in eine Brennstoffzelle
13. Narayana Kumble Yashwind: Operation strategies for storage systems in households
14. Mykola Ivanchykov: Implementierung und Echtzeitsimulation eines hybriden Netzmodells in OPAL-RT

15. Marcel Hallmann: Implementierung eines Batteriemanagementsystems in eine HiL-Testumgebung und Validierung der Betriebsführung
16. Evgenii Semshchikov: Time Series based Redispatch Optimization
17. Viktor Butkov: Visualisation Software for Electrical Grids
18. Maciej Gradon: Development of a balance of plant concept and operation strategies for bidirectional fuel cell
19. Anna Muravska: Development of a method to evaluate Key Performance Indicators in the industrial sector
20. Chenlu Wang: Forecast time-series analyzes for an improved renewable energy infeed prediction
21. Sourav Maji: Under frequency load shedding with different scenarios of load generation mixture
22. Maciej Sobczak: Analyzation of the gas sector as an option for sector coupling in the electric power system
23. Jackson Joy: Development of a multi country model to analyze under frequency load shedding
24. Sebastian Helm: Realisierung einer Schnittstelle zur prozessgerechten Ansteuerung einer HGÜ-Anlage unter Einsatz von RTUs und modernen Kommunikationsstandards für den Netzbetrieb
25. Dennis Tucholke: Entwicklung eines sektorenübergreifenden Multimarktmodells für Strom, Gas und Wärme
26. Yogesh Yadav: Decentralized WLS state estimation for intelligent substations in Smart Grid
27. Sven Moritz Kasten: Entwicklung eines MATLAB-Algorithmus zur Kraftwerkseinsatzplanung
28. Shoaib Ansari: Implementation of SmartGrid communication standards IEC60870-5-104, IEC61850 and C37.118 into Real-time simulation systems
29. Robin Ködelpeter: Entwicklung eines dynamischen Kraftwerksmodells in MATLAB
30. Mariia Krasnorutska: Erstellung einer MATLAB-Routine zum Erzeugen von Haushaltslastprofilen
31. Esther Wagenhäuser: Vergleich von Speicherszenarien zur Erhöhung des lokalen Eigenverbrauchs
32. Axel Guicking: Systemauslegung für kombinierte Systeme von erneuerbaren Energieerzeugung und Speichern
33. Xue Cheng: Untersuchung des CO<sub>2</sub>-Handels und Analyse der Entwicklung von CO<sub>2</sub>-Zertifikat-Preisen
34. Ievgen Opanasenko: Development of a procedure for optimal redispatch planning using genetic optimization

## 2 Studium und Lehre

- |                                |  |
|--------------------------------|--|
| 35. Iuliia Shevtsova:          | Entwicklung eines Modells zur Vorhersage der Leiterseiltemperatur unter Berücksichtigung von Wetter-, Last- und Einspeiseprognosen |
| 36. Rahul A. Gadkari:          | Power system restoration strategy using shortest path approach   |
| 37. Muhammad Zahid:            | Voltage control strategy using Particle Swarm Optimization in distributed power systems  |
| 38. Holger Gebhardt:           | Betriebsführungsmodell für Batteriespeicheranwendungen im Erzeugerverbund  |
| 39. Kseniia Ostapenko:         | Entwicklung eines Verfahrens für einen kosteneffizienten Redispatch mit Hilfe der Ameisenkolonie-Optimierung                       |
| 40. Revanth Kumar Esaragundi:  | Development of a Model to analyze the influence of renewables in different voltage levels  |
| 41. Muhammad Shahjehan Akhter: | Operational Management Methods of HVDC lines in the German transmission system   |

### 2.2.5 Praktikantenbetreuung

Der Lehrstuhl bietet bereits seit vielen Jahren interessierten Schülern und Schülerinnen umfassende Einblicke in die Forschungsarbeiten und Studienmöglichkeiten am LENA und der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. Wie können die verstärkt eingesetzten erneuerbaren Energien in das elektrische Netz integriert werden; welche Rolle spielen dabei Energiespeicher und wann werden Wasserstoffwirtschaft und Brennstoffzellen zum Einsatz kommen? Nur einige Fragen die im Rahmen der zumeist zweiwöchigen Praktika theoretisch und durch praktische Laborversuche den Schülern und Schülerinnen näher gebracht werden.

Im Rahmen des Praktikums werden jedoch nicht nur die Themen des LENA behandelt, sondern auch andere Forschungsbereiche der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik. Interessante Einblicke bieten die Absorberhalle des Lehrstuhls für Elektromagnetische Verträglichkeit und die Aktivitäten zur Elektromobilität des angrenzenden Fraunhofer IFF Magdeburg. Weiterhin besteht die Möglichkeit in der Praktikumszeit Vorlesungen zu besuchen, interessante Standorte der Universität, wie die imposante Architektur der Bibliothek kennenzulernen und wichtiges Hintergrundwissen zum Studium zu erlangen.

Im aktuellen Jahr fanden drei zweiwöchige Schülerpraktika durch Schüler des Werner-von-Siemens-Gymnasium und Geschwister-Scholl-Gymnasium Magdeburg sowie einer angehenden Studentin aus dem Kamerun statt. Die Schüler wurden durch die Praktikumsangebote der Fakultät auf das LENA aufmerksam und lernten die Bereiche Elektrische Energienetze, Elektromobilität und Brennstoffzelle kennen.

- Tim Werner, Werner-von-Siemens-Gymnasium Magdeburg (06.03 – 17.03.2017)
- Danielle Ingrid Nodom Notouom, Gymnasium in Yaounde, Kamerun (08.05 – 19.05.2017)
- Marcel Naumann, Geschwister-Scholl-Gymnasium Magdeburg (12.06 – 21.06.2017)

## 2.3 Lehrstuhl für Elektromagnetische Verträglichkeit

### 2.3.1 Vorlesungen, Übungen und Praktika

#### Elektromagnetische Verträglichkeit regenerativer elektrischer Systeme

WS V 2 SWS: Prof. Dr.-Ing. Ralf Vick  
M.Sc. Anke Fröbel  
Dr.-Ing. Mathias Magdowski  
Ü 1 SWS: M.Sc. Enrico Pannicke

- Einführung in die EMV regenerativer elektrischer Systeme
- Gesetzliche Anforderungen und Standardisierung
- Elektromagnetische Kopplung und Schirmung
- Einkopplung in Leitungen
- Power Quality

#### Anwendung stochastischer Modelle in der EMV

WS V/Ü 2 SWS: Dr. rer. nat. Sergey Tkachenko

Die Studierenden kennen bereits die grundlegenden Prinzipien der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV). Sie werden weiterhin befähigt, elektromagnetische Kopplungen durch Nutzung von analytischen und numerischen Methoden zu beschreiben. Sie können stochastische Modelle zur Beschreibung von EMV-Testumgebungen anwenden.

Inhalte:

- Problemspezifische Einführung in die EMV, Begriffe, Störemission, Störfestigkeit, Störpegel, Störabstand, Zeit- und Frequenzbereich
- EMV-Mess- und Prüftechnik (Überblick)
- Methoden zur Analyse der Kabelkopplung
- Modellierung der Kabelkopplung in zufällige Kabelstrukturen
- Modenverwirbelungskammer (MVK) als stochastische EMV-Messumgebung
- Beschreibung des elektromagnetischen Feldes durch den Ansatz ebener Wellen
- Feldverteilung und Korrelationsfunktionen
- Messwertinterpretation

### **Grundlagen der Elektrotechnik I**

WS V 3 SWS: Prof. Dr.-Ing. Ralf Vick  
M. Sc. Anke Fröbel  
M. Sc. Johanna Kasper  
Ü 2 SWS: Dr.-Ing. Mathias Magdowski  
M. Sc. Anke Fröbel  
M. Sc. Matthias Hirte  
M. Sc. Enrico Pannicke  
Dipl.-Phys. Jörg Petzold  
M. Sc. Johanna Kasper  
M. Sc. Benjamin Hoepfner  
M. Sc. Moustafa Raya  
M. Sc. Felix Middelstädt

Die Vorlesung behandelt Grundbegriffe und Elemente elektrischer Stromkreise und gibt einen Überblick über die Berechnung resistiver elektrischer Netzwerke (linear und nichtlinear). Weiterhin werden die Grundlagen der Vierpoltheorie eingeführt.

### **Grundlagen der Elektrotechnik (Praktikum I)**

WS P 3 SWS: M. Sc. Anke Fröbel  
M. Sc. Matthias Hirte  
Dipl.-Phys. Jörg Petzold  
M. Sc. Xiaowei Wang

Das Praktikum dient der Vermittlung grundlegender praktischer Erkenntnisse und Erfahrungen beim Einsatz moderner Mess-, Simulations- und Auswertetechnik, wobei dem Messen mit dem digitalen Speicheroszilloskop große Bedeutung zukommt. Im Detail gehören dazu laborpraktische Untersuchungen von Gleich- und Wechselstromkreisen, von Zweipolen mit linearem und nichtlinearem Strom-Spannungs-Verhalten sowie Auseinandersetzung u. a. mit der Problematik von Ortskurven, nichtharmonischen periodischen Vorgängen, Resonanzkreisen und Ausgleichsvorgängen in Gleich- und Wechselstromnetzwerken.

### **Modern Concepts of EMC and EMC Measurements (Laboratory Experiments)**

WS P 2 SWS: Dr.-Ing. Mathias Magdowski  
Dr.-Ing. Al-Hamid  
M. Sc. Xiaowei Wang  
M. Sc. Matthias Hirte  
M. Sc. Enrico Pannicke

The students gain hands-on experience in EMC measurement techniques during the following experiments:

- measurements in the semi-anechoic chamber
- measurements in the reverberation chamber
- characterization of filters
- numerical calculation of electromagnetic fields and couplings

- transmission line perturbations
- shielding efficiency

## Vorkurs Mathematische Grundlagen der Elektrotechnik und Medizintechnik

WS Blockveranstaltung Dr.-Ing. Mathias Magdowski

Der Vorkurs dient der Wiederholung wichtiger mathematischer Grundlagen speziell für Studierende der Elektrotechnik und Medizintechnik. Der Vorkurs findet als Blockveranstaltung über fünf Tage statt.

1. Vorlesung Zahlen und Einheiten, Funktionen, Winkelfunktionen, Exponentialfunktion
2. Vorlesung Differentialrechnung, Differentialquotient, Differentiationsregeln, Differentialgleichungen
3. Vorlesung Integralrechnung, unbestimmtes und bestimmtes Integral, Integrationsregeln, Mittelwert und Effektivwert
4. Vorlesung Lineare Algebra, Vektoren, Skalarprodukt, Vektorprodukt
5. Vorlesung Matrizen, Matrixmultiplikation, inverse Matrix, lineare Gleichungssysteme

Die Vorlesung wird durch eine herkömmliche handschriftliche Übung und durch eine Computerübung ergänzt. In der handschriftlichen Übung werden die Vorlesungsthemen durch einfache und anwendungsnahe Aufgaben wiederholt und gefestigt. In der anschließenden Computerübung werden die gleichen Übungsaufgaben unter Zuhilfenahme von Mathematiksoftware bearbeitet. Dabei wird der grundlegende Umgang mit den Programmen

- GNUplot (Funktionenplotter)
- Maxima (Computeralgebrasystem)
- GNU Octave (Numerikprogramm)

besprochen. Diese Programme sind alle quelloffen und frei verfügbar. Sie werden per USB-Stick an die Studierenden verteilt. Diese können die Software auf ihren eigenen Notebooks (sowie Smartphones und Tablet-PCs) installieren und zur Bearbeitung der Aufgaben im Rahmen des Vorkurses sowie im weiteren Studium benutzen.

In diesem Jahr wurde die Vorlesung erneut durch ein Live-Quiz ergänzt. Zur besseren Aktivierung der Studierenden wurden während der Vorlesung mehrere Verständnisfragen zum gerade behandelten Stoff gestellt. Von den drei, vier oder fünf vorgegebenen Antwortmöglichkeiten sollten die Studierenden dann mit Hilfe Ihres Smartphones über die universitätseigene Plattform Eval.uni die richtige Antwort auswählen. Das gemeinschaftliche Ergebnis, die Hintergründe der Frage und natürlich auch die richtige Antwort wurden dann direkt im Anschluss diskutiert.

### **Non-technical Project Seminar**

SS Seminar Dr.-Ing. Mathias Magdowski  
M.Sc. Anke Fröbel  
M.Sc. Moustafa Raya

After successful completion of the seminar, students have an overview of the methods of scientific writing and presentation. The students are able to perform all the necessary steps to create and defend a final paper/thesis. Basic knowledge of research, scientific writing, visualization and presentation is imparted.

### **Analyse und Berechnung elektromechanischer Strukturen**

SS V 2 SWS: Prof. Dr.-Ing. Ralf Vick  
Ü 1 SWS: Dr.-Ing. Mathias Magdowski

- Einführung in die Beschreibung von Signalen im Zeit- und Frequenzbereich, lineare und nichtlineare Systeme, Beschreibung von Netzwerkstrukturen
- Simulation elektrischer Netzwerke
- Berechnung magnetischer Kreise
- Modellierung mechanischer Systeme als äquivalente elektrische Netzwerke
- Kombination von Netzwerk- und Feldberechnungsverfahren
- Zusammenwirken von Leistungselektronik und elektrischen Maschinen

Die Lehrveranstaltung findet als Inverted-Classroom-Variante statt, d. h. die Vorlesungen sind größtenteils auf Video aufgezeichnet und können eigenständig von den Studierenden vorbereitet, angeschaut und nachbereitet werden. In der Präsenzzeit an der Universität werden dann hauptsächlich komplexe Übungsaufgaben bearbeitet sowie weiterführenden Probleme besprochen und diskutiert.

### **Elektromagnetische Verträglichkeit**

SS V 2 SWS: Prof. Dr.-Ing. Ralf Vick  
Ü 1 SWS: Dipl.-Phys. Jörg Petzold

- Einführung in die EMV
- Klassifizierung und Charakterisierung von Störquellen
- Koppelmechanismen und Gegenmaßnahmen
- EMV-Analysemethoden zur Behandlung elektromagnetischer Kopplung basierend auf dem  $\lambda/2$ -Dipolmodell
- Schirmung nach Schelkunoff, Einkopplung durch Aperturen, Messung der Schirmdämpfung
- Verkabelung, Massung, Filterung, Schutzschaltungen
- EMV-Mess- und Prüftechnik (Überblick)

## EMV-Messtechnik

SS V 2 SWS: Dr.-Ing. Mathias Magdowski  
M. Sc. Matthias Hirte  
Dr.-Ing. Moawia Al-Hamid  
Ü 1 SWS: Dr.-Ing. Mathias Magdowski

- Einführung, Begriffe, Definitionen (Messgrößen, Einheiten, dB-Skala, Rauschen, Signale, Messunsicherheit)
- Spektrum- und Netzwerkanalyse, Zeitbereichsmessverfahren
- Antennen, Messschaltungen und Komponenten
- Messung der Streu- und Transferimpedanzmatrizen
- EMV-Messplätze und -Umgebungen
- Feld- und leitungsgebundene Emissionsmessungen
- Störfestigkeitsuntersuchungen
- Standardisierte Messverfahren

## Grundlagen der Elektrotechnik II

SS V 2 SWS: Prof. Dr.-Ing. Ralf Vick  
M. Sc. Anke Fröbel  
M. Sc. Johanna Kasper  
Ü 2 SWS: Dr.-Ing. Mathias Magdowski  
M. Sc. Anke Fröbel  
M. Sc. Matthias Hirte  
M. Sc. Enrico Pannicke  
Dipl.-Phys. Jörg Petzold  
M. Sc. Johanna Kasper  
M. Sc. Benjamin Hoepfner  
M. Sc. Moustafa Raya  
M. Sc. Felix Middelstädt

Die Vorlesung behandelt elektrische Netzwerke und ihre Berechnung, resistive Netzwerke (linear, nichtlinear), Netzwerke bei harmonischer Erregung (komplexe Wechselstromrechnung, Ortskurven, duale und äquivalente Schaltungen, 2-Tor-Schaltungen bei Wechselstrom, Wechselstromschaltungen mit technischer Bedeutung, Mehrphasensysteme), Leitungen als Vierpole, Netzwerke mit nichtsinusförmiger periodischer Erregung und Ausgleichsvorgänge in Netzwerken.

## Grundlagen der Elektrotechnik (Praktikum II)

SS P 3 SWS: M. Sc. Anke Fröbel  
M. Sc. Matthias Hirte  
Dipl.-Phys. Jörg Petzold  
M. Sc. Xiaowei Wang  
Dr. rer. nat. Sergey Tkachenko

Das Praktikum dient der Vermittlung grundlegender praktischer Erkenntnisse und Erfahrungen beim Einsatz moderner Mess-, Simulations- und Auswertetechnik, wobei dem Messen mit dem digitalen Speicheroszilloskop große Bedeutung zukommt. Im Detail gehören dazu laborpraktische Untersuchungen von Gleich- und Wechselstromkreisen, magnetischen Kreisen und Übertragern, ebenen Feldern, Energiewandlungsprozessen und von Zweipolen mit nichtlinearem Strom-Spannungs-Verhaltens sowie Auseinandersetzung u. a. mit der Problematik von Kompensations- und Brückenschaltungen und der Simulation von Ausgleichsvorgängen in Gleich- und Wechselstromnetzwerken.

### **Projektseminar Elektrotechnik/Informationstechnik**

WS Blockveranstaltung 4 SWS: M. Sc. Enrico Pannicke  
Dr.-Ing. Mathias Magdowski

Im Projektseminar Elektrotechnik/Informationstechnik bzw. dem sogenannten „Lego-Praktikum“ werden Studierenden Grundkenntnisse in der Programmierung und im Umgang mit Sensoren, Motoren und Regelungen vermittelt. Das Seminar fand in diesem Jahr vom 13. Februar bis 24. Februar statt. Zu Beginn des Seminar gibt es für die Erstsemesterstudierenden eine Einführung in die Programmierung in MATLAB und in die Ansteuerung von Sensoren und Motoren.

Anschließend geht es Elektrotechnik-Studierenden darum, aus einem programmierbaren Lego-NXT-Steuergerät, einigen Sensoren (z. B. Ultraschall, Helligkeit, Farbe, Kompass, Gyrometer, usw.) und bis zu drei Servomotoren einen Automaten oder einen Roboter zu bauen, der irgendeine mechanische Aufgabe verrichtet. Zur Programmierung wird MATLAB verwendet.

In diesen Jahr entwickelten die 17 teilnehmenden Studierenden in Zweier- und Dreiergruppen unter anderem so praktische Dinge wie:

- einen Delta-Roboter zum Malen (siehe Abbildung 2.1),
- einen 3D-Scanner,
- eine Multi-Purpose-Plattform mit Solarpaneel,
- eine autonome Müllabfuhr oder
- einen Cube-Solver für Zauberwürfel.

Den krönenden Abschluss bildeten die Projektpräsentationen und Live-Demonstrationen der Gruppen vor einer Jury aus Mitarbeitern und Dozenten der Fakultät für Elektro- und Informationstechnik. Der drei gelungensten Exponate wurden auch wieder beim CampusDay am 20. Mai gezeigt.

### **Modern Concepts of EMC und EMC Measurements**

SS V 2 SWS: Prof. Dr.-Ing. Ralf Vick  
Ü 1 SWS: Dr.-Ing. Mathias Magdowski  
M. Sc. Moustafa Raya

- basic principles of electromagnetic compatibility
- regulatory requirement of EMC compliant products
- overview of international EMC standards and measurement procedures
- analytical and numerical method for the analysis of EMC problems
- electromagnetic coupling, shielding and filtering
- countermeasures against electromagnetic interference

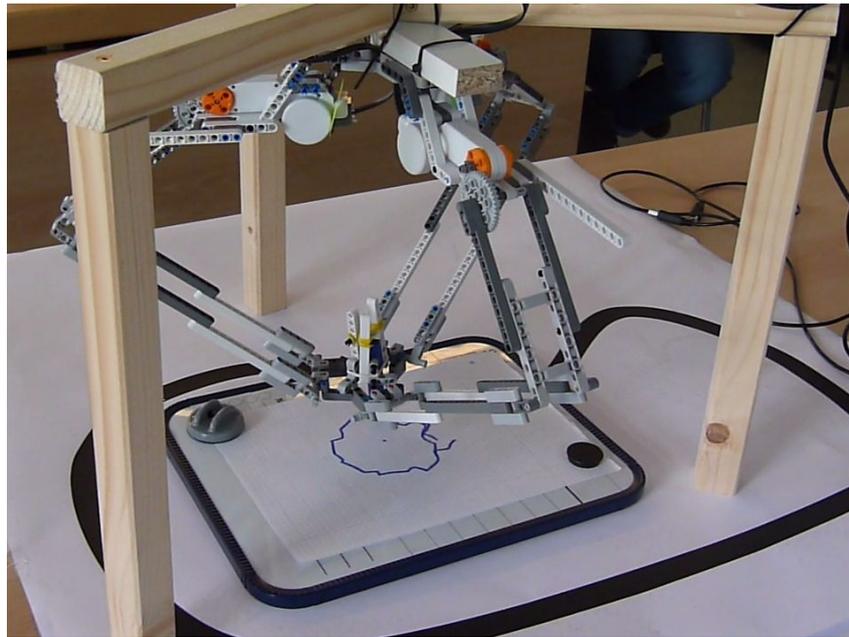


Abbildung 2.1: Im Projektseminar Elektrotechnik/Informationstechnik („Legopraktikum“) entwickelter Delta-Roboter zum Zeichnen (Foto: Mathias Magdowski)

### **Dritte Gastvorlesung am German-Russian Institute of Advanced Technologies in Kasan, Russland**

Für den Masterstudiengang „Electrical Engineering and Information Technology“ hielt Dr. Mathias Magdowski in einer Blockveranstaltung im Rahmen des German-Russian Institute of Advanced Technologies (GRIAT) vom 06. bis 14. März die Vorlesung „Modern Concepts of Electromagnetic Compatibility and EMC Measurements“ zum dritten Mal an der Staatlichen Technischen Andrej-Nikolajewitsch-Tupolew-Universität Kasan. Der Kurs bestand aus einer täglichen Vorlesung und einer Rechenübung.

Behandelt wurden die Themen:

- Störsignale,
- Rechnen in Dezibel,
- Gleichtakt- und Gegentaktsignale,
- Zeit- und Frequenzbereich,
- Kopplungsmechanismen und Elementarstrahler, sowie
- Schirmungstheorie nach Schelkunoff.

Ergänzt wurde die Lehrveranstaltung erstmalig durch eine Computerübung, in der praxisnahe Probleme zur galvanischen und kapazitiven Kopplung mit Hilfe der Numeriksoftware MATLAB bzw. dem Netzwerksimulator LTspice berechnet und simuliert wurden.

Dieser Kurs wurde, wie auch alle anderen Lehrveranstaltungen am GRIAT, auf englisch durchgeführt. Die acht russischen Studenten des dritten Masterkurses (siehe Abbildung 2.2) waren mit großem Interesse dabei und bedanken sich mit russischem Tee bei ihrem Dozenten. Sie studieren dann ab Oktober 2017 für ein Semester in Magdeburg und absolvieren dabei die zur Vorlesung zugehörige praktische Übung und das entsprechende Laborpraktikum.

Die Kooperation zwischen der Otto-von-Guericke-Universität (OvGU) in Magdeburg und der Technischen Andrej-Nikolajewitsch-Tupolew-Universität (KNRTU-KAI) in Kasan, Russland im

## 2 Studium und Lehre

Rahmen des GRIAT besteht seit 2014. Ziel des GRIAT ist die Ausbildung von hochqualifizierten Ingenieuren in der KNRTU-KAI und in den deutschen Partneruniversitäten, zu denen neben der OvGU auch noch die Technische Universität Ilmenau gehört. Die erfolgreichen Studenten erhalten zwei Abschlüsse, einen der KNRTU-KAI und einen der deutschen Partneruniversität. Zukünftig sind auch Studiengänge an der TU Kaiserslautern bzw. der TU Braunschweig geplant.



Abbildung 2.2: Seminargruppe der dritten Gastvorlesung am German-Russian Institute of Advanced Technology in Kasan, Russland mit dem Dozenten Dr.-Ing. Mathias Magdowski

### 2.3.2 Abgeschlossene Forschungsprojekte

1. Supriya Reddy Mandha: Current Challenges in Power Quality Assessment
2. Jaysheel Dave: Improvement of Harmonic Level in Low Voltage Networks Using Active Power Filters
3. Venkata Gonuguntala: Using Active Harmonic Filters for Intelligent Surge Protection

### 2.3.3 Abgeschlossene Bachelor- und Studienarbeiten

1. Janis Poeck: Konzeptionierung und Implementierung eines homogenen Resonators für die Bestimmung von Materialparametern in der NMR-Spektroskopie
2. Daniel Grefkes: Experimentelle Analyse der Optimierungsmöglichkeiten eines RFID-Tunnels

### 2.3.4 Abgeschlossene Master- und Diplomarbeiten

1. Zain Rehman: Simulation of the Plane Wave Coupling to Multiconductor Transmission Lines with the Numerical Electromagnetic Code
2. Mohammad Ali: Measurement of the Stochastic Electromagnetic Field Coupling to Multiconductor Cables above a Ground Plane in a Reverberation Chamber

3. Marcus Prier: Konzept eines Funktransmitters zur Übertragung eines Magnet-Resonanz-Signals
4. Aleksandr Gorshkov: Combined Circuit and Field Simulation for the Prediction of the Radiated Emissions of Grid Connected Power Converters
5. Roman Chevtaev: Measurement of the High Intensity Radiated Field (HIRF) Coupling to a Cable Harness in a Reverberation Chamber
6. Ildar Zalaliev: Analytical Calculation and Numerical Simulation of the High Intensity Radiated Field (HIRF) Coupling to a Cable Harness
7. Robin Löber: Optimierung eines automatisierten Teststandes für Power Quality Assessment
8. Thomas Gerlach: Implementierung eines RFA-MR-Hybridsystem

## 2.4 Lehrstuhl für Leistungselektronik

### 2.4.1 Lehrveranstaltungen für Bachelor-Studiengänge

#### Grundlagen der Leistungselektronik

— Introduction to power electronics —

SS	V 2 SWS:	Prof. Dr.-Ing. Andreas Lindemann
	Ü 1 SWS:	Dr.-Ing. Reinhard Döbbelin M. Sc. Lars Middelstädt
WS	P 1 SWS:	Dr.-Ing. Reinhard Döbbelin Dr.-Ing. Wolfgang Fischer M. Sc. Lars Middelstädt Dipl.-Ing. Bastian Strauß M. Sc. Carsten Kempik

- Einführung
- Gleichstromsteller
  - Tiefsetzsteller
  - Hochsetzsteller
  - Zwei-Quadranten-Steller — Brückenweig
- H-Brücke (selbstgeführt mit Spannungszwischenkreis)
- dreiphasige Brückenschaltung (selbstgeführt mit Spannungszwischenkreis)
- netzgeführte Brückenschaltungen
  - ungesteuerter Gleichrichter
  - vollgesteuerte Brückenschaltung

unter besonderer Berücksichtigung von

- Schaltungen
- Strom- und Spannungsverläufen
- Steuerverfahren
- Anwendungsbeispielen

#### Bauelemente der Leistungselektronik

— Power semiconductor devices —

SS	V 2 SWS:	Prof. Dr.-Ing. Andreas Lindemann
	Ü 1 SWS:	M. Sc. Lars Middelstädt
	P 1 SWS:	Dr.-Ing. Wolfgang Fischer M. Sc. Lars Middelstädt M. Sc. Carsten Kempik

- Leistungshalbleiter-Bauelemente:
  - MOSFET
  - IGBT

- Diode
- Thyristor

unter besonderer Berücksichtigung von

- Funktionsweise
- statischem und dynamischen Verhalten
- Aufbautechnik
- schaltungsgerechter Auslegung
- Ansteuerung, Systemarchitektur

## Bauelemente der Elektronik

— Electronic devices —

WS V 2 SWS: Prof. Dr.-Ing. Andreas Lindemann  
Dr.-Ing. Wolfgang Fischer  
Ü 1 SWS: Dr.-Ing. Wolfgang Fischer  
und Kollegen

- Halbleiter
- Diode
- Bipolar-Transistor
- Feldeffekt-Transistor
- weitere Bauelemente

## Allgemeine Elektrotechnik 1

— Electrical engineering and electronics 1 —

WS V 2 SWS: Prof. Dr.-Ing. Andreas Lindemann  
Ü 1 SWS: Dr.-Ing. Reinhard Döbbelin  
M. Sc. Lars Middelstädt  
Dipl.-Ing. Andreas Bannack  
Dr.-Ing. Thomas Schallschmidt  
P 2 SWS: Dipl.-Ing. Andreas Bannack  
und Kollegen

- Grundbegriffe
- Stromkreise
- Wechselgrößen
- elektrische und magnetische Felder

Veranstaltung für Nicht-Elektrotechniker; Allgemeine Elektrotechnik 2 vgl. auch Abschnitt 2.1.1

## 2.4.2 Lehrveranstaltungen für Master-Studiengänge

### Schaltungen der Leistungselektronik

— Power electronic circuits —

SS V 2 SWS: Prof. Dr.-Ing. Andreas Lindemann  
Dr.-Ing. Wolfgang Fischer  
Dr.-Ing. Reinhard Döbbelin  
Ü 1 SWS: Dr.-Ing. Wolfgang Fischer  
Dr.-Ing. Reinhard Döbbelin

- resonante Schaltungen
  - lastgeführte Stromrichter, z. B. Schwingkreis-Wechselrichter
  - Entlastungsnetzwerke, z. B. ARCP-Umrichter
- selbstgeführte Schaltungen
  - Varianten
    - \* Mehrpunkt-Umrichter
    - \* Stromzwischenkreis-Umrichter
    - \* Matrix-Umrichter
  - Steuer- und Regelverfahren
    - \* Raumzeiger
    - \* Modellbildung und Stromregelung beim Gleichstromsteller
- netzgeführte Stromrichter — Varianten
  - Umkehrstromrichter
  - höherpulsige Brückenschaltungen
  - Wechselstromsteller, Drehstromsteller
- Kombination von Grundsaltungen
  - netzfreundliche Gleichrichter mit Korrektur des Leistungsfaktors — z. B. einphasig mit geregelter Hochsetzsteller

mit Anwendungsbeispielen u. a. aus dem Bereich der erneuerbaren Energie

### Systeme der Leistungselektronik

— Power electronic systems —

WS V 2 SWS: Prof. Dr.-Ing. Andreas Lindemann  
Dr.-Ing. Wolfgang Fischer  
Ü 1 SWS: Dr.-Ing. Wolfgang Fischer  
Dr.-Ing. Reinhard Döbbelin

- Stromversorgungen — Schaltnetzteile
  - Sperrwandler
  - Durchflusswandler

- Leistungselektronik zur Nutzung von aus erneuerbaren Quellen erzeugter elektrischer Energie
  - Photovoltaik
  - Windenergie
  - drehzahlvariable Pumpspeicherkraftwerke
  - Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ)
- Leistungselektronik im Automobil
  - Übersicht
  - Zuverlässigkeit
  - Ladetechnik: kontaktlose Energieübertragung

### Steuerung von Leistungselektronik

— Control in power electronics —

SS S 3 SWS: Dr.-Ing. Wolfgang Fischer  
M. Sc. Carsten Kempia

- Komponenten der Informationsverarbeitung, Steuerung, Regelung, Anpassung sowie des Schutzes in leistungselektronischen Schaltungen
- Integration von Steuerungskomponenten und Leistungshalbleitern
- Simulation ausgewählter Beispiele

### Systemintegration von Leistungselektronik

— System integration of power electronics —

WS V 2 SWS: Dr.-Ing. Wolfgang Fischer  
Dr.-Ing. Reinhard Döbbelin  
M. Sc. Carsten Kempia  
Ü 1 SWS: Dr.-Ing. Reinhard Döbbelin  
Dr.-Ing. Wolfgang Fischer

- Systemintegration am Beispiel einer Schweißstromquelle
  - Einführung in das Simulationsprogramm SABER, Programmteile und Bibliotheken
  - Ablauf einer Schaltungssimulation
  - Dynamische Modelle von Leistungshalbleitern und deren Parametrierung
  - Analyse von Betriebsverhalten, Verlustleistung, Leistungsfaktor, dynamischem Verhalten
- Aspekte elektromagnetischer Verträglichkeit leistungselektronischer Systeme
  - Netzurückwirkungen
  - höherfrequente geleitete Störemission
- Zuverlässigkeit von Leistungshalbleiter-Bauelementen unter Berücksichtigung von Systemaspekten

## Power Electronics

WS V 2 SWS: Dr.-Ing. Reinhard Döbbelin  
Ü 1 SWS: Dr.-Ing. Reinhard Döbbelin

- introduction
- buck-/boost chopper, phase leg
  - function
  - applications
- functional principle plus ratings and characteristics of main power electronic components
  - MOSFET
  - IGBT
  - diode
  - aspects of packaging
- circuit theory, behaviour and dimensioning of components in converters
  - static
  - dynamic
- H-bridge
  - control method: pulse width modulation (PWM)
  - application: inverter, rectifier
- three-phase bridge
  - control method: pulse width modulation (PWM)

## Advanced Power Electronics

SS V 1 SWS: Dr.-Ing. Wolfgang Fischer  
Ü 1 SWS: Dr.-Ing. Wolfgang Fischer  
P 1 SWS: Dr.-Ing. Wolfgang Fischer  
Dr.-Ing. Reinhard Döbbelin  
M. Sc. Lars Middelstädt

- system design by combinations of basic circuits
- selected advanced circuits, e. g.
  - power factor correction
  - switched mode power supplies
  - bidirectional operation of DC/DC converters
- selected systems with advanced circuits, e. g.
  - grid-connected multi-stage converters

## Power Electronic Components and Systems

WS V 2 SWS: Prof. Dr.-Ing. Andreas Lindemann  
Dr.-Ing. Reinhard Döbbelin  
Ü 1 SWS: Dr.-Ing. Reinhard Döbbelin  
Dr.-Ing. Wolfgang Fischer

- power electronic components
  - active devices
    - \* derivation of device base equations
    - \* functionality, ratings and characteristics of IGBT, MOSFET and diode
    - \* packaging and assembly
    - \* introduction to dynamic device modeling with SABER
  - passives
    - \* inductive components — inductors, transformers
    - \* capacitive components — capacitors
- power electronic systems
  - component stress in selected systems
  - dimensioning
  - reliability

### 2.4.3 Abgeschlossene Projekte

1. Yaxin Zhang: Analyse der Verluste eines dreiphasigen Zweipunktwechselrichters mit Spannungszwischenkreis
2. Max Hoppe: Entwicklung und Optimierung des Simulationsmodells und des Steuerprogramms zum geregelten Betrieb eines Versuchsstandes für Untersuchungen an dreiphasigen Wechselrichtern
3. Pawel Galaj: Characterisation of a double layer capacitor (DLC)
4. Igor Agafonov: Driver Circuits for Wide Band Gap Semiconductors

### 2.4.4 Abgeschlossene Masterarbeiten

1. Arunkumar Jayaraman: Experimental Setup and Investigation of Switching Behavior of GaN Transistors
2. Sachin Hegde: Compensation of nonlinear effects in voltage source inverters with high switching frequencies and a small grid filter inductance
3. Namita Vyas: Development of a robust SiC Driver and Half Bridge for Photovoltaic and Battery Inverters
4. Sebastian Wedler: Aufbau, Programmierung und Inbetriebnahme eines Versuchsstandes für Untersuchungen an Wechselrichtern unter realen Bedingungen
5. Muhammad Khan: Model Based Design of a Three-Phase Voltage Source Converter with Direct Power Control

## 2 Studium und Lehre

6. Nils Sonntag: Aufbau, Programmierung und Inbetriebnahme eines modularen bidirektionalen Gleichspannungswandlers für die Anbindung eines Doppelschichtkondensators an ein Fahrzeug-Bordnetz
7. Christian Krause: Analyse von GaN-Gleichstromstellern im Parallelbetrieb
8. Shruti Subramanya: Advanced control strategies for grid-connected voltage-source converters under unbalanced grid conditions
9. Albert Möller: Aufbau, Programmierung und Inbetriebnahme eines Versuchsstandes für Untersuchungen an bidirektionalen Gleichspannungswandlern zwischen Fahrzeug-Bordnetz und Doppelschichtkondensator

## 2.5 Institutsebene

### 2.5.1 IEEE Student Branch Magdeburg

#### Teilnahme an Sportlichen Events<sup>1</sup>

Die IEEE Student Branch Magdeburg hat in diesem Jahr wieder an zahlreichen sportlichen Events in Magdeburg teilgenommen.

Zwei Vertreter der Student Branch nahmen zum wiederholten Male am jährlichen **Hochhauslauf** teil. Mathias Magdowski, der bereits zum achten Mal zum Hochhauslauf antrat, zeigte ein engagiertes Rennen und durchquerte die Ziellinie nach 75,5s. Damit rangiert er in der Hall of Fame nun auf Platz 20! Das vorbereitende Training zahlte sich für Christian Krause aus. Er erreichte bei seiner zweiten Teilnahme den zweiten Platz in seiner Altersgruppe. Die beiden Teilnehmer sind in Abbildung 2.3c zu sehen.

Außerdem hat die Student Branch in diesem Jahr mit einem eigenen Team beim **Drachenbootrennen** teilgenommen (siehe Abbildung 2.3b). Das Finale wurde leider knapp verpasst. Jedoch gelang es dem Team einen hervorragenden achten Platz zu erreichen. Die Student Branch konnte sich somit gegen die zwei anderen Teams der Fakultät durchsetzen.

Eine Teilnahme am **Firmenstaffellauf** ist der IEEE Student Branch trotz der kurzfristigen Verschiebung des Rennens ebenfalls gelungen (siehe Abbildung 2.3a). Es wurde ein hervorragender 19. Platz von 200 Teams in der Wertung Herren-Staffel erreicht.

#### Teilnahme an der IEEE Xtreme Programming Competition<sup>2</sup>

Auch in diesem Jahr hat die IEEE Student Branch der OvGU an der „IEEE Xtreme Programming Competition“ mit den zwei Teams „Hackerfall“ und „KlapsAufDenCode“ teilgenommen. Am 14. Oktober trafen sich dazu Christian Bednarz, Daniel Punzet, Christoph Lange, Andreas Mantzke und Felix Middelstädt in G09 (siehe Abbildung 2.4), um ab 2 Uhr morgens die 30 vom IEEE gestellten Programmieraufgaben innerhalb von 24 h zu lösen.

Aufgrund der Erfahrung aus den letzten Jahren konnten die hervorragenden Platzierungen 269 und 270 erreicht werden. Insgesamt haben 2128 Teams aus allen Regionen der Welt aktiv am Wettbewerb teilgenommen.

Damit sich die Programmierer voll auf die praxisorientierten Programmierprobleme konzentrieren konnten, haben sich Paul Konrad und Mathias Magdowski hervorragend um das ausgiebige Mettfrühstück und einen Topf Chili con Carne gekümmert. Wie auch in den Jahren zuvor wurde die üppige Verpflegung von der Student Branch gesponsert.

Im Großen und Ganzen hatten alle Teilnehmer in Magdeburg viel Spaß beim Lösen der Aufgaben und freuen sich schon auf das nächste Mal.

---

<sup>1</sup>von M. Sc. Felix Middelstädt

<sup>2</sup>von M. Sc. Felix Middelstädt



(a) Staffel der IEEE Student Branch



(b) Drachenboot der IEEE Student Branch



(c) Christian Krause und Mathias Magdowski vor der Teilnahme am Hochhauslauf

Abbildung 2.3: Sportliche Aktivitäten der IEEE Student Branch Magdeburg.



Abbildung 2.4: Die Teams „Hackerfall“ und „KlapsAufDenCode“ bei der IEEEExtreme Programming Competition

### Workshops<sup>3</sup>

Wie auch schon in den Jahren zuvor hat die Student Branch Magdeburg wieder Workshops, welche interessierten Studierenden nützliches Wissen zum wissenschaftlichen Arbeiten vermitteln, angeboten. Um allen Studierenden die Möglichkeit zu bieten an den Workshops teilzunehmen, gab es eine deutsch- und englischsprachige Workshopreihe mit folgenden Themen:

- LaTeX für Einsteiger
- Wie man ein gutes Protokoll schreibt
- Python als praktischer Helfer
- MATLAB-Crashkurs
- Effizientes Erstellen schöner Plots – keine Hexerei

Wie in Abbildung 2.5 zu sehen ist, war die Beteiligung der Studierenden groß.

### Technical Talks<sup>4</sup>

Am 06.07.2017 fand der erste Technical-Talk-Nachmittag der Student Branch Magdeburg statt. Anhand von drei Fachvorträgen gaben die Vortragenden Einblicke in das Arbeitsumfeld bzw. aktuelle Problemstellungen aus der Sicht eines Großunternehmens, eines mittelständischen Unternehmens und eines Forschungsdienstleisters.

Repräsentativ für ein Großunternehmen stellte Lorandt Fölkel von der Würth Elektronik ei-Sos GmbH & Co. KG das Thema „Energy Harvesting“ vor. Die verschiedenen Möglichkeiten der Energiegewinnung für energieautarke Anwendungen wurden vorgestellt und anhand von Demonstratoren anschaulich vorgeführt.

---

<sup>3</sup>von M. Sc. Felix Middelstädt

<sup>4</sup>von M. Sc. Felix Middelstädt



Abbildung 2.5: Impressionen aus der IEEE-Workshopreihe

Aus der Sicht eines mittelständischen Unternehmens stellte Fernando de Castro von der Dr. Ecklebe GmbH die Arbeitsweise eines Ingenieurs in einer Forschungs- und Entwicklungsabteilung vor.

Im dritten Vortrag wurde von Dr. Andre Naumann über aktuelle Projekte des Fraunhofer-Instituts referiert. Dabei waren effiziente Energieversorgung und Technologien zur Speicherung zentrale Themen.

Bei einem abschließenden Grill-Event hatten die Zuhörer Gelegenheit sich untereinander und mit den Vortragenden auszutauschen und den Abend mit erfrischenden Getränken und Grillgut ausklingen zu lassen.

Ein paar Eindrücke vom Event sind in Abbildung 2.6 gezeigt.



Abbildung 2.6: Impressionen vom Technical-Talk-Nachmittag

## Achte IEEE Student Conference 2018<sup>5</sup>

Nach einer erfolgreichen Ausrichtung der IEEE Student Conference 2016 in Magdeburg, hat die IEEE Student Branch Magdeburg auch 2018 die nationale Konferenz für Studenten der Elektro- und Informationstechnik sowie Informatik nach Magdeburg geholt.

<sup>5</sup>von M. Sc. Felix Middelstädt

Das zweitägige Event findet vom 25. bis 26. Oktober 2018 statt. Basierend auf den Erfahrungswerten von der Konferenz im letzten Jahr wird mit mehr als 30 Einreichungen zu aktuellen Forschungsthemen von angehenden IngenieurInnen und WissenschaftlerInnen gerechnet, während mehr als 70 Konferenzteilnehmer erwartet werden.

Firmen sind gerne eingeladen die Konferenz finanziell zu unterstützen. Nähere Informationen zu den Sponsoringangeboten können über [lars.middelstaedt@ovgu.de](mailto:lars.middelstaedt@ovgu.de) erhalten werden.

## 2.5.2 Kooperationen

### Gründung der VDE Hochschulgruppe Magdeburg<sup>6</sup>

Zu Beginn des Sommersemesters 2017 gründete sich an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg die Magdeburger Hochschulgruppe des Verbandes der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik. Neben einigen Mitarbeitern fanden vor allem Studierende den Weg in die Gruppe und tragen somit nach wie vor zu einem sehr angenehm gelebten Vereinsleben bei. Die Bandbreite der Hochschulgruppe reicht von Exkursionen und Vernetzung über Expertentalks bis hin zu geselligen Vereinsabenden und trägt somit einen nicht unerheblichen Teil zur Verbesserung der Ausbildung von angehenden Jungingenieuren (/innen) bei. Für die Zukunft ist es geplant, gemeinsam mit dem Lehrpersonal der Fakultät, dem Fachschaftsrat und der IEEE Studentbranch weitere Exkursionen auf die Beine zu stellen. Ehemalige Studierende und wissenschaftlich Beschäftigte werden für einen Nachmittag zurück an die OvGU kommen und über ihren aktuellen Job berichten. Zur Umsetzung dieser Vorhaben sind sowohl Mitstreiter, als auch Ideen sehr gerne gesehen.

### German-Russian Institute of Advanced Technologies (GRIAT)<sup>7</sup>

Im September 2014 eröffnete in Kasan, der Hauptstadt der russischen autonomen Republik Tatarstan, das „German-Russian Institute of Advanced Technologies“ (GRIAT). Das Projekt GRIAT wird vom Deutschen Akademischen Austauschdienst und der Republik Tatarstan gefördert. Ziel ist es, Ingenieurstudiengänge nach deutschem Standard an der staatlichen technischen Universität Kasan (KNRTU-KAI) zu etablieren. Die TU Ilmenau als Leiter des Vorhabens profiliert dazu gemeinsam mit der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg ingenieurtechnische Studiengänge für den Export an die KNRTU-KAI. Die nach dem russischen Flugzeugbauer Andrej Nikolajewitsch Tupolew auch als „Tupolew-Universität“ bekannte KNTRU-KAI zählt zu den renommiertesten Forschungsuniversitäten ganz Russlands und gilt als Elite-Universität. Am ihr angegliederten GRIAT werden von den Universitäten in Ilmenau und Magdeburg folgende Master-Studienprogramme angeboten:

- Electrical Engineering and Information Technology
- Chemical and Energy Engineering
- Systems Engineering and Engineering Cybernetics
- Research in Computer and Systems Engineering
- Communications and Signal Processing
- Automotive Engineering

---

<sup>6</sup>von M. Sc. Marc Gebhardt

<sup>7</sup>von M. Sc. André Richter

Die Partnerschaft geht jedoch über die reine Lehre hinaus. Deutsche und russische Wissenschaftler und Studenten sollen gemeinsame Forschungsthemen bearbeiten. Die Voraussetzungen im fast 3000 Kilometer entfernten Kasan könnten dafür kaum besser sein: Eigens für GRIAT baute die Tupolev-Universität ein Gebäude für Forschung und Lehre mit 20 000 Quadratmetern Nutzfläche. Langfristig soll das Projekt in eine deutsch-russische Universität münden.

**Doppeldiplomprogramm mit der Technischen Universität Wrocław – Verteidigung und feierliche Zeugnisübergabe<sup>8</sup>**

Das bereits seit vielen Jahren laufende Doppeldiplomprogramm zwischen der Technischen Universität Wrocław und der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg bietet Studenten die Möglichkeit an beiden Universitäten Lehrveranstaltungen zu belegen und ihre Masterarbeit an der jeweiligen Partneruniversität zu verfassen. Der Abschluss, das sogenannte Doppeldiplom, wird von beiden Universitäten anerkannt. Der aktuelle Jahrgang umfasst zwei Studenten, die ein Jahr an der OvGU studierten und ihren Masterabschluss im Rahmen eines Prüfungskolloquiums am LENA erfolgreich verteidigten (siehe Tabelle 2.1).

Tabelle 2.1: Doppeldiplomstudenten am LENA im Jahr 2017

Name	Titel der Masterarbeit
Maciej Sobczak	Analysis of the gas sector as an option for sector coupling in the electric power system/ Combined Heat and Power plants with operation of non-standard gas fuels
Maciej Gradoń	Development of a balance of plant concept and operation strategies for bidirectional fuel cell/ Analysis of bipolar plates for the construction of a unitized regenerative fuel cell

Traditionell erfolgte die feierliche Übergabe der Zeugnisse im Rahmen der Inauguration an der Technischen Universität Wrocław. In diesem Rahmen ehrte zudem in diesem Jahr der Dekan der Fakultät für Elektrotechnik der TU Breslau – Herr Prof. Rebizant – Herrn Prof. Lindemann mit der Verdienstmedaille der Fakultät, vgl. Abbildung 2.7.

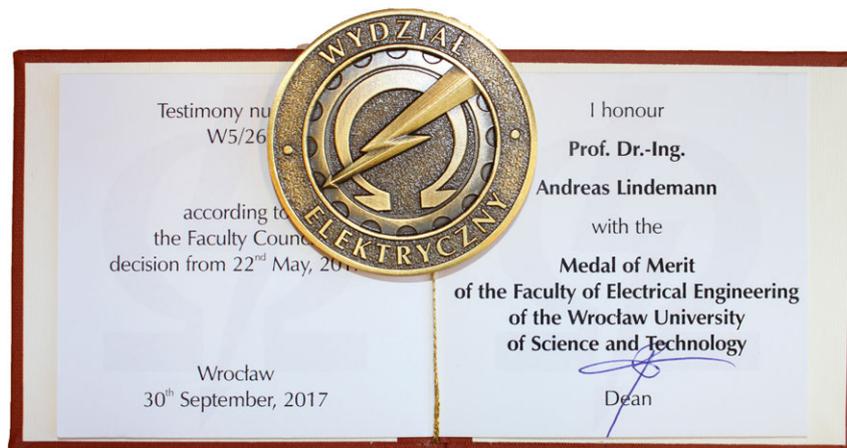


Abbildung 2.7: Verdienstmedaille der Fakultät für Elektrotechnik der TU Breslau

<sup>8</sup> von Dr.-Ing. Maik Heuer

### 2.5.3 Exkursionen

#### Exkursionen ins Umspannwerk Wolmirstedt<sup>9</sup>

Am 26.01.2017 und 27.06.2017 fanden die vom Lehrstuhl für Elektrische Netze und Erneuerbare Energie ausgerichteten Exkursionen ins nahegelegene Umspannwerk der 50 Hertz Transmission GmbH nach Wolmirstedt statt. Die Exkursion wurde in Kooperation mit der VDE Hochschulgruppe Magdeburg durchgeführt. Eine gemischte Gruppe von Studierenden unterschiedlicher Studiengänge der Fachrichtung Elektrotechnik machte sich unter Leitung der wissenschaftlichen Mitarbeiter Eric Glende und Marc Gebhardt auf den Weg und stellte schon während der Busfahrt fest, dass die Dichte der Übertragungsleitungen zunahm, je näher man dem Umspannwerk kam.

Nach einer kurzen Vorstellung des Unternehmens ging es in Gruppen auf das Gelände, wobei hier sowohl das Schaltfeld als auch die Transformatoren besichtigt werden konnten. Ein besonderer Anlaufpunkt war die alte Leitwarte des Regionalzentrums West, wo die jeweiligen Felder noch händisch geschaltet wurden.

Neben den technischen und physikalischen Eigenschaften der Betriebselemente konnte vor allem ein Eindruck über die Dimensionen solcher Anlagen gewonnen werden. Ein herzlicher Dank gilt dem Personal des Regionalzentrum West, insbesondere Herrn Berger und Herrn Mötzing, die uns trotz des laufenden Betriebs einen Einblick in die Anlagen ermöglicht haben.



Abbildung 2.8: Gruppenbild auf dem Gelände des Umspannwerkes.

#### Wenn Leistung nichts mit Strom und Spannung zu tun hat<sup>10</sup>

Neben der bekannten elektrischen Größe Leistung, ist es für den gesunden Geist im gesunden Körper auch von Zeit zu Zeit nötig, physisch an seine Grenzen zu gehen. Im Sommer 2017 wurde dies von einer Vielzahl an Kollegen durch mehrere Aktivitäten vollzogen. Der Bezug zu den elektrotechnischen Größen wurde durch die erhöhte (An-)Spannung vor dem Firmenstaffellauf und dem Paddeln gegen den Strom im Drachenboot natürlich beibehalten.

Für das LENA-Team traten beim Firmenstaffellauf M. Sc. Eric Glende, B.Eng. Sebastian Helm, B. Sc. Mykola Ivanchykov und M. Sc. Marc Gebhardt an. Es konnte stolz vermeldet werden, dass

<sup>9</sup>von M. Sc. Marc Gebhardt

<sup>10</sup>von M. Sc. Marc Gebhardt

trotz der unweatherbedingten Verschiebung das LENA-Team im wahrsten Sinne des Wortes lauffähig war. Im Rahmen der von der OvGU angebotenen Unterstützung durch Rahmenprogramm und Garderobe hat sich die Läufergruppe hervorragend geschlagen und sucht schon jetzt für das kommende Jahr weitere „Mitläufer“. Besonders ein weibliches Team wäre das Ziel für den Zieleinlauf in 2018.

Ebenso war es natürlich eine Aufforderung, wenn der Rektor ein Drachenbootrennen um den Pokal des Rektors ausruft, zu der sich das LENA-Team nicht zwei mal bitten lässt. Nach zwei Trainingseinheiten und reichlich Trockenübungen startete das Team „LENA voller ELAN“ wie der Blitz und fuhr direkt im ersten Rennen Bestzeit. Es zeigte sich somit, dass sich zum Einen das Training gelohnt hat und zum Anderen, dass der Teamgeist auch außerhalb des Büros stark ausgeprägt ist. Auch in den weiteren Läufen fuhr das LENA-Boot zielsicher voraus und bescherte somit dem ganzen Team und Zuschauern eine gelungene Veranstaltung, die sicherlich im nächsten Jahr gemäß der Tradition fortgesetzt wird. Am Ende stand ein neunter Platz als Resultat auf der Urkunde, die somit für das nächste Jahr motiviert.



(a) Gruppenfoto des Firmenstaffellaufs



(b) Gruppenfoto des Drachenbootrennens

Abbildung 2.9: Sportliche Aktivitäten vom Team „LENA voller ELAN“

### Exkursion zu ENERCON<sup>11</sup>

Im Rahmen einer Werksführung konnten sich Studentinnen und Studenten der FEIT am 13.07.2017 Einblicke in die Produktion von Windkraftanlagen verschaffen. Dafür ermöglichte Enercon für ein paar Stunden ein Blick hinter die Kulissen des Standortes Magdeburg. Die Anreise erfolgt mit öffentlichen Verkehrsmitteln.

Nach einer freundlichen Begrüßung, ein paar Worten zum Unternehmen und einer kompakten Einweisung in die Sicherheitsvorschriften ging es, mit Warnfesten ausgestattet, in die Produktionshalle des größten deutschen Herstellers von Windenergieanlagen. In der zweistündigen Führung wurden die einzelnen Produktionsprozesse, die eine Windenergieanlage durchlaufen muss, anschaulich und ausführlich erklärt. Ebenso wurden auf die vielen aufkommenden Fragen der Gruppen sehr detailliert und fachkundig eingegangen. Neben den technischen und physikalischen Eigenschaften konnte vor allem ein Eindruck über die Dimensionen solcher Windenergieanlagen und ihrer einzelnen Komponenten gewonnen werden. Ein herzliches Dankeschön für diese Führung gilt hierbei Frau Garloff, stellvertretend für Enercon, die es uns ermöglicht hat trotz des laufenden Betriebs einen Einblick in den Produktionsablauf zu bekommen.

<sup>11</sup> von M. Sc. Nicola Gast



Abbildung 2.10: Teilnehmer der Exkursion ins Enercon Werk Magdeburg.

### Forschergruppe besucht die Physikalisch-Technische Bundesanstalt in Berlin<sup>12</sup>

Die wissenschaftlichen Mitarbeiter des Lehrstuhls für Elektromagnetische Verträglichkeit besuchten am 07. Februar die Außenstelle der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Berlin Charlottenburg. Nach einem kurzen Überblick über die Standorte, Abteilungen und die Geschichte der PTB sowie einer detaillierten Einführung in die Abteilung 8 (Medizinphysik und metrologische Informationstechnik) gab es die Möglichkeit einer Laborbesichtigung der folgenden Labore:

- Mathematische Modellierung und Datenanalyse (Modellierung und Simulation mit Unsicherheiten)
- Medizinisch-optische Bildgebung (Fluoreszenzbildgebung)
- Medizinische Magnetresonanz (MR-Tomographie)

Der Lehrstuhl bedankt sich herzlich für die Einladung und die damit gebotene Möglichkeit des wissenschaftlichen Austauschs und freut sich schon auf einen weiteren Besuch des Hauptsitzes der PTB in Braunschweig.

### 2.5.4 Studienwerbung

#### Elektrotechnik-Experimente für die Kleinen<sup>13</sup>

Was leitet Strom? Kann man mit einer Zitrone eine kleine Lampe zum Leuchten bringen? Wie kann man Morse-Signale übertragen? Diesen und ähnlichen Fragen gingen die zweiten Klassen der Grundschule „Am Vogelgesang“ nach. Sie besuchten uns am Freitag, den 13.01., 20.01., 27.01.

<sup>12</sup> von Dr.-Ing. Mathias Magdowski

<sup>13</sup> von Dr.-Ing. Mathias Magdowski und Dr.-Ing. Thomas Schallschmidt



Abbildung 2.11: Teilnehmer der Exkursion zur Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Berlin (Foto: Anke Fröbel)

und 16.02. zu einem „Tag der offenen Labortür für Grundschul Kinder“ in der Experimentellen Fabrik.

Betreut und angeleitet wurden die Kinder von Mitarbeitern des Lehrstuhls für elektromagnetische Verträglichkeit, vom Lehrstuhl für elektrische Antriebssysteme und vom Forschungscampus STIMULATE sowie von Studenten des Fachschaftsrats der Fakultät für Elektro- und Informationstechnik.

Die Idee der Aktion ist, Berührungspunkte mit der Elektrotechnik abzubauen, Interesse für Naturwissenschaften und Technik zu wecken, und die Kinder spielerisch zum Nachdenken über grundlegende technische Zusammenhänge anzuregen.

Dazu können und sollen die Kinder in kleinen Gruppen ganz viel selbst ausprobieren, z. B. wie Funksignale übertragen werden (siehe Abbildung 2.12), warum sich manche ferngesteuerte Autos gegenseitig stören oder welche Teile man braucht, um eine kurze Melodie elektronisch abzuspielen. Sehr spannend ist auch ein Memory-Spiel mit Bilderpaaren von Früchten, wie man sie selten sieht. Dabei sind übliche Früchte wie Apfel, Banane oder Kiwi jeweils als Foto von außen und als Röntgen- oder MRT-Bild von innen dargestellt. So erfahren die Kinder auch ganz nebenbei etwas über die Medizintechnik und die medizinische Bildgebung.

Weiterhin fanden ähnliche Aktionen mit Kindern der folgenden Einrichtungen statt:

- Integrative Kindertagesstätte Weitlingstraße am Freitag, den 31. März 2017
- Gruppe der Ferienuni am Dienstag, den 27. Juni 2017
- Gruppe der Ferienuni am Dienstag, den 04. Juli 2017
- Kindertagesstätte des Universitätsklinikums am Freitag, den 07. Juli 2017
- Freie Schule Magdeburg am Mittwoch, den 22. November 2017



Abbildung 2.12: Grundschulkindern der zweiten Klassen der Grundschule „Am Vogelgesang“ probieren mit Morsegeräten aus, wie sich Informationen drahtlos übertragen lassen (Foto: Peer Niehof).

### Zukunftstag verbindet Spielzeug und Elektrotechnik<sup>14</sup>

Der Zukunftstag, der in diesem Jahr am Donnerstag, den 27. April stattfand, erfreut sich seit Jahren großer Beliebtheit bei Schülern und Schülerinnen der Klassenstufen 6 bis 10. Auch in diesem Jahr waren alle 50 Plätze der Elektrotechnik weit im Voraus ausgebucht. An diesem Tag sollen vor allem jüngere Schulkinder für technische Berufe und mögliche Studiengänge begeistert werden.

Der Lehrstuhl für elektrische Antriebssysteme bot zwei Workshops zu den Themen

- Da dreht sich was! – Bau deinen eigenen Motor
- Warum fällt es nicht um? – Stabilisierung eines inversen Pendels

an.

Der Frage

- Was steckt dahinter? – Automatische Sprachverarbeitung

konnte man in einer Aktion des Lehrstuhl für Kognitive Systeme nachgehen.

Vom Forschungscampus STIMULATE wurde zusammen mit dem Lehrstuhl für Elektromagnetische Verträglichkeit eine Experimentierreihe „Hightech für die Medizin“ angeboten. In den einzelnen Stationen

- Mit Röntgen 3-dimensional in den Körper schauen
- Mit dem Magnetresonanztomograf 3-dimensional in den Körper schauen
- Leben Retten mit dem Rettungswagen der Zukunft
- Mit wie vielen funkferngesteuerten Autos kann man gleichzeitig fahren?
- Warum darf man im Flugzeug kein Handy benutzen?

lernten die Schüler interessante Details über Medizintechnik und Elektromagnetische Verträglichkeit und konnten auch selbst kleine Experimente durchführen (siehe Abbildung 2.13).

<sup>14</sup> von Dr.-Ing. Mathias Magdowski



Abbildung 2.13: Beim Zukunftstag konnten Schülerinnen und Schüler Funkwellen von ferngesteuerten Spielzeugautos messen und so etwas über elektromagnetische Störungen erfahren (Foto: Harald Krieg).

### **Vorstellung des Freileitungsversuchs zum CampusDay 2017<sup>15</sup>**

Bei sonnigem Wetter startete der Studieninformationstag am Samstag, den 20.05.2017, pünktlich um 13 Uhr und lockte von Beginn an zahlreiche Interessenten an. Vertreter des Lehrstuhls für Elektrische Netze und Erneuerbare Energie (LENA) demonstrierten mit dem Freileitungsversuch ein Teilgebiet der Forschung des Lehrstuhls und informierten somit auf dem Campus Interessierte über die elektrischen und magnetischen Feldstärken einer Freileitung. Verglichen wurden die gemessenen Werte mit der Abstrahlung einer Schlagbohrmaschine. Der Versuch zeigte eindrucksvoll, dass die Felder der Leitung durch die drei zueinander phasenverschobenen Leiterseile sich nahezu auslöschen. Das Feld der Bohrmaschine war stärker.

Viele interessierte Zuschauer fanden sich in regelmäßigen Abständen zu den Vorführungen oder auch zum Smalltalk über das Studieren an der OVGU ein. Zur „Langen Nacht der Wissenschaft“ setzte das Programm fort und lockte auch wieder zahlreiche Zuschauer zum Freileitungsversuch.

### **MINT-Aktionstag für die 10. Klassen des Ökumenischen Domgymnasiums<sup>16</sup>**

Das die Medizin-, Elektro- und Informationstechnik viele spannende Themenfelder zu bieten hat, konnten die 10. Klassen des Ökumenischen Domgymnasiums Magdeburg beim MINT-Aktionstag am 23. August in der experimentellen Fabrik erfahren. Die etwa 115 Schülerinnen und Schüler experimentierten, programmierten und bastelten an 20 Mitmach-Stationen, die von MitarbeiterInnen und Studierenden der Fakultät für Elektro- und Informationstechnik, des Forschungscampus STIMULATE sowie vom Fachschaftsrat Elektrotechnik betreut wurden.

---

<sup>15</sup> von M. Sc. Marc Gebhardt

<sup>16</sup> von Dr.-Ing. Mathias Magdowski



Abbildung 2.14: Freileitungsversuch des Lehrstuhls für Elektrische Netze und Erneuerbare Energie.

Zu den Angeboten gehörten:

- Magnetresonanztomografie:** Es wurde erklärt, wie man mit der Magnetresonanztomografie dreidimensional in den menschlichen Körper schauen und z. B. bestimmte Krankheiten erkennen oder eine Operation vorbereiten kann.
- 3D-Drucker:** Wir zeigten, wie sich mit einem 3D-Drucker Prototypen und Kleinserien von Kunststoffteilen schnell und einfach herstellen lassen.
- Angiografie:** Es wurde demonstriert, wie man mit der Angiografie Blutgefäße oder den Blutfluss im menschlichen Körper aufnehmen und sich dann dreidimensional anschauen kann.
- Ferngesteuerte Autos:** Am Beispiel von funkferngesteuerten Autos konnten die SchülerInnen ausprobieren, wie eine Funkübertragung funktioniert, wie sich die Signale der Fernbedienungen gegenseitig stören können und wo solche Probleme sonst noch in der Elektrotechnik auftreten.
- Warum hört man das Handy im Radio?:** An dieser Station wurde erklärt, was sich hinter elektromagnetischer Verträglichkeit verbirgt, warum man das Handy manchmal im Radio hört und warum man es im Flugzeug nicht benutzen darf.
- Gestensteuerung:** In einer sterilen medizinischen Umgebung darf ein Arzt keine Maus und Tastatur berühren. Die SchülerInnen konnten probieren, wie man mit Hilfe von Gestensteuerung trotzdem einen Computer bedienen kann.

## 2 Studium und Lehre

- Wasserraketen:** Die SchülerInnen versuchten, eine druckluft- und wassergetriebene Rakete so zu konstruieren, dass diese möglichst gerade und möglichst hoch fliegt.
- Audiosynthesizer:** Jeden Tag sprechen wir Tausende von Wörtern und können uns so mit unserer Umgebung verständigen. Wir zeigten, wie es einem Computer oder Smartphone gelingt, uns zu verstehen und wie die akustischen Informationen aus Sprache in Signale übersetzt, die ein technisches System verarbeiten und verstehen kann.
- LED-Würfel:** Wie experimentieren mit einem dreidimensionalen Würfel aus 512 LEDs, welche einzeln in verschiedenen Farben per Notebook angesteuert werden können.
- Elektrobaukästen:** Auf einem Steckbrett konnten die SchülerInnen eine einfache Schaltung zusammenbauen, die z. B. eine Melodie spielt oder einen kleinen elektrischen Antrieb in Bewegung setzt.
- LEGO-Roboter:** Die SchülerInnen programmierten LEGO-Roboter mit Hilfe einer grafischen Programmierumgebung per Tablet-PC (siehe Abbildung 2.15). Die Roboter konnten dann z. B. auf dem Boden fahren, selbstständig Hindernisse erkennen und diesen ausweichen.
- Makey Makey:** Der Makey Makey wird an einem Computer oder Laptop angeschlossen und ermöglicht dessen Steuerung über alltägliche Gegenstände wie Obst, Knetmasse oder Menschen. Wir bauten mit den SchülerInnen damit ein menschliches Piano.
- Calliope Mini:** Der Calliope Mini ist ein einfach zu programmierendes Mikrocontroller mit zahlreichen Ein- und Ausgängen. Die SchülerInnen programmierten damit eine kleine Lampe, dessen Farbe man mittels Knopfdruck durch additive Farbmischung steuern kann.

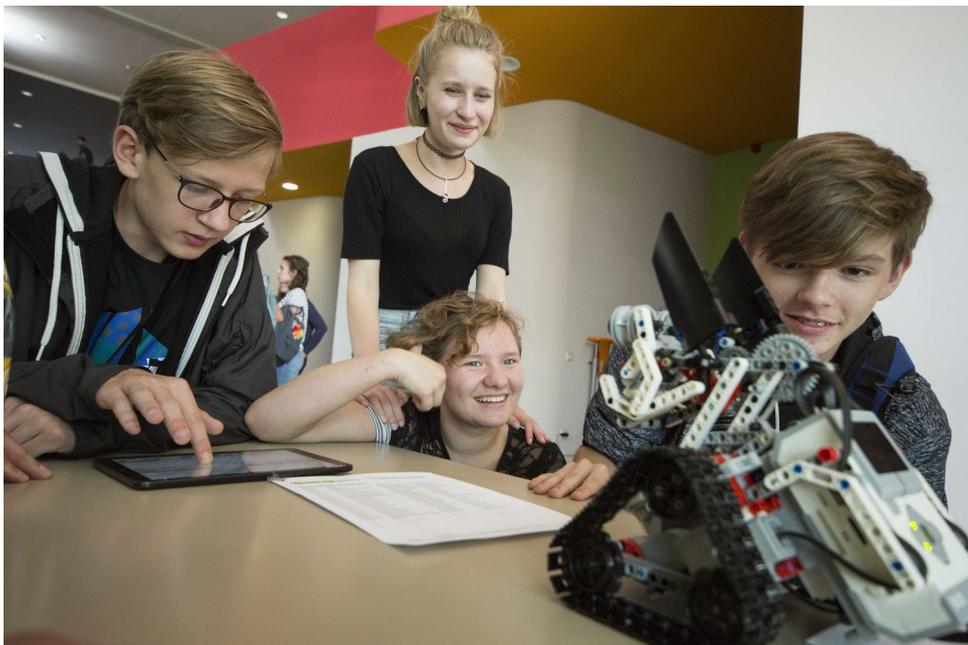


Abbildung 2.15: Schülerinnen und Schüler des Ökumenischen Domgymnasiums programmieren einen LEGO-Roboter mit Hilfe einer grafischen Programmierumgebung per Tablet-PC (Foto: Harald Krieg).

### MINT-Projekttag mit Schülern des Norbertusgymnasiums<sup>17</sup>

Vom 11. bis 13. September besuchten 17 Schülerinnen und Schüler der Klassenstufen 8 bis 12 die Fakultät für Elektro- und Informationstechnik für drei aktionsreiche MINT-Projektvormittage. Eingeladen hatten dazu die Lehrstühle für elektrische Antriebssysteme und elektromagnetische Verträglichkeit sowie der Forschungscampus STIMULATE.

Am Montag drehte sich alles um Bewegung und Regelung. Die Schüler bauten aus zwei Magneten, Kupferdraht, einem Korken, einem Nagel und einer Batterie selbst einen kleinen Elektromotor. Bei der Regelung eines inversen Pendels konnte ausprobiert werden, warum z. B. ein Segway nicht umkippt.

Das Projekt am Dienstag Fabrik drehte sich in der experimentellen um die Medizintechnik und die Programmierung. Im Angiografie-Labor wurde gezeigt, wie man mit Hilfe von Röntgenstrahlen ins Innere des menschlichen Körpers schauen und z. B. die Blutgefäße sichtbar machen kann. Auch die Absorberhalle öffnete ihre Tore. Hier konnten die Schüler ausprobieren, wie sich ferngesteuerte Autos durch ihre Funkwellen gegenseitig stören und wie man solche elektromagnetischen Welle messen kann (siehe Abbildung 2.16). Außerdem bauten die Schüler ein elektronisches Klavier, das durch die Berührung von Bananen gespielt werden konnte.

Am Mittwoch ging es dann in das Lernlabor „SchüLaTech“ des Lehrstuhls für Technische Bildung der Fakultät für Humanwissenschaften, in dem die Schüler z. B. im „Battle of Lights“ die Unterschiede zwischen LEDs und Glühlampen ausprobieren konnten.

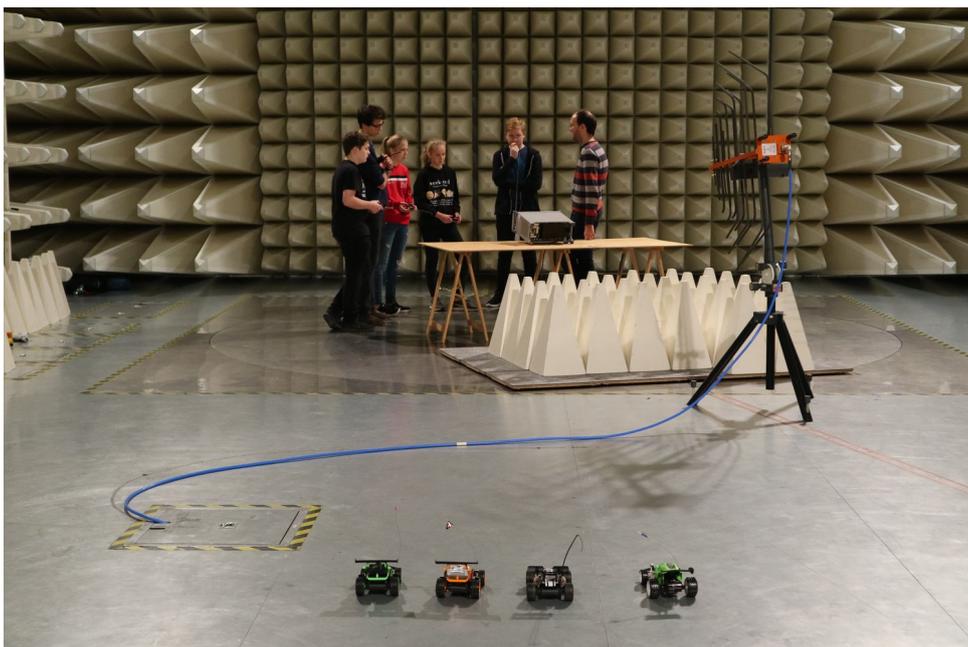


Abbildung 2.16: Schülerinnen und Schüler des Norbertusgymnasiums experimentieren in der Absorberhalle des Lehrstuhls für elektromagnetische Verträglichkeit mit Funkwellen (Foto: Marcus Prier).

### Jugend Aktiv Mitteldeutschland zu Gast in der experimentellen Fabrik<sup>18</sup>

Der Verein JUGEND AKTIV Mitteldeutschland fördert Jugendliche aus Sachsen-Anhalt, Sachsen und Thüringen, die eine besondere Begabung aufweisen und unterstützt diese vom Abiturjahrgang

<sup>17</sup> von Dr.-Ing. Mathias Magdowski

<sup>18</sup> von Dr.-Ing. Mathias Magdowski

bis zum Ende des Studiums bei der Persönlichkeitsentwicklung. Im Rahmen einer Seminarwoche besuchte der Verein am Donnerstag, den 12. Oktober, den Forschungscampus STIMULATE und die Absorberhalle des Lehrstuhls für elektromagnetische Verträglichkeit in der experimentellen Fabrik.

Geboten wurden den 35 SchülerInnen des Vereins und weiteren acht SchülerInnen der Herbst-Uni ein reichhaltiges Programm mit verschiedenen Stationen aus der Medizin- und Elektrotechnik. In diesen Stationen konnten die SchülerInnen in kleinen Gruppen von fünf bis sechs Leuten selbst aktiv werden und viele Dinge individuell ausprobieren. Dazu zählten:

- Wie funktioniert die Magnetresonanztomografie?
- Was steckt im Krankenwagen der Zukunft?
- Mit wie vielen funkferngesteuerten Autos kann man gleichzeitig fahren?
- Wie funktioniert eine Gestensteuerung?
- Wie wird der Minicomputer Calliope programmiert?
- Wie druckt ein 3D-Drucker (siehe Abbildung 2.17)?
- Wie kann man Dinge dreidimensional mit einem LED-Würfel darstellen?
- Wie erzeugt eine Brennstoffzelle Strom aus Wasserstoff?

Die ausgewählten Stationen fanden besten Anklang bei der TeilnehmerInnen, die bedauerten, dass die Zeit so eng bemessen war und den Besuch gern im nächsten Jahr wiederholen möchten.



Abbildung 2.17: Schülerinnen und Schüler des Vereins JUGEND AKTIV Mitteldeutschland schauen einem 3D-Drucker bei der Arbeit zu (Foto: Harald Krieg).

### **Erfolg bei Hörsaal-Slam der Ingenieure ohne Grenzen<sup>19</sup>**

Science-Slams sind eine umwerfende Möglichkeit, einem fachfremden Publikum das eigene Forschungsthema näherzubringen. Dabei hat jeder der teilnehmenden Slammer typischerweise etwa sechs bis acht Minuten Zeit, sein wissenschaftliches Interessengebiet möglichst anschaulich, greifbar, lebensnah und auch etwas witzig zu erklären. Ein solcher Science-Slam fand am Donnerstag,

---

<sup>19</sup> von Dr.-Ing. Mathias Magdowski

den 26. Oktober, im Rahmen eines „Hörsaal-Slams“ an der Otto-von-Guericke-Universität statt (siehe Abbildung 2.18). Organisiert wurde die Veranstaltung von den *Ingenieuren ohne Grenzen* und dem *Fachschaftsrat der Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik*.

Neben Prof. Sebastian Eichfelder (Betriebswirtschaftslehre), Prof. Jens Hessmann (Gebärdensprachen-Dolmetscher) und Rick Hollinski (Informatik) nahm auch Mathias Magdowski vom Lehrstuhl für Elektromagnetische Verträglichkeit teil und konnte den Science-Slam am Ende knapp für sich entscheiden. Das Thema seines Slams lautete: „Mobilfunkmasten-Karneval – Strahlend schöne Verkleidungen“. Die Wertung wurde wie üblich mittels „Applausometer“ durch das Publikum vorgenommen.



Abbildung 2.18: Ein gut gefüllter Hörsaal beim Science-Slam der Ingenieure ohne Grenzen (Foto: Ole Freier)

### 2.5.5 Preise

#### VDE-Preis für die Masterarbeit von Herrn Marc Gebhardt<sup>20</sup>

Im Rahmen der Mitgliederversammlung der VDE Bezirksgruppe Magdeburg wurde M. Sc. Marc Gebhardt mit dem Preis für hervorragende Abschlussarbeiten geehrt (siehe Abbildung 2.19). Die eingereichte Arbeit „Entwicklung und Validierung eines Softwaremodells für Phasenschiebertransformatoren in MATLAB“ wurde im Rahmen der Veranstaltung kurz vorgestellt und in gemütlicher Runde danach mit einigen Interessenten diskutiert. Durch die mit Experimenten und historischen Abhandlungen Otto von Guericke's ausgestattete Lukasklausur wurde ein gebührender Rahmen geboten.

Der VDE Magdeburg bekräftigte damit ein weiteres Mal die enge Kooperation zwischen der hiesigen Hochschule, dem „Lehrstuhl für Elektrische Netze und Erneuerbare Energie“ und dem Verband.

<sup>20</sup>von Prof. Dr.-Ing. habil. Martin Wolter



Abbildung 2.19: Überreichung des VDE-Preises durch Herrn Lutz Simmang (Vorsitzender des VDE Bezirksverbandes Magdeburg) und Dr.-Ing. Thomas Schallschmidt (stellv. Vorsitzender VDE BV Magdeburg) an M. Sc. Marc Gebhardt im Rahmen der Mitgliederversammlung in der Lukasklause Magdeburg

### **VDI-Förderpreis für die Masterarbeit von Herrn Carsten Kempik<sup>21</sup>**

Der Lehrstuhl für Leistungselektronik freut sich über die Auszeichnung von Herrn Carsten Kempik mit dem VDI-Förderpreis (siehe Abbildung 2.20) für seine Masterarbeit „Sekundärseitige Regelverfahren für kontaktlose Übertragungssysteme mit Konstantstromausgang“, die Herr Kempik im Vorjahr am Lehrstuhl in Zusammenarbeit mit dem Institut für Automation und Kommunikation e. V. (ifak) abgeschlossen hatte. Die kontaktlose Energieübertragung auf Basis einer induktiven Kopplung ist in jüngster Zeit Gegenstand einer Vielzahl von Forschungsaktivitäten. Dabei stehen häufig Systeme zum induktiven Laden von Elektrofahrzeugen im Mittelpunkt der Betrachtung. Insbesondere die Möglichkeit der Realisierung von Stromausgängen für die direkte Aufladung von Energiespeichern eröffnet hier neue Perspektiven, auch außerhalb der Elektromobilität.

Im Rahmen seiner Arbeit hat Herr Kempik ein Verfahren zur kontinuierlichen, sekundärseitigen Regelung kontaktloser Übertragungssysteme mit Stromausgang entwickelt und experimentell verifiziert. Es konnte gezeigt werden, dass eine Optimierung der Reglerparametrierung eine Reduktion der erforderlichen Komponenten und Speicherelemente ermöglicht und das EMV-Verhalten verbessert. Dazu wurden, ausgehend von einer systemtheoretischen Betrachtung, Einstellvorschriften und Nebenbedingungen für verschiedene Resonanztopologien hergeleitet, die eine einfache applikationsspezifische Optimierung ermöglichen, und in einem Laboraufbau digital umgesetzt.

<sup>21</sup> von Prof. Dr.-Ing. Andreas Lindemann, M. Sc. Carsten Kempik



Abbildung 2.20: Überreichung des VDI-Förderpreises durch Herrn Dr. Mathias Ihlow (Vorsitzender des VDI Magdeburger BV) an Herrn Carsten Kempniak im Rahmen des 9. VDI-Forum Wirtschaft und Wissenschaft, welches vom VDI-Landesverband Sachsen-Anhalt in Magdeburg in den Lichthöfen der regio.com GmbH am 15. Juni 2017 veranstaltet wurde (Foto: Viktoria Kühne)



## 3 Forschung

### 3.1 Lehrstuhl für Elektrische Antriebssysteme

#### 3.1.1 Forschungsprofil

##### Inhalte

Gegenstand der Forschung im Lehrstuhl für Elektrische Antriebssysteme sind neben der elektrischen Maschine auch die Regelung und das leistungselektronische Stellglied sowie die Interaktion der Komponenten im Gesamtsystem.

Neben der Entwicklung neuer und der Weiterentwicklung von bestehenden Konzepten für die Optimierung solcher Systeme, werden auch neue bisher nicht genutzte Anwendungsfelder für elektrische Maschinen erschlossen. Hierfür steht die Vereinfachung der Konstruktion des elektrischen und des mechanischen Systems durch einen angepassten und erweiterten Einsatz der Regelung sowie der Leistungselektronik besonders im Mittelpunkt der Betrachtungen. Ziel ist es, insbesondere die Produktionskosten und den Betriebsaufwand eines elektrischen Antriebssystems zu reduzieren und gegebenenfalls bestehende konventionelle Systeme zu ersetzen.

##### Schwerpunkte

**Magnetisch gelagerte Systeme für universelle Anwendungen** Aktiv magnetisch gelagerte Systeme besitzen ein breites Anwendungsspektrum, was auf die bekannten Vorteile, wie Berührunglosigkeit, Verschleißfreiheit und die über die Regelung beeinflussbare Dämpfung und Steifigkeit, zurückzuführen ist. Dem gegenüber steht ein erhöhter Hardware- und Kostenaufwand, bezogen auf Sensorik, Aktorik, Leistungselektronik und Reglerkomponenten. Am Beispiel eines in 5 Freiheitsgraden magnetisch gelagerten Werkzeugmaschinenrundtisches, der in Abbildung 3.1 dargestellt ist, werden verschiedene technische Fragestellungen experimentell untersucht.

Neben einer Erprobung von zentralen und dezentralen Regelungen zur Positionierung des Schwebekörpers werden auch Konzepte für die Kompensation der Nichtlinearität im gesamten Arbeitsbereich analysiert. Dabei bezieht sich die Nichtlinearität auf die Luftspaltabhängigkeit der Induktivität und dem quadratischen Zusammenhang zwischen Magnetkraft und Strom.

Weiterhin werden aufgrund der technischen Realisierung dieser Lagerung, Möglichkeiten der aktiven Schwingungsdämpfung untersucht. Durch Erweiterungen der bestehenden Regelalgorithmen kann eine Dämpfung interner und externer Schwingungen erreicht werden, wodurch dieses Lagerprinzip auch zur Schwingungsisolation eingesetzt werden kann.

Ziel ist es, den höheren gerätetechnischen Aufwand zu verringern, eine höhere Verfügbarkeit und Robustheit sowie universellere Anwendungsmöglichkeiten gegenüber der konventionellen Technik zu erreichen.

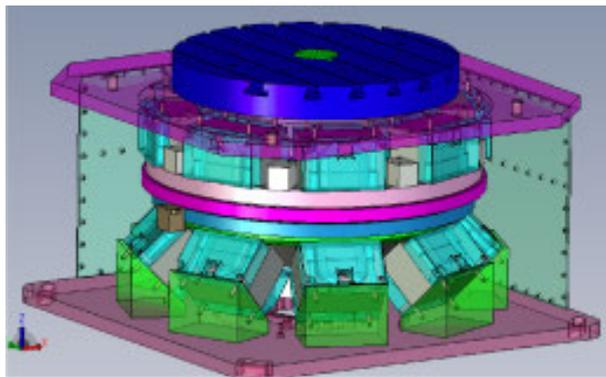


Abbildung 3.1: Magnetisch gelagerter Rundtisch

**Gegenseitig ergänzende Auslegung der elektrischen Maschine und der Regelung** Die Regelung elektrischer Maschinen basiert fast immer auf der zur regelnden Maschine. Bei der Auslegung der elektrischen Maschinen hingegen, wird meistens der Regler nicht betrachtet. Berücksichtigt man die Möglichkeiten der Regelung schon bei der Maschinenauslegung, wie in Abbildung 3.2 gezeigt ist, so kann z. B. eine höhere Leistungsdichte bei gleichzeitig niedrigerem Produktionsaufwand realisiert werden. Daher werden neue Auslegungskriterien und Auslegungsmethoden der Maschine im Zusammenhang mit der Regelung untersucht. Auslegungsziele wie Leistungsdichte, Wirkungsgrad, Zuverlässigkeit und Produktionsaufwand werden hierbei in Betracht gezogen.

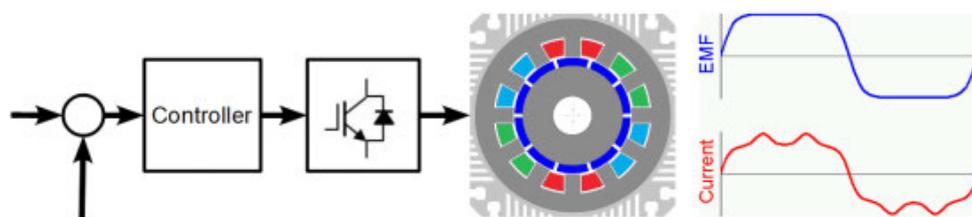


Abbildung 3.2: Regelung von Maschinen nicht sinusförmiger elektromotorischer Kraft

**Elektrische Antriebssysteme mit optimaler Integration in der Arbeitsmaschine** In elektrischen Antriebssystemen wird in der Regel die elektrische Maschine mit der Arbeitsmaschine mit Hilfe eines mechanischen Übertragungssystems verbunden. Das erlaubt z. B. den Einsatz von standardisierten rotierenden Maschinen. Die Art und die Kenngrößen der Bewegungsabläufe werden dann über Getriebe, Kugelgewindetrieb, Zahnriemen, Kurbeltrieb etc. an die Arbeitsmaschine angepasst.

Mechanischen Übertragungssysteme sind durch ihren Verschleiß und der damit verbundenen Wartung gekennzeichnet und sie beeinflussen zudem die Dynamik, die Zuverlässigkeit und den Wirkungsgrad des gesamten Antriebssystems. In Abhängigkeit der Anwendung können durch die Reduzierung der mechanischen Übertragungssysteme wichtige Vorteile erzielt werden. Dafür muss die elektrische Maschine optimal an die Arbeitsmaschine angepasst werden. Dieser Ansatz, der in Abbildung 3.3 dargestellt ist, erfordert daher neue Konzepte für elektrische Maschinen sowie dessen Auslegung und Regelung.

**Lagegeberlose (sensorlose) Regelung elektrischer Maschinen** Die Position bzw. die Lage ist eine wichtige Rückführgröße für geregelte elektrische Antriebe. Normalerweise werden hierfür Lagegeber eingesetzt. Sie sind aber ein aufwendiger Bestandteil des Antriebes. Der Lagegeber und die entsprechende Signalübertragung zum Regler sind auch die Ursache für eine erhöhte

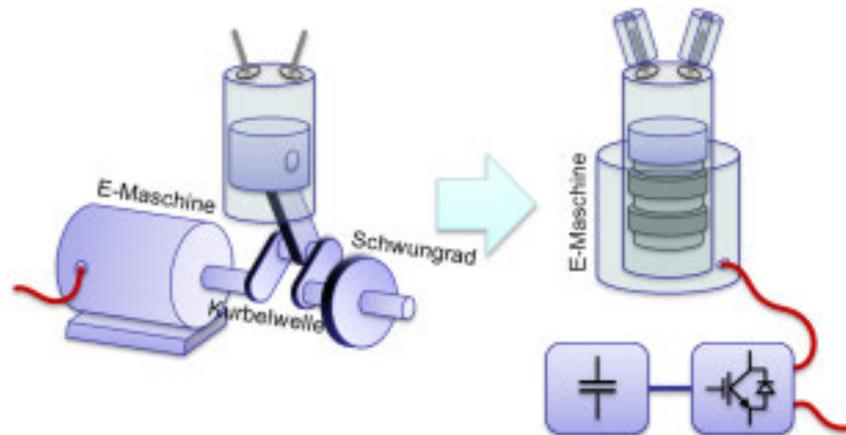


Abbildung 3.3: Einsatz von elektrischen Linearmaschinen bei Verbrennungsmotoren

Störanfälligkeit des Antriebes. In einige Anwendungen kann es auch vorkommen, dass raue Umgebungsbedingungen den Einsatz von Lagegebern verhindern.

Die Lage des Motorläufers kann aber auch indirekt über die Messung nur elektrischer Größen, z. B. Phasenspannung und/oder Phasenstrom, ermittelt werden. Diese Methode wird als sensorlose oder lagegeberlose Regelung bezeichnet und ist in Abbildung 3.4 schematisch gezeigt. Die lagegeberlose Regelung wird schon seit zwei Jahrzehnten in der wissenschaftlichen Literatur behandelt, wurde aber bislang kaum von der Industrie umgesetzt. Der dadurch entstehende Forschungsbedarf bezieht sich besonders auf eine höhere Genauigkeit, Dynamik und Parameterunabhängigkeit, besonders im unteren Geschwindigkeits- und Stillstandsbereich.

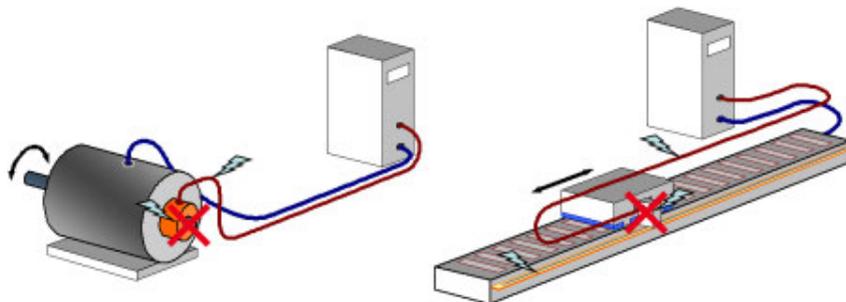


Abbildung 3.4: Sensorlose Regelung elektrischer Maschinen

### 3.1.2 Forschungsprojekte

#### Regelungsstruktur und Realisierbarkeitsanalyse für den Betrieb eines direktangetriebenen Freikolbenmotors<sup>1</sup>

Der Verbrennungsmotor ist eines der am weitesten verbreitetsten Antriebe in der Fahrzeugtechnik. Umso wichtiger ist das Bestreben diese Antriebsart effizient, umweltfreundlich und kostensparend zu gestalten. In den letzten Jahrzehnten hat sich die Forschung zum größten Teil auf Verbrennungsmotoren konzentriert, welche zur Umsetzung der oszillierenden Bewegung eine rotierende Kurbelwelle besitzt. Dadurch und mit Hilfe einer Schwungmasse war es möglich ohne Umwandlung der mechanischen/elektrischen Energie den Verbrennungsmotor zu betreiben. Die Schwungmassen werden eingesetzt um auftretende Drehschwingungen zu glätten.

<sup>1</sup>von Dipl.-Ing. Andreas Gerlach, Dipl.-Ing. Stephan Zeilinga, Prof. Dr.-Ing. Hermann Rottengruber und Prof. Dr.-Ing. Roberto Leidhold

Eine Alternative hierzu würde der Freikolbenmotor darstellen. Der bewegliche Teil des Freikolbenmotors besteht dabei lediglich aus einem Gestänge und einem Kolben. Um die oszillierende Bewegung zu erzielen wird eine lineare elektrische Maschine angeschlossen. Sie sorgt sowohl für die erforderliche Positionstrajektorie (siehe Abbildung 3.5b) als auch für die Energieumwandlung aus dem Verbrennungsprozess in elektrische Energie. Hierdurch ist es erforderlich, dass die Maschine zwischen Generator- und Motorbetrieb wechselt. Es existieren bereits einige Studien zum Freikolbenmotor. Eine praxistaugliche Umsetzung ist allerdings noch nicht gelungen. Bei den meisten Prototypen wurden zusätzliche mechanische Komponenten eingefügt um die mechanische Energie zwischen zu speichern. Das vorgeschlagene Konzept besteht aus einer direkt gekoppelten elektrischen Maschine und einem Verbrennungsmotor.

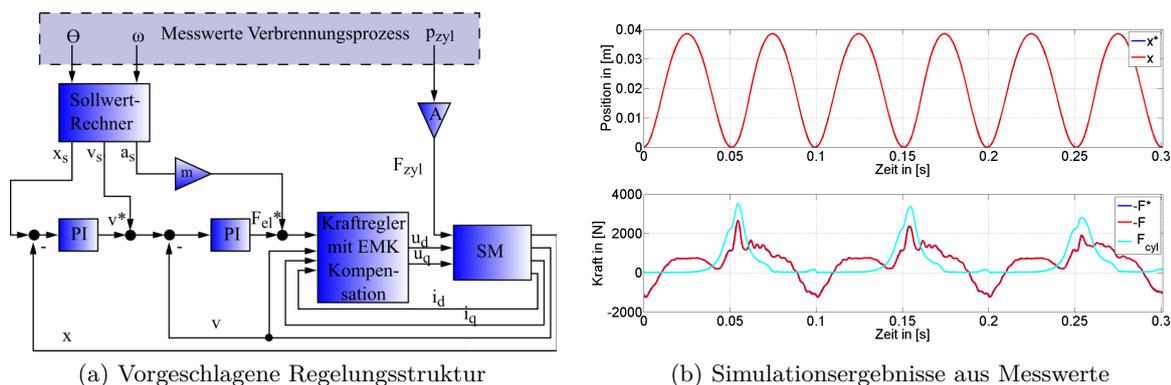


Abbildung 3.5: Regelungsstruktur und Simulationsergebnisse für den Betrieb eines direktgetriebenen Freikolbenmotors

Ziel dieser Arbeit ist es zu zeigen, wie die elektrische Maschine zu regeln ist, um einen Betrieb des Freikolbenmotors zu ermöglichen. Dabei wird aufgezeigt welche Schwierigkeiten bewältigt werden müssen. Unter anderem ist die pulsierende Kraft aus dem Verbrennungsprozess nicht mehr durch die genannten Schwungmassen geglättet und müssen innerhalb eines Arbeitstaktes abgebaut werden. Als Basis für die gezeigten Potenzialabschätzungen wurde ein konventioneller Verbrennungsmotor mit einer permanent erregten Synchronmaschine direkt gekoppelt betrieben und der Winkel  $\Theta$ , die Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  und der Zylinderdruck  $p_{zyl}$  synchron gemessen. Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, muss es mit dem Linearmotor möglich sein die gleiche Bewegung zu erzielen. Wenn es möglich ist einen nahezu identischen Verlauf abzufahren, kann angenommen werden, dass die Zylinderdruckverläufe identisch sind.

Ein großer Vorteil, welchen man beim Freikolbenmotor hat, ist die Entkopplung von der Kurbelwelle. Somit ist es möglich sein Bewegungsverlauf variabel einzustellen und bspw. Drosselverluste beim Ladungswechsel zu minimieren. Dieses Potenzial soll vor allem in zukünftigen Untersuchungen erläutert werden.

In Abbildung 3.5a ist die konzeptionelle Regelungsstruktur dargestellt. Ein Modell des Verbrennungsmotors ist hierbei nicht enthalten. Die Wirkung des Verbrennungsmotors wird durch die Messung des Zylinderdrucks nachgebildet. Die Multiplikation mit der Kolbenfläche  $A$  ergibt die Zylinderkraft  $F_{zyl}$ . Diese Kraft wirkt als Last auf der Synchronmaschine. Die Synchronmaschine wird mithilfe eines Kraftreglers geregelt. Dabei wird die Kraft proportional zum Strom  $I_q$  bestimmt. Zusätzlich wird die induzierte Gegenspannung (EMK) kompensiert um möglichst geringe Abweichungen zur Soll- und Istkraft zu erzielen. Überlagert sind in einer Kaskadenregelung die Geschwindigkeits- und die Positionsregelung. Die Sollwerte werden aus den Messwerten des konventionellen Verbrennungsmotors generiert. Die wirkende Kraft wird dabei von einem Geschwindigkeitsregler kompensiert.

In Abbildung 3.5b sind die ersten Simulationsergebnisse dargestellt. Sie zeigen, dass eine sehr genaue Positionsregelung möglich ist (Sollweg  $x^*$  liegt fast genau auf der Istposition  $x$ . Die dabei entstehenden Kräfte sind direkt unter der Position abgetragen. Blau ist die Sollkraft  $-F^*$ , in Rot ist die Istkraft  $-F$  und in Cyan ist die Zylinderkraft  $F_{Zyl}$  dargestellt.

Der Sollkraftverlauf ergibt sich aus der Überlagerung durch die Kompensation der Lastkraft und durch die Realisierung des Bewegungsvorgangs.

Im Manuskript wird genauer auf die Regelung der elektrischen Maschine, was für Leistungen erforderlich ist, eine erste Abschätzung für die Verluste als auch der Einfluss der Gesamtmasse auf den Kraftverlauf eingegangen.

### Erkennung von Zwischenwindungskurzschlüssen in PMSMs<sup>2</sup>

Zwischenwindungskurzschlüsse in permanentmagneterregten Synchronmaschinen (PMSMs) stellen einen ernsten Fehler dar und führen innerhalb weniger Sekunden zum Ausfall der Maschine. Wird der Fehler dagegen schnell erkannt, können entsprechende Gegenmaßnahmen getroffen und der Motor vor Zerstörung bewahrt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Detektionsalgorithmus entwickelt, welcher einen Zwischenwindungskurzschluss innerhalb kurzer Zeit nach dem Auftreten zuverlässig erkennen kann. Das Prinzip des entwickelten Algorithmus ist in der Abbildung 3.6 dargestellt.

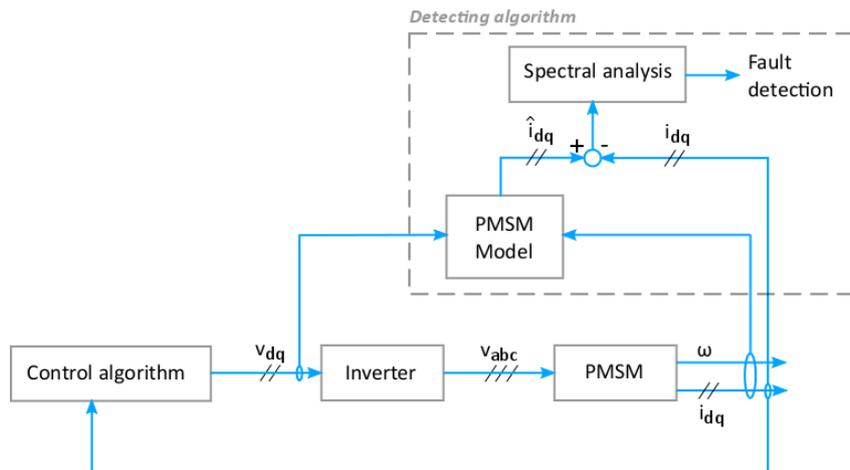


Abbildung 3.6: Detektionsalgorithmus

Dabei wird auf dem Steuergerät, neben dem Regelalgorithmus, ein Modell der PMSM in Echtzeit ausgeführt und daraus das Verhalten der Maschine vorhergesagt. Parallel werden relevante Größen für die Regelung gemessen. Die gemessenen Größen werden anschließend mit den vorhergesagten Werten verglichen. Bei einem Zwischenwindungskurzschluss bekommt die berechnete Abweichung zwischen dem Modellverhalten und der Realität ein bestimmtes Muster, anhand dessen der Fehler erkannt wird.

Die Ergebnisse sind in der Abbildung 3.7 dargestellt. Dabei wird ein Zwischenwindungskurzschluss bei verschiedenen Drehzahlen ein- und ausgeschaltet. Der Detektionsalgorithmus erkennt den Fehler eindeutig, wie der Fault Index in der Abbildung zeigt.

<sup>2</sup> von M. Sc. Aleksej Kieselev, Prof. Dr. Ing. Alexander Kuznetsov und Prof. Dr. Ing. Roberto Leidhold

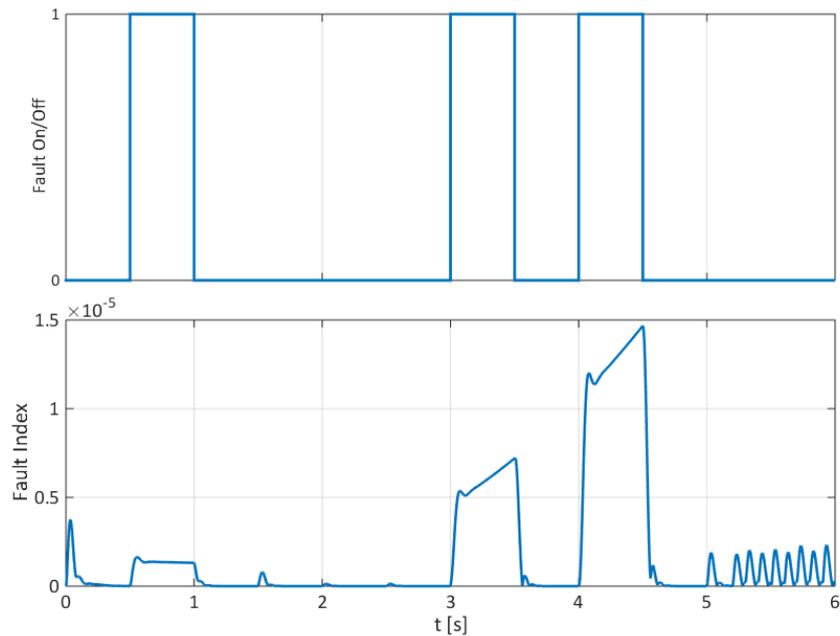


Abbildung 3.7: Fehlererkennung Ergebnisse

### Teilintegrierte und direktgekoppelte Generator-Wasserradkombination<sup>3</sup>

Wasserräder sind als Energiewandlungssysteme durch geringe Drehzahl und hohem Drehmoment gekennzeichnet. Die Kopplung zwischen elektrischer Maschine/Generator und Wasserkraftanlage wird bisher meist verlustbehaftet über Transmission oder mehrstufige Getriebe ausgeführt.

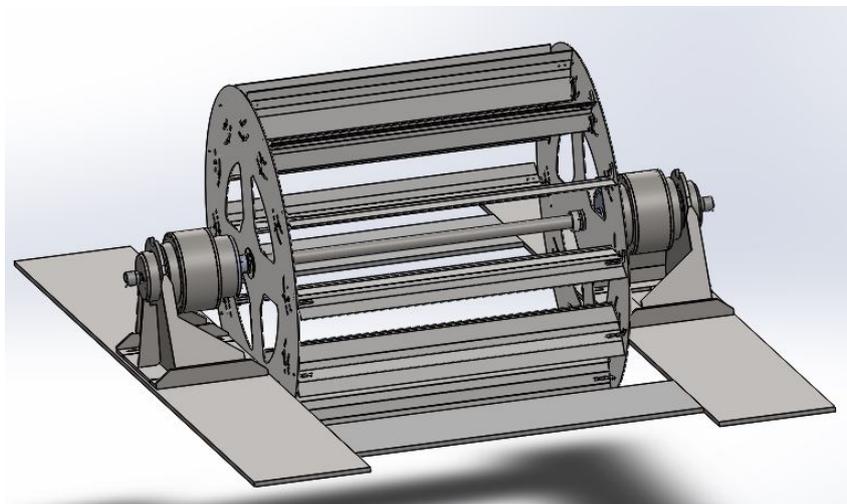


Abbildung 3.8: Wasserrad mit geteiltem Generator

Im Rahmen des Wachstumskern Fluss-Strom Plus werden verschiedene langsam laufende Generatoren zur direkten Kopplung mit hydrokinetischen Energiewandlern entwickelt. Einer dieser Generatoren ist nach dem Transversalflussprinzip aufgebaut, welches aufgrund des Funktionsprinzips neue Konstruktionsoptionen ermöglicht. Im Gegensatz zu konventionellen elektrischen Maschinen, verläuft der magnetischen Flusses senkrecht zur Bewegungsrichtung, so dass die Statorspulen aus einer Ringwicklung mit aufgesteckten U-förmigen Blechpaketen aufgebaut werden.

<sup>3</sup>von Dr.-Ing. Thomas Schallschmidt

Daraus lässt sich ein segmentierter, zweiphasiger Aufbau ableiten, der mit einem Wasserrad in Leichtbauweise kombiniert werden kann. In Abbildung 3.8 ist der Prototyp des Wasserrades abgebildet.

Unter Berücksichtigung der strukturmechanischen Verhältnisse und unter Aspekt einer optimalen Lastverteilung wird der Generator mechanisch geteilt und an den Lagerungspunkten des Wasserrades in das System integriert. Das bedeutet es sind zwei einsträngige Maschinen entstanden, die über die Welle des Wasserrades miteinander verbunden sind. Die Welle ist torsionssteif ausgeführt, so dass der notwendige mechanische Versatz gewährleistet wird. Zur Ermittlung der aktuellen Rotorlage im Bezug auf die Statoren werden beide Teilgeneratoren mit einem Encoder zur Positionsbestimmung ausgestattet. In Abbildung 3.9 ist ein Teilgenerator dargestellt.

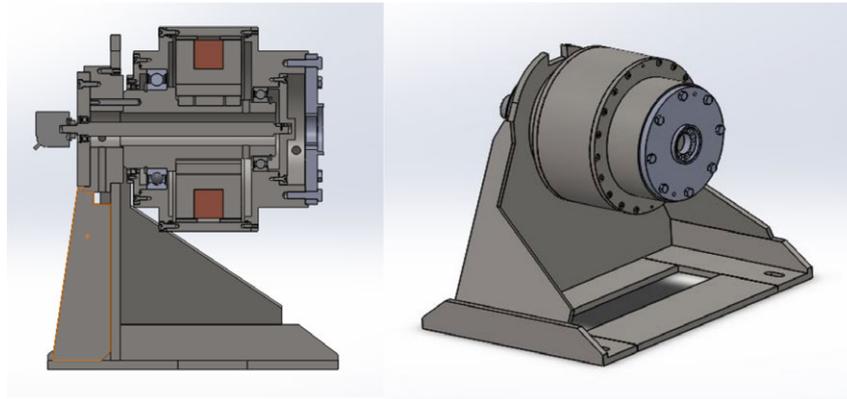


Abbildung 3.9: Schnittdarstellung des Generators

### **Zweiphasige Transversalfflussmaschine mit Scheibenläufer und gedruckten mechanischen Strukturen<sup>4</sup>**

Die Forschung an Transversalfflussmaschinen (TFM) wurde im diesjährigen Kalenderjahr weiter vorangetrieben und mündete in die Fertigstellung eines zweiten Prototyps auf Basis eines Scheibenläufers. Es erfolgten ausführliche Erprobungen auf einem Versuchsstand, um die Performance und Betriebseigenschaften der Maschine zu erfassen. Die TFM erreicht im niedrigen Drehzahlbereich bis  $120 \frac{1}{\text{min}}$  und einem Drehmoment bis  $14 \text{ N m}$  Wirkungsgrade von bis zu 83 %, was für eine Leistungsklasse der Wirkungsgradklasse IE4 entspricht (siehe Abbildung 3.10).

Im Gegensatz zu konventionellen Maschinen, die auf gefräste und geschweißte mechanische Strukturen setzen, sind bei dieser Maschine sämtliche Aufbauten mit Hilfe eines additiven dreidimensionalen Druckverfahrens gefertigt worden. Das ermöglicht eine kostengünstige und flexible Fertigung. In Abbildung 3.11 sind neben dem Läufer die beiden Lagerschilde dargestellt, in denen auch die Statoren eingelassen sind. Das gesamte Projekt soll durch eine praktische Erprobungen an einem Wasserrad im kommenden Jahr zum Abschluss gebracht werden.

---

<sup>4</sup>von M. Sc. Sebastian Hieke

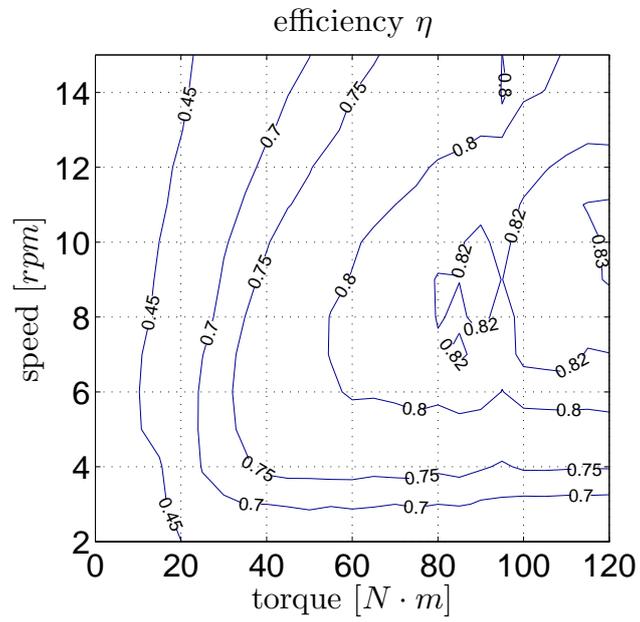
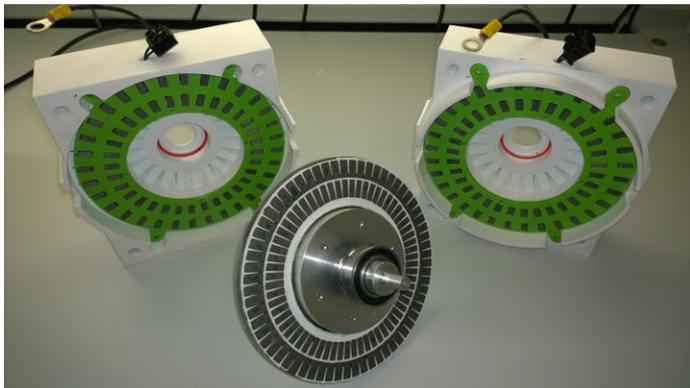
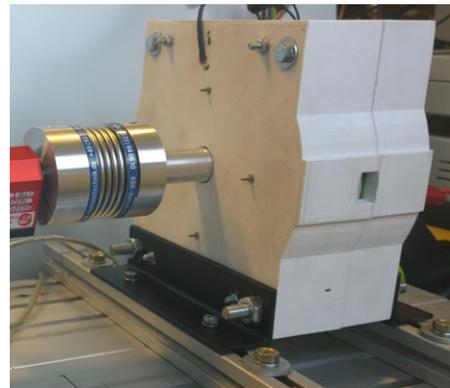


Abbildung 3.10: Wirkungsgrad der TFM



(a) Innenansicht



(b) Außenansicht auf dem Prüfstand

Abbildung 3.11: Prototyp einer zweiphasigen TFM

### 3.1.3 Veröffentlichungen

#### Zeitschriften- und Konferenzbeiträge

- [1] A. Gerlach, S. Zeilinga, H. Rottengruber und R. Leidhold, „Regelungsstruktur und Realisierbarkeitsanalyse für den Betrieb eines direktangetriebenen Freikolbenmotors“, in. 2017, S. 409–418. DOI: 10.24352/UB.OVGU-2017-085. Adresse: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:ma9:1-10182>.
- [2] T. Schallschmidt, M. Stamann, H. Kühn und R. Leidhold, „Teilintegrierte und direktgekoppelte Generator-Wasserradkombination“, in. 2017, S. 265–272. DOI: 10.24352/UB.OVGU-2017-085. Adresse: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:ma9:1-10182>.
- [3] A. Kiselev, A. Kuznietsov und R. Leidhold, „Model based online detection of inter-turn short circuit faults in PMSM drives under non-stationary conditions“, in. 11th IEEE International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG): 4-6 April 2017, 2017, S. 371–374.
- [4] S. Hieke, M. Stamann, D. Lagunov, R. Leidhold, A. Masliennikov, A. Duniev und A. Yehorov, „Two-phase transverse flux machine with disc rotor for high torque low speed application“, in *Proc. 19th European Conf. Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE Europe)*, Sep. 2017, P.1–P.8. DOI: 10.23919/EPE17ECCEurope.2017.8099153.
- [5] M. B. Tuka, R. Leidhold und M. Mamo, „Modeling and control of a Doubly Fed Induction Generator using a back-to-back converters in grid tied wind power system“, in *Proc. IEEE PES PowerAfrica*, Juni 2017, S. 75–80. DOI: 10.1109/PowerAfrica.2017.7991202.
- [6] S. Hörner, S. Abbaszadeh, T. Maître, C.-T. Weber, R. Leidhold und D. Thévenin, „The Effect of the Reduced Frequency on Oscillating Flexible Hydrofoils“, in. AFM/ SHF Conference on Hydraulic Machines , Paris, 2017.
- [7] G. Catuogno, G. Frias, G. Garcia und R. Leidhold, „Design of a decoupling strategy and parameter calculation for six-phase PM machines with general angular displacement“, in. Sage-Journals, 2017.

## 3.2 Lehrstuhl Elektrische Netze und Erneuerbare Energie

### 3.2.1 Forschungsprofil

Der Lehrstuhl „Elektrische Netze und Erneuerbare Energie“ hat sich zur Aufgabe gesetzt, technische und ökonomische Prozesse im Elektroenergiesystem weiter zu entwickeln, Optimierungspotentiale zu heben und neue, innovative Methoden der Netzführung, -planung und -nutzung hervorzubringen. Besonderes Augenmerk liegt hierbei auf dem systemischen Gedanken. Das bedeutet, dass der Lehrstuhl neben dem Verständnis der Funktionen und Prozesse einzelner Akteure im Energieversorgungssystem insbesondere die Interaktionen der Player untereinander und deren Auswirkungen auf das Gesamtsystem betrachtet. Dies spiegelt sich auch in den Forschungsschwerpunkten wider:

- Zur Bewältigung der bevorstehenden Herausforderungen ist die Analyse und Optimierung der Interaktion zwischen den Akteuren im Energieversorgungsnetz sowie die geeignete Modellierung des „Interaktionsmediums Stromnetz“ unerlässlich. Durch diese grundlegende Methoden-, Modell- und Verfahrensentwicklung lässt sich das erforderliche, bessere Verständnis der stationären, quasistationären und dynamischen Vorgänge im Gesamtsystem erwerben, aus dem schlussendlich die Ableitung optimierter Konzepte für Netzplanung und -führung erfolgt.
- Der Bedarf an diesen neuen Konzepten ergibt sich u. a. aus der Notwendigkeit, mehr und mehr erneuerbare und dezentrale Erzeuger sowie Speicher sinnvoll in das Gesamtsystem zu integrieren. Hierfür ist es erforderlich, das jeweilige Betriebsverhalten der Anlage, dessen Vor- und Nachteile sowie die sich daraus ergebenden Potentiale und Risiken für das Netz näher zu analysieren. Darauf aufbauend werden am Lehrstuhl Konzepte für eine technisch und ökonomisch sinnvolle Integration dieser Anlagen in neue oder bestehende Prozesse der Netzbetreiber im Rahmen des Energiemanagements entwickelt. Ein besonderer Schwerpunkt liegt hierbei auch auf der Modellierung, der Diagnose und der Integration von Brennstoffzellensystemen.
- Aufgrund ihrer geringen Leistung werden die meisten dieser Anlagen in den unteren Spannungsebenen angeschlossen, die messtechnisch nicht vollständig erfasst sind. Mittlerweile führen die zu transportierenden Energiemengen zu Grenzwertverletzungen, welche aufgrund der fehlenden Information vom Netzbetreiber nicht behoben werden können. Deshalb werden am LENA geeignete Methoden zur Netzzustandsidentifikation entwickelt, die sowohl technische Unschärfe als auch ökonomischen Aufwand berücksichtigen.
- Bei der Modellierung und Optimierung des Elektroenergiesystems spielen das Übertragungsmedium (Freileitung, Kabel, GIL, usw.) und die Übertragungstechnik (Drehstrom, HGÜ, usw.) eine wesentliche Rolle. Aus diesem Grund wird am Lehrstuhl das Betriebsverhalten dieser Technologien im Hinblick auf den Einsatz im Energieversorgungssystem untersucht und verbessert.

### 3.2.2 Forschungsprojekte

#### **ADELE-ING – Engineering-Vorhaben für die Errichtung der ersten Demonstrationsanlage zur adiabaten Druckluftspeichertechnik<sup>5</sup>**

Um im elektrischen Energieversorgungsnetz eine ausreichende Versorgungssicherheit zu gewährleisten ist das Gleichgewicht von Last und Erzeugung von immenser Bedeutung. Vor dem

---

<sup>5</sup>von M. Sc. Christian Klabunde

Hintergrund der zunehmenden Integration regenerativer Energien, die sich durch eine fluktuierende und nur bedingt vorhersehbare Einspeisung auszeichnen, nehmen Energiespeicher in der zukünftigen Energieversorgung daher eine besondere Bedeutung ein. Vor allem im Bereich der Stundenspeicher, die einen Last- und Erzeugungsausgleich im Laufe eines Tages ermöglichen, werden Konkurrenzlösungen zur etablierten Technologie der Pumpspeicherkraftwerke benötigt. Das Ziel des Projektes *ADELE-ING* besteht daher darin, optimale Betriebskonzepte für, vorzugsweise adiabate, Druckluftspeicher zu entwickeln und somit die Netz- und Systemintegration dieser Technologie zu ermöglichen. Um im Rahmen dieses Projektes eine allumfassende Wirtschaftlichkeitsanalyse durchzuführen, werden neben adiabaten auch diabate Anlagenkonzepte und herunterskalierte Ansätze untersucht, die sich durch eine höhere Dynamik und somit ein breiteres Anwendungsspektrum auszeichnen. Aufgrund des breiten Aufgabenspektrums, das sich von der Entwicklung möglicher Anlagenkonzepte über die Ermittlung von wirtschaftlichen Einsatzmöglichkeiten bis hin zur Errichtung von Anlagenkomponenten erstreckt, besteht das Projektkonsortium aus Vertretern der Maschinenbauindustrie, der Elektroenergieerzeugung und der Forschung. Der Lehrstuhl LENA untersucht innerhalb dieses Projektes die Netzintegration des Speichers. Hierfür konnte ein möglicher Standort für den Druckluftspeicher selektiert und das 110 kV-Verteilnetz um diesen Standort modelliert werden.

Im Mittelpunkt der derzeitigen Untersuchungen steht der dynamische Einfluss des Speichers auf die Systemregelung und Systemstabilität bei der Erbringung von Sekundärregelleistung und Minutenreserve. Hierzu wurde ein dynamisches Netzmodell in MATLAB/Simulink erstellt, in das im Anschluss unterschiedliche *ADELE*-Konzepte implementiert werden konnten (siehe Abbildung 3.12). Auf Basis von unterschiedlichen Szenariobetrachtungen konnte nachgewiesen werden, dass der *ADELE*-Speicher Sekundärregelleistung zu erbringen und somit dazu in der Lage ist die Netzfrequenz zu stützen.

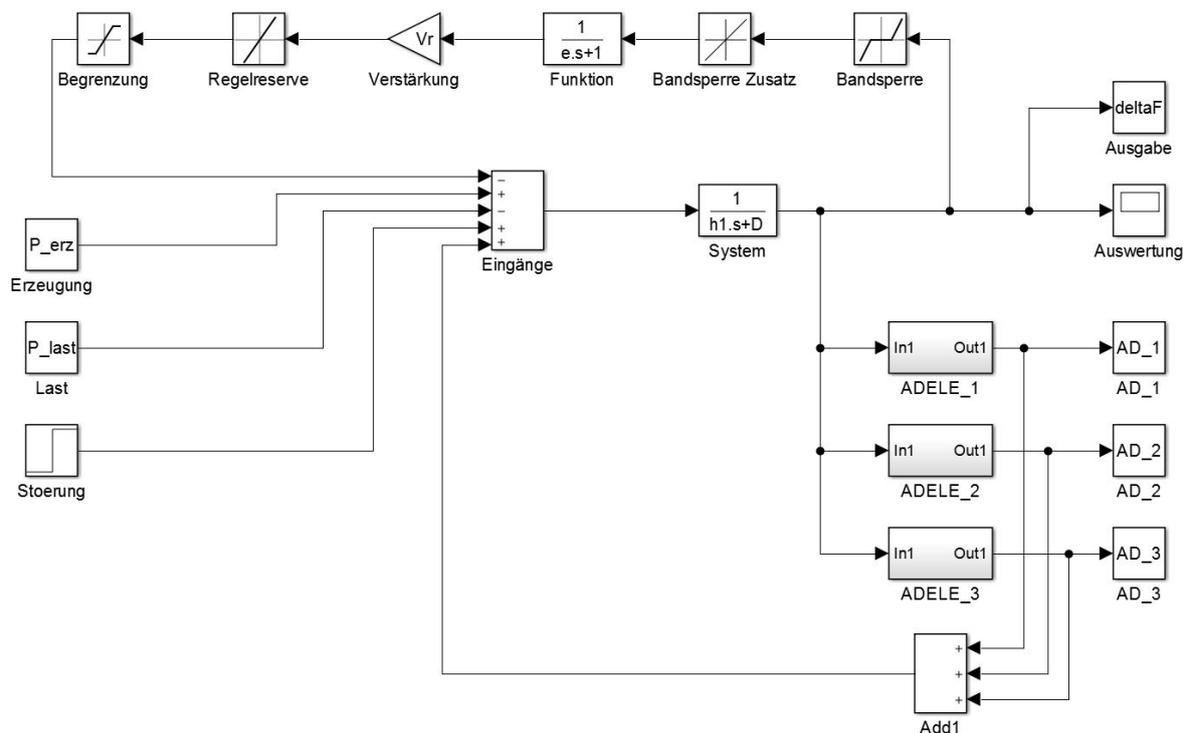


Abbildung 3.12: Nachbildung der Frequenzcharakteristik in MATLAB/Simulink.

### **DSiRe – Dynamische Sicherheitsrechnungen<sup>6</sup>**

Der Ausbau des elektrischen Energienetzes führt zu einem komplexen, hochdynamischen Systembetrieb, indem schneller und optimaler als bisher auf Zustandsänderungen reagiert werden muss. Ursachen sind vor allem der stetig steigende Anteil dezentraler Erneuerbaren Energieerzeugung. Die hohe Volatilität der Einspeisung und Prognoseabweichungen führen zu schnellen Leistungsbilanzänderungen, die historisch hauptsächlich durch Laständerungen ausgelöst wurden. Eine weitere Herausforderung stellt die Abschaltung konventioneller Kraftwerke dar, die mit ihrer rotierenden Masse zur Systemstabilität beitragen. Eine Verringerung der Systemzeitkonstanten führt ebenfalls zu schnelleren Änderungen des Systemzustandes. Um die Netzbetreiber in dieser neuen, hochkomplexen Systemführung zu unterstützen, können dynamische Netzsicherheitsberechnungsprogramme zur Anwendung kommen.

Ausgehend vom aktuellen, stationär berechneten Systemzustand, der vom SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) System in der Netzleitwarte zur Verfügung gestellt wird, können erweiterte, dynamische Netzzustände bestimmt und Gefährdungspotentiale detektiert werden. Ausgehend davon ist es möglich, dem Netzbetreiber angemessene Lösungen vorzuschlagen, die auf den erweiterten Systeminformationen beruhen und im besonderen Maße auf das Ereignis und die Gefährdungssituation zugeschnitten sind. Derzeit stehen einige Tools für dynamische Netzsicherheitsberechnungen zur Verfügung. Insbesondere die Siemens AG bietet mit SIGUARD@DSA eine Lösung an, die in bestehende Netzleitwarten integriert werden kann.

Der Einsatz von SIGUARD@DSA in der Leitwarte eines deutschen Übertragungsnetzbetreibers setzt eine Analyse der Anforderungen an die Identifizierung, Darstellung und Auswertung der dynamischen Phänomene in der Regelzone voraus. Die Grundlagen für SIGUARD@DSA wurden am Lehrstuhl Elektrische Netze und Erneuerbare Energie der Otto-von-Guericke Universität Magdeburg entwickelt. Im Rahmen des Forschungsprojektes hat der Lehrstuhl aufbauend auf den vorhandenen Kenntnissen die Anforderungen des Übertragungsnetzbetreibers an eine dynamische Netzsicherheitsberechnung hinsichtlich der Erfassung notwendiger dynamischer Phänomene und deren Darstellung in Indikatoren analysiert und die Notwendigkeit weiterer Indikatoren abgeleitet. Des Weiteren wurden Berechnungsansätze für neue Indikatoren entwickelt und evaluiert. Dazu gehören insbesondere neue Ansätze zur Bestimmung der Rotorwinkel- und Spannungsstabilität.

### **DynaGridCenter – Ausbau herkömmlicher Übertragungsnetzleitwarten zu zukunftssicheren, dynamischen Leitwarten<sup>7</sup>**

Die Energiewende setzt den Schwerpunkt auf nachhaltige Energiesysteme, die sich durch fluktuierende Einspeisung (z. B. Wind, PV) charakterisieren. Ein sicherer Betrieb derartiger Energiesysteme erfordert die Installation und kontinuierliche Einbeziehung in die Regelstrategien von neuen, sehr schnell agierenden Netzkomponenten wie Hochspannungsgleichstromübertragungen (HGÜ bzw. HVDC), Flexible AC Transmission Systems (FACTS) und über Leistungselektronik angebundene, dezentrale Erzeugungsanlagen.

Neben hochintegrativen und flexiblen Regelungskonzepten für diese dynamischen Netzkomponenten selbst, bedarf es auch einer übergeordneten Beobachtung (Monitoring) und Steuerung (Control) durch dezentrale Stationsintelligenz und auch zentrale Transportnetzleitwarten, um die Systemstabilität kontinuierlich und zuverlässig zu gewährleisten. Das Projekt DynaGridCenter (Laufzeit von 09/2015 bis 09/2018) hat sich daher als Ziel gesetzt, einen neuartigen dynamischen Netzleitsystemdemonstrator für den zuverlässigen Betrieb von AC/DC-Transportnetzen zu entwickeln und neue Algorithmen zu testen.

---

<sup>6</sup> von Jun.-Prof. Dr.-Ing. Ines Hauer

<sup>7</sup> von Jun.-Prof. Dr.-Ing. Ines Hauer

Zur Umsetzung des Zieles arbeiten die Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, die Technische Universität Ilmenau, die Ruhr-Universität Bochum und die Siemens AG zusammen mit den Fraunhofer Instituten IFF und IOSB eng zusammen. An der OvGU wurden dazu im Jahr 2016 die Grundlagen für die Entwicklung eines hybriden Netzmodells inkl. Stationsleittechnik und Datengateway gelegt.

Im Jahr 2017 wurde ein hybrides Netzmodell aus einem softwaremäßig nachgebildetem Netzmodell und zwei hardwaremäßig nachgebildeten HVDC-Strecken aufgebaut und dynamisch parametrisiert. Das dynamische Netzmodell bildet das europäische Übertragungsnetz vereinfacht nach. Das Netzmodell wurde in ein Hardware-in-the-loop-System eingepflegt, um die nachgebildete Hardware-HVDC-Strecke in Echtzeit an die Simulation koppeln zu können. Des Weiteren wurde eine Kommunikationsinfrastruktur aufgebaut, die eine Kommunikation zwischen dem hybriden Netzmodell und der Leitwarte in Ilmenau ermöglicht. Die geplante Systeminfrastruktur ist in Abbildung 3.13 schematisch abgebildet und wird zur Erprobung neuer Algorithmen zur Beherrschung dynamischer Phänomene genutzt werden.

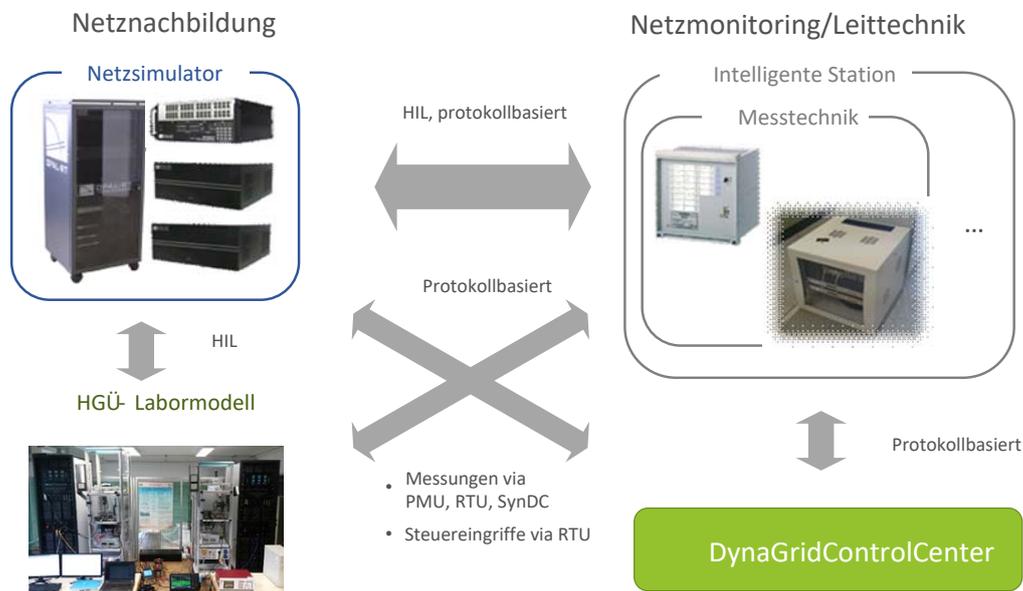


Abbildung 3.13: Systeminfrastruktur im Projekt DynaGridCenter

### ego.-Gründungstransfer<sup>8</sup>

Das Brennstoffzellenteam des Lehrstuhls für Elektrische Netze und Erneuerbare Energie hat am 31.10.2017 das ego.-Gründungstransfer Projekt abgeschlossen. Das Vorhaben wurde unter dem Kürzel EZM IntelligencePlus im Zeitraum vom Juli 2016 bis Oktober 2017 durchgeführt. Die Produktidee EZM IntelligencePlus orientiert sich an dem strategischen Ziel der Landesregierung Sachsen-Anhalt, welches die Etablierung als Energiemodellregion durch markttaugliche, kosteneffiziente und überregional nutzbare Lösungen für die Erzeugung, Integration, Speicherung und effiziente Nutzung von regenerativer Energie und die Erschließung zukünftiger Energiesystemmärkte umsetzen möchte. EZM IntelligencePlus ist ein intelligenter Verbund von elektrischen Mess- und Diagnosegeräten zur Nutzung für die Qualitätssicherung in der Produktion, F&E-Untersuchungen und Überwachung von regenerativen Energiesystemen wie Brennstoffzellen, Batterien und Elektrolyseuren (Power-to-Gas) im industriellen Einsatz.

<sup>8</sup> von M. Sc. Christian Rinne

### 3 Forschung

Während der Projektlaufzeit konnten die Projektziele erreicht werden. Es wurde ein invasives Messsystem, eine Zellspannungsüberwachung, eine intelligente Steuerung und ein Auswertungsmodul mit integrierter Datenbank entwickelt. Die entwickelten Prototypen wurden während des Projektes zur Marktreife gebracht und sollen nach Ablauf des Projektes bei den Pilotkunden in Langzeittests abschließend geprüft werden. Nach dem Abschluss der letzten Tests sollen die Produkte wirtschaftlich vermarktet werden. Das Team konnte auf der Hannover Messe 2017 (siehe Abbildung 3.14) bereits ihre Produktidee ausstellen und dadurch wichtige Wirtschaftskontakte knüpfen und Pilotkunden akquirieren.



Abbildung 3.14: C. Rinne erklärt Interessenten die Produktvorteile von EZM-IntelligencePlus auf der Hannover Messe 2017.

Das Team befindet sich derzeit in der Umsetzung eines wirtschaftlichen Konzepts für die Produktidee. Während der Projektphase konnten wertvolle Kontakte mit regionalen und überregionalen Unternehmen geschlossen werden. Diese Kontakte sollen auch für zukünftige Projekte mit der Universität Magdeburg genutzt werden.

Der ego.-Gründungstransfer ist ein Förderprogramm des Landes Sachsen-Anhalt und wird durch den Europäischen Fond für regionale Entwicklung (EFRE) (siehe Abbildung 3.15) finanziert. Innerhalb dieses Förderprogramms soll innovativen Geschäftsideen ein gründungsbezogenes Umfeld geboten werden. Außerdem werden Personal- und Sachmittel für die Weiterentwicklung der Produktidee bereitgestellt. Der ego.-Gründungstransfer wird seitens der Universität von dem Transfer- und Gründerzentrum (TUGZ) begleitet.



Abbildung 3.15: Gefördert als Förderprojekt des Landes Sachsen-Anhalt durch den Europäischen Fond für regionale Entwicklung (EFRE).

## GleichMorgen – HGÜ in der deutschen Netzbetriebsführung von morgen<sup>9</sup>

Im aktuellen Netzentwicklungsplan sind in allen vier Szenarien große Punkt-zu-Punkt-Hochspannungsgleichstromübertragungsleitungen (HGÜ) geplant. Diese sollen das Ungleichgewicht der Erzeugung und des Verbrauchs zwischen dem Norden und Süden Deutschlands ausgleichen. Für den Parallelbetrieb dieser HGÜ-Leitungen zum Drehstromverbundsystem und die Nähe der HGÜ-Umrichterstationen zueinander sind neue Betriebsführungskonzepte erforderlich. Der Betrieb des stark vermaschten Drehstromnetzes muss dabei ohne Einschränkungen weiterhin gewährleistet sein. In diesem Projekt werden neue Methoden der Betriebsführung entwickelt, um den Herausforderungen in der Zukunft gewachsen zu sein.

Die Betriebsführung für das Drehstromnetz ist in mehrere Stufen unterteilt:

- Betriebsmitteleinsatzplanung
- Korrektur dieser Planungsergebnisse entsprechend des tatsächlichen Netzzustandes und
- Ausregelung von Störungen zur Wahrung der Netzstabilität.

Für den Betrieb der HGÜ-Systeme ist eine ähnliche Unterteilung zweckmäßig. Deshalb können sie in die in die Betriebsführung integriert werden. Für die Simulation ist deshalb zunächst ein geeignetes Netzmodell erforderlich. An diesem Modell können dann unterschiedliche Einsatzkonzepte in unterschiedlichen Szenarien untersucht werden, wobei Betriebsmittelgrenzwerte eingehalten werden müssen. Es ergeben sich unterschiedliche Zielfunktionen, die es gegeneinander anhand von Bewertungskriterien zu vergleichen und bewerten gilt. Anschließend werden diese Konzepte mit konventionellen und anhand von Artificial Intelligence Optimization Verfahren optimiert, sodass Netzengpässe möglichst nicht auftreten. In Abbildung 3.16 ist die Optimierungslösung innerhalb des zulässigen Lösungsraumes in Bezug auf die Betriebsmittelauslastung aufgezeigt. Die Variante a zeigt einen zum Teil engpassbehafteten Lösungsraum, Variante b einen Lösungsraum mit ausschließlich engpassbehaftetem Lösungsraum und Variante c mit engpassfreiem Lösungsraum.

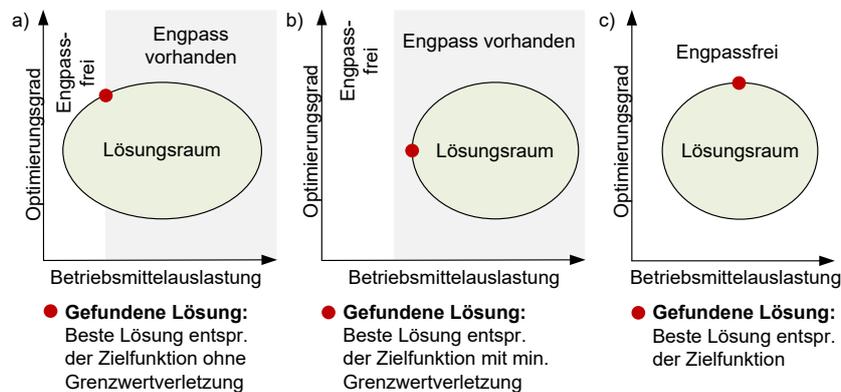


Abbildung 3.16: Optimierungslösung nach Lage des zulässigen Lösungsraums.

Als Ergebnis dieses Projektes soll ein Konzept für die Integration der entwickelten HGÜ-Betriebsführungsverfahren in die Betriebsprozesse der Netzbetreiber erstellt werden und nach betrieblichen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten bewertet werden.

Zu den Kooperationspartnern dieses Projektes zählen die Technische Universität Ilmenau und die ABB AG. Grundlage für die Durchführung dieses Projektes ist das 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung mit dem Titel „Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung“.

<sup>9</sup> von M. Sc. Eric Glende

#### **Netzleitwarte<sup>10</sup>**

Durch die Energiewende steigen die Herausforderungen an die Netzbetreiber in allen Spannungsebenen an. In den Nieder- und Mittelspannungsnetzen sind aufgrund der steigenden Anzahl von Kleinerzeugern neue Konzepte zur Beobachtbarkeit und Steuerbarkeit der Netze und Anlagen erforderlich. In den Hoch- und Höchstspannungsnetzen wächst die Komplexität der Belastungssituation, so dass parallele, verantwortlichkeitsübergreifende Maßnahmen zur Wahrung der Systemsicherheit entwickelt und koordiniert werden müssen. Im europäischen Kontext sind aufgrund der steigenden grenzüberschreitenden Leistungsflüsse neuartige Methoden zur Ursachen- und Wirkungsidentifikation notwendig, um Gefährdungen effizient zu beheben. Der Lehrstuhl LENA forscht an Verfahren und Konzepten zu allen genannten Herausforderungen. Dafür wurde ein Leitsystem angeschafft, wie es auch von Verteil- und Übertragungsnetzbetreibern in dieser Form verwendet wird. Damit ist es möglich, neu entwickelte Methoden nicht nur simulativ am PC, sondern im Technikumsmaßstab zu erproben. Dadurch ist es möglich neue Systemkomponenten, wie z. B. Phasenschiebertransformatoren oder Hochspannungsgleichstromanlagen in ein Leitsystem zu integrieren und zu überwachen, damit der aktuelle Systemzustand optimal abgeschätzt werden kann. Leitsysteme können durch neue, zu entwickelnde Steuerungsmöglichkeiten erweitert werden und den Netzbetreibern in die Hand gegeben werden.

Aufgrund der steigenden Herausforderungen infolge der Energiewende besteht bei nahezu allen Netzbetreibern in Deutschland ein hoher Bedarf an innovativen Netzbeobachtungs- und Regelungsstrategien, wobei aufgrund der Vielzahl und Kleinteiligkeit der zukünftigen Erzeugungsstruktur ein hoher Automatisierungsgrad einer der Treiber ist.

Die grundlegenden Konzepte diesbezüglicher Forschungsarbeiten lassen sich „offline“ durch entsprechende Modelle am PC erarbeiten und testen. Die Größe der hierbei berechenbaren Netze und die Anzahl der Erzeuger und Lasten sind jedoch stark eingeschränkt, so dass realitätsnahe Aussagen nur bedingt möglich sind. Eine Erprobung im Technikumsmaßstab ist folglich ohne Netzleitsystem nicht möglich. Auch Skalierungs- und Aggregationseffekte lassen sich nur mit einem System korrekt bewerten, welches in derselben Form in der Industrie Anwendung findet. Hinzu kommt, dass die Übertragung der Erkenntnisse und Methoden von der Forschung in die Anwendung deutlich beschleunigt wird und das elektrische Energieversorgungssystem in Deutschland schneller von Innovationen profitieren kann. Mit der Leitwarte kann das Forschungsprofil des Lehrstuhls deutlich erweitert werden, insbesondere auf den Gebieten:

- Last- und Erzeugungsprognose
- Regelungseinsatzkonzepte
- Grid automation

Das Netzleitsystem soll schlussendlich auch in der Lehre eingesetzt werden und garantiert eine praxisnahe Ausbildung der Studenten. Die in den Vorlesungen „Elektrische Netze 1“ und „Smart Grid“ erlernten theoretischen Methoden können mittels eines Laborversuchs auch praktisch erprobt werden. Die Studenten können so die Arbeitswelt eines Netzbetreibers realitätsnah erleben.

#### **REGES – Regeneratives Elektrisches Energiesystem - 100 % Integration erneuerbare Energien in 2030<sup>11</sup>**

Das Projekt „REGES“ ist eine durch das BMWi, BMU und BMBF geförderte Initiative mit dem Ziel der Entwicklung optimaler Betriebsführungs- und Regelungsstrategien für eine zuverlässige

---

<sup>10</sup> von M. Sc. Eric Glende

<sup>11</sup> von M. Sc. André Richter

elektrische Energieversorgung Deutschlands, bei einer möglichst 100 %-igen Integration und Nutzung fluktuierender Einspeisungen aus erneuerbaren Energien (EE). Innerhalb des Projektes bestehen Arbeitsaufgaben im Bereich der Übertragungs- und Verteilnetze mit einer sowohl horizontalen als auch vertikalen Betriebsführung, mit der Herausforderung eines hohen Anteils Erneuerbarer Energien, die bereits heute einen hohen Einfluss haben.

Mit dem Ziel der 100 %-igen Integration und Nutzung erneuerbarer Energien sind innerhalb des Projektes verschiedene Aspekte zu betrachten. Diese umfassen unter anderem:

- Erschließung der Flexibilitätspotentiale von Kraftwerken für Regelungsprozesse
- Innovative Netzbetriebsführung unter Einbindung aller Netzebenen (horizontale – vertikale Lastflussoptimierung inklusive eines zukünftig möglichen Overlaynetzes)
- Netzübergreifende Nutzung aller verfügbaren Speicher-, Regel- und Flexibilitätspotentiale
- Beitrag erneuerbarer Energien zur Bereitstellung von Systemdienstleistungen (Leistungs-Frequenzregelung, Spannungshaltung und Blindleistungsbereitstellung) in Form von virtuellen Kraftwerken

Weiterhin werden im Projekt „REGGEES“ Ansätze zur koordinierten Netzbetriebsführung und -regelung erarbeitet und demonstriert, die zentrale und dezentrale regelungstechnische Potentiale optimal ausnutzen und auch die Anforderungen des Energiemarktes beachten. Aspekte des heute existierenden Energiemarktes bleiben dabei unberücksichtigt zugunsten einer hier favorisierten „koordinierten Markt-Netzbetriebsführung“.

Die vorgeschlagenen Ansätze sollen Möglichkeiten aufzeigen, wie eine optimale Netzbetriebsführung mit 100 % EE technologisch und energiewirtschaftlich realisiert werden kann. Ein Vergleich der untersuchten Ansätze anhand simulativ gewonnener Ergebnisse ermöglicht eine Bewertung mit Ausweisung der Vor- und Nachteile und der ggf. erforderlichen regulatorischen Anpassungen, um ein kombiniertes Verfahren mit den Vorteilen der Ansätze künftig umsetzen zu können.

Innerhalb des Projektes hat das LENA die Aufgabe der Untersuchung des Konzeptes Virtuelles Kraftwerk (siehe Abbildung 3.17) einschließlich der Bearbeitung der Auslegungskriterien für EE-Einspeisung sowie die Untersuchung der Ansätze und Methoden für die Betriebsführung. Dazu müssen Algorithmen für die Prognose der Einspeisung aus Erneuerbaren und für die Prognose von Lasten entwickelt werden. Neben anderen Daten z. B. aus dem Elektrizitätsmarkt bilden diese den Input für ein Optimierungsmodell, das eine optimale Betriebsführung für den normalen und gestörten Systembetrieb bestimmt. Darauf aufbauend werden koordinierte Betriebsstrategien mit der horizontalen und vertikalen Netzführung ermittelt. In den Untersuchungen erfolgt eine Analyse und Bewertung der Zuverlässigkeit im Virtuellen Kraftwerk mit Hilfe geeigneter Methoden.

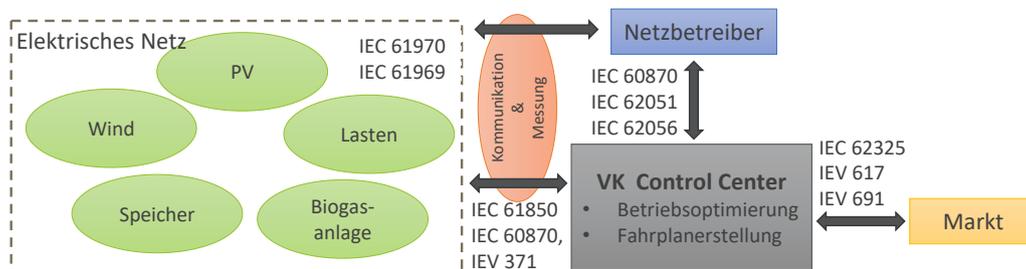


Abbildung 3.17: Struktur REGGEES.

### SmartMES – Intelligentes Multi-Energie-System<sup>12</sup>

Dieses Jahr ist an der Otto-von-Guericke-Universität das Forschungsprojekt „SmartMES“ (Intelligentes Multi-Energie-System) gestartet. Das Projekt wird vom Landesministerium für Wirtschaft, Wissenschaft und Digitalisierung des Landes Sachsen-Anhalt über Mittel des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE, siehe Abbildung 3.18) gefördert. Innerhalb der nächsten drei Jahre werden wissenschaftliche Mitarbeiter der Universität in Zusammenarbeit mit regionalen Unternehmen und Forschungseinrichtungen, namentlich die ABO Wind AG, das Fraunhofer IFF und die Stadtwerke Burg Energienetze GmbH (SWB), die innerhalb des Projektes als assoziierte Partner agieren, neue Konzepte und Ideen für eine umfangreiche Sektorenkopplung erarbeiten. Am Mittwoch, den 22.02.2017, fand in der Experimentellen Fabrik Magdeburg die feierliche Eröffnung des Landesprojektes statt. Auf diesem Kick-off-Meeting wurde unter anderem die zunehmende Auslastung der elektrischen Netze und der daraus resultierende Forschungsbedarf durch Prof. Wolter vom Institut für Elektrische Energiesysteme der Universität Magdeburg thematisiert. „Die Energiemengen können im elektrischen Netz allein nicht mehr abgeführt werden. Der erforderliche Netzausbau ist aber teuer und dauert zu lange. Daher müssen Netzbetreiber immer häufiger in die Erzeugung eingreifen und insbesondere Windenergieanlagen abschalten, um das Netz nicht zu überlasten. Das wiederum erhöht den CO<sub>2</sub> Ausstoß, da die nicht nutzbaren Energiemengen durch netztechnisch günstiger gelegene, konventionelle Kraftwerke kompensiert werden müssen.“

Die geschilderte Problematik ist der Hauptfokus des Projekts „SmartMES“. Dabei sollen effiziente und umweltfreundliche Kopplung der Energienetze für Strom, Gas und Wärme untersucht werden. In den letzten Jahren stiegen die Zulassungen von Elektro- und Hybrid-Fahrzeuge. Es ist davon auszugehen, dass die Anzahl der Erstzulassungen von Elektro- oder Hybrid-Fahrzeugen in den kommenden Jahren weiter zunehmen wird. Dementsprechend wurden die zu betrachtenden Sektoren um den Sektor Verkehr erweitert.

Ein „Intelligentes Multi-Energie-System“ dient einer Mehrfachnutzung von Infrastrukturen unterschiedlicher Sektoren. Mit Hilfe einer solchen Kopplung der einzelnen Netze können sowohl politische Ziel (z. B. Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen) als auch wirtschaftliche Ziele (z. B. Minimierung der Betriebskosten) zeitnah umgesetzt werden. Die wissenschaftlichen Mitarbeiter der Otto-von-Guericke-Universität verfolgen mehrere Optimierungsansätze. So können beispielsweise durch eine optimale Synergie und Flexibilität dieser Kopplung die kostenintensiven Redispatchmaßnahmen minimiert werden. Ein weiterer Forschungsansatz ist die lokale Speicherung von elektrischer Energie. Hinsichtlich dieses Aspektes werden sowohl herkömmliche elektrische Speicher sowie Gasspeicher (H<sub>2</sub>-Speicher und CH<sub>4</sub>-Speicher) in Betracht gezogen. Dafür werden aktuell alle Sektoren analysiert und die entsprechenden Potenziale evaluiert. Hierbei sind sowohl technische Faktoren wie z. B. die jeweilige Auslastung, die Kopplungsmöglichkeiten oder Verluste, die durch den Transport, Umwandlung, Speicherung oder die Rückgewinnung entstehen können, als auch wirtschaftliche Aspekte, wie z. B. Anschaffungskosten, Fixkosten, Vergütungen, Prämien, Umwandlungskosten oder Steuern von besonderem Interesse.

Zu Beginn der Bearbeitung von „SmartMES“ wurde eine detaillierte Literaturrecherche durchgeführt. Diese Recherche umfasste sämtliche Sektoren, Umwandlungsmöglichkeiten und Speicherelemente. Zusätzlich wurden Recherchen zur Wirtschaftlichkeit der einzelnen Elemente durchgeführt. Auf den darauffolgenden Projekttreffen wurden die Ergebnisse diskutiert und analysiert. Anschließend wurden die zu betrachtenden Sektoren, Bindeglieder und Speicher festgehalten. Das Strom- und Gasnetz wurden vom Lehrstuhl Elektrische Netze und Erneuerbare Energie bereits in MATLAB implementiert und simuliert. Des Weiteren wurden die Wärmepumpe als Bindeglied und die Elektrolyse als Umwandlungsprozess von den Lehrstühlen Technische Thermodynamik

---

<sup>12</sup>von M. Sc. Nicola Gast

und Thermischen Verfahrenstechnik mittels MATLAB nachgebildet. Ein allgemeingültiger Aufbau einer Methodik für eine Wirtschaftlichkeitsanalyse wurde ebenfalls erstellt.



Abbildung 3.18: Gefördert als Förderprojekt des Landes Sachsen-Anhalt durch den Europäischen Fond für regionale Entwicklung (EFRE)

### WindNODE<sup>13</sup>

Die steigende Anzahl an erneuerbaren Energieträgern (RES) stellt das Energiesystem in zunehmendem Maße vor größere Herausforderungen. Ihr fluktuierendes, schwer planbares und nur bedingt steuerbares Einspeiseverhalten wirken sich direkt auf die Qualität und Stabilität der Energiebereitstellung aus. Zudem erschwert die immer stärkere Zerstreuung der Erzeugung eine zentrale Netzführung mit wenigen Anlagen, wie sie bisher durchgeführt wird.

Um diesen Herausforderungen zu begegnen, bedarf es eines umfassenden Ansatzes, welcher sich nicht nur auf die Erzeugung konzentriert, sondern auch Potentiale neuartiger Betriebsmittel (Speicher, Elektrofahrzeuge, etc.) sowie die Verbrauchsseite miteinschließt. Mit Hilfe von Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) sollen zukünftig mehr Akteure an die Systemführung angebunden werden, um die bestehenden Potentiale heben zu können und die Flexibilität im Verbrauch sowohl für den Stromkunden (mit Hilfe entsprechender Marktanreize) als auch für den Netzbetreiber positiv zu nutzen. Die Struktur des Vorhabens ist in Abbildung 3.19 dargestellt.

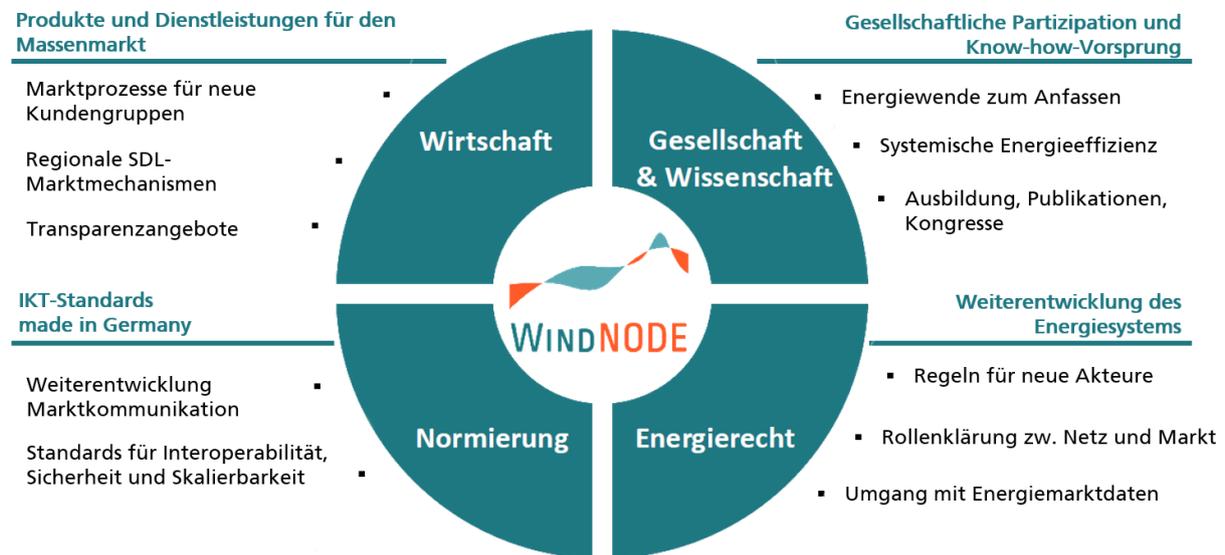


Abbildung 3.19: Struktur *WindNODE*

Als eines von fünf Schaufensterprojekten des Förderprogramms „Schaufenster intelligente Energie - Digitale Agenda für die Energiewende“ (SINTEG) hat sich das Projekt *WindNODE* zum Ziel gesetzt, den Beweis zu erbringen, dass die Energiewende technologisch und ökonomisch erfolgreich sein kann. Das Projekt soll demonstrieren, dass auch bei überwiegenden Anteilen erneuerbarer Energien der Strom dann, wenn Wind und Sonne ihn liefern, sinnvoll genutzt oder effizient

<sup>13</sup> von M. Sc. Stephan Balischewski

gespeichert werden kann. Neben der leistungsfähigen IKT-Plattform sind flexible Energienutzer wie Kühllhäuser, Wärmespeicher oder Elektrofahrzeuge und „Smart Home/Factory“ Anwendungen zentrale Elemente dieses Konzeptes. Im Mittelpunkt des Geschehens stehen jetzt Stromkunden und Kleinerzeuger, welchen Instrumente und Informationen zur Verfügung gestellt werden, mit denen sie aktiv an der Stabilisierung des Systems mitwirken und somit die Energiewende mitgestalten können.

Hierfür hat sich ein starkes Konsortium, bestehend aus 50 Verbundpartnern und weiteren 30 assoziierten Partnern, gebildet, zu dem führende Technologieunternehmen ebenso wie große Stromerzeuger und -abnehmer oder Netzbetreiber gehören.

#### 3.2.3 Promotionen

In diesem Jahr wurden am LENA keine Doktoranden promoviert.

#### 3.2.4 Veröffentlichungen

##### Zeitschriften- und Konferenzbeiträge

- [1] P. Trojan, M. Wolter und P. Komarnicki, „Agent based power system management – Concept of congestion management“, in *2017 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*, Mai 2017, S. 1–6. DOI: 10.1109/EPE.2017.7967295.
- [2] I. Chychykina, C. Klabunde und M. Wolter, „Comparison of different redispatch optimization strategies“, in *2017 IEEE Manchester PowerTech*, Juni 2017, S. 1–6. DOI: 10.1109/PTC.2017.7981077.
- [3] Y. Zhang, C. Klabunde und M. Wolter, „Impact of DFIG-based wind generator on dynamic behavior of power systems during over-frequency events“, in *Power and Energy Student Summit (PESS) 2017*, Juni 2017, S. 1–5.
- [4] P. Trojan, M. Richter, I. Hauer, M. Wolter, P. Komarnicki und A. Naumann, „Umsetzung eines Echtzeitüberwachungs- und -steuerungssystems im 110-kV-Verteilungsnetz“, in R. OTTI, Hrsg. Steigenberger Hotel am Kanzleramt, Berlin, Jan. 2017, S. 1.
- [5] D. Westermann, M. Wolter, P. Komarnicki, S. Schlegel, A. Richter, B. Arendarski und R. Schwerdfeger, „Control strategies for a fully RES based power system“, in *Proc. of 2017 ETG Congress Die Energiewende - Blueprint for the new energy age*, Nov. 2017.
- [6] H. H. Zurn, D. Tenfen, J. G. Rolim, A. Richter und I. Hauer, „Electrical energy demand efficiency efforts in Brazil, past, lessons learned, present and future: A critical review“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 67, Nr. Supplement C, S. 1081–1086, 2017, ISSN: 1364-0321. DOI: 10.1016/j.rser.2016.09.037. Adresse: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116305299>.
- [7] A. Richter, C. Klabunde, M. Wolter und J. Gronau, „Renewable Energy Forecasting Optimization for System Operator and Trader“, in *in Proc. of 2017 IEEE PES General Meeting*, Juli 2017.
- [8] A. Richter, C. Ziegler, N. Moskalenko und M. Wolter, „Das Virtuelle Kraftwerk als gewinnorientierter Akteur mit verteilnetzunterstützendem Potential“, in *4. OTTI-Konferenz Zukünftige Stromnetze für Erneuerbare Energien*, Bd. 4, Jan. 2017.

- [9] C. Brosinsky, A. Kummerow, A. Naumann, A. Krönig, S. Balischewski und D. Westermann, „A new development platform for the next generation of power system control center functionalities for hybrid AC-HVDC transmission systems“, in *2017 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, Juli 2017.
- [10] V. Spielmann, H. Wenzl, H. Beck, M. Danzer, A. Gitis, C. Klabunde, J. Barillas, T. Kneiske, K. Koring, S. Lux, N. Moskalenko und M. Naumann, „Potentiale elektrochemischer Speicher – Flexibilität im künftigen Stromversorgungssystem“, Jg. 3, S. 56–59, März 2017, ISSN: 1619-5795.
- [11] V. Spielmann, H. Wenzl, H. Beck, M. Danzer, A. Gitis, C. Klabunde, J. Barillas, T. Kneiske, K. Koring, S. Lux, N. Moskalenko und M. Naumann, „Potentiale elektrochemischer Speicher - Einsatzmöglichkeiten in Netzen und im Regelleistungsmarkt“, Jg. 4, S. 54–58, Apr. 2017, ISSN: 1619-5795.
- [12] C. Klabunde, N. Moskalenko, A. Richter, I. Hauer und M. Wolter, „Referenzarchitektur für die Integration von Energiespeichern in den Energiemarkt“, in *4. OTTI-Konferenz Zukünftige Stromnetze für Erneuerbare Energien*, Bd. 4, Jan. 2017.
- [13] A. Richter, N. Moskalenko, I. Hauer, T. Schröter und M. Wolter, „Technical integration of virtual power plants into German system operation“, in, N. IEEE Piscataway, Hrsg. Dresden, Germany, Juni 2017, S. 6. DOI: 10.1109/EEM.2017.7981876.
- [14] M. Gebhardt und M. Wolter, „Optimal placement and operation strategies of phase shifting transformers based on heuristic algorithms“, in *NEIS 2017: Conference on sustainable energy supply and energy storage systems*, Sep. 2017.
- [15] S. Balischewski, C. Wenge, I. Hauer, P. Lombardi, P. Komarnicki und M. Wolter, „Battery Storage Services that Minimize Wind Farm Operating Costs: A Case Study“, in *2017 ISGT Europe Torino*, Sep. 2017.
- [16] P. Kühne, M. Wenske, M. Heuer und M. Wolter, „Unitized reversible PEM fuel cells for flexible electrical energy storage“, in *proc. International ETG Congress 2017, Bonn*, S. 369–374, Nov. 2017, ISSN: 978-3-8007-4505-0.

#### Beiträge zu Kolloquien u. a. Vorträge

- [1] T. Schröter und M. Wolter, „Optimierung der Kombiprognose für die Vorhersage der Einspeisung aus Erneuerbaren Energien“, in *Dresdener Kreis 2017*, März 2017.
- [2] M. Gebhardt und M. Wolter, „Konzepte für einen optimierten Betrieb von Phasenschiebertransformatoren“, in *Dresdener Kreis 2017*, März 2017.
- [3] N. Gast und M. Wolter, „Preiszonенübergreifende Kraftwerkseinsatzplanung in Verbundnetzen mit mehreren Marktgebieten“, in *ILMA 2017*, Juni 2017.
- [4] S. Balischewski und M. Wolter, „SGESS - Speicherbetriebsstrategien und Erfahrungen“, in *ILMA 2017*, Juni 2017.
- [5] P. Trojan und M. Wolter, „Agentenbasiertes Energiemanagement“, in *ILMA 2017*, Juni 2017.
- [6] E. Glende und M. Wolter, „Advances in HVDC Station Control“, in *Invited Session of 2017 IEEE PES General Meeting*, Juli 2017.
- [7] —, „HIL-Grid Model on Opal-RT for testing future Grid Control Centers“, in *RT17 – A new era of real time simulation*, Sep. 2017.
- [8] N. Gast und M. Wolter, „Sektorenkopplung – Eine echte Alternative im Verteilnetz?“, in *19. Forschungskolloquium am Fraunhofer IFF*, Nov. 2017.

### 3 Forschung

- [9] A. Richter, I. Hauer und M. Wolter, „Systemstabilisierung durch Virtuelle Kraftwerke – Einflüsse von Betriebsführungsstrategien auf den überlagerten Verteilnetzbetreiber“, in *19. Forschungskolloquium am Fraunhofer IFF*, Nov. 2017.
- [10] P. Kühne und M. Wolter, „Unitäre reversible PEM-Brennstoffzellen für die flexible elektrische Energiespeicherung“, Nov. 2017.

### 3.3 Lehrstuhl für Elektromagnetische Verträglichkeit

#### 3.3.1 Forschungsprofil

Vier wesentliche Schwerpunkte werden durch das Forschungsprofil des Lehrstuhls für Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) abgedeckt:

- Analyse und Modellierung komplexer Systeme,
- EMV-Messverfahren,
- EMV in der Medizintechnik,
- Netzzrückwirkungen und Power Quality.

Die EMV-Analyse und Modellierung komplexer Systeme beinhaltet insbesondere die Analyse der Ein- und Auskopplung elektromagnetischer Felder in/aus Systeme und Verkabelung, die Modellierung der Verkopplung im System und die Ein- und Auskopplung in/aus Komponenten. Einerseits steht die stochastische Einkopplung in Leitungen im Focus. Stochastische elektromagnetische Felder treten in Modenverwirbelungskammern oder elektrisch großen und geometrisch komplexen Hohlraumresonatoren wie Flugzeugrümpfen auf. Die Analyse der Einkopplung dieser Felder in Leitungen und alternativ die Einkopplung von elektromagnetischen Feldern in stochastische Leitungsstrukturen ist essentiell für die EMV-Analyse komplexer Systeme. Am Lehrstuhl werden die entsprechenden Theorien entwickelt und verifiziert.

Ziel weiterer Arbeiten ist es, EMV-gerechte Systeme kosteneffizient zu entwerfen, d. h. Methoden und Modelle für eine Bearbeitung der EMV in der Konstruktions- und Designphase zur Verfügung zu stellen. Dabei stehen die EMV automatisierter Elektroantriebe und die EMV im Kfz im Focus der Forschungsaktivitäten. Auch interdisziplinäre Aktivitäten, wie z. B. die Fehlerortung in Energieversorgungskabeln können diesem Forschungsschwerpunkt zugeordnet werden.

Der Themenkomplex der EMV-Messverfahren beinhaltet insbesondere die Weiterentwicklung von EMV-Mess- und Prüfverfahren. Insbesondere die Modenverwirbelungskammer (MVK) als alternative Messumgebung wird intensiv erforscht, ebenso der Vergleich von Emissionsmessungen und Störfestigkeitstests zwischen etablierten und alternativen Messumgebungen.

Medizintechnische Geräte erfordern eine besondere Beachtung der EMV, um den zuverlässigen Betrieb in jeder Situation sicherzustellen, woraus sich ein weiterer Forschungsschwerpunkt ableitet. Dabei steht aber nicht nur die EMV von medizintechnischen Produkten im Focus der Arbeiten, auch die Beeinträchtigung von bildgebenden Verfahren in der Diagnostik durch die Rückwirkung von medizinischen Werkzeugen, Implantaten oder Geräten ist Inhalt der Forschungsaktivität. Dabei ist der Lehrstuhl aktiv in den Forschungscampus Medizintechnik eingebunden.

Der vierte Schwerpunkt Netzzrückwirkungen und Power Quality leitet sich aus dem verstärkten Einsatz von leistungselektronischen Betriebsmitteln in elektrischen Versorgungsnetzen ab, da diese Rückwirkungen im elektrischen Energieversorgungsnetz bedingen. Die Forschungsschwerpunkte der Arbeitsgruppe liegen bei der Analyse und Modellierung des Verhaltens von Oberschwingungen (bis 2 kHz) und Supraharmonischen (2 kHz bis 150 kHz) sowie der Entwicklung geeigneter Maßnahmen zur Sicherstellung der Spannungsqualität im Niederspannungsnetz, z. B. durch den Einsatz geeigneter Filtertechnologien.

### 3.3.2 Forschungsprojekte

#### **Projekt EREBAQ: Einfluss regenerativer Einspeisung und energieeffizienter Betriebsmittel auf Spannungsqualität und elektromagnetische Verträglichkeit<sup>14</sup>**

Das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderte Vorhaben umfasste die Konzeption, Anschaffung, Installation und Inbetriebnahme eines Versuchsstandes bestehend aus einem hochleistungsfähigen Netzsimulator, einem PV-Simulator, verschiedenen elektronischen Lasten und adäquatem Messequipment. Das System ist nun vollständig in bereits bestehende Laborhallen integriert. Zusammen mit bereits vorhandener Laborausstattung wird damit eine umfassende Analyse nichtlinearer Betriebsmittel und Erzeuger auf die Spannungsqualität und die EMV im Rahmen künftiger wissenschaftlicher und industrieller Forschung ermöglicht. Mit Hilfe der angeschafften Technik können offene Fragestellungen bei der Einspeisung regenerativer Quellen in elektrische Netze und der Zunahme von nichtlinearen Lasten bearbeitet werden. Insbesondere die gegenseitige Verkopplung der erzeugten Oberschwingungen und hochfrequenter Störungen wird bereits experimentell untersucht. Zudem wird die Anlage in studentischen Projekten zur Forschung eingesetzt.

Projektzeitraum: 01.09.2015 bis 30.09.2017



Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Abbildung 3.20: Netzsimulationsanlage

#### **Simulation der Einkopplung statistischer Felder in Mehrfachleitungsstrukturen<sup>15</sup>**

Das Projekt dient der Beschreibung der Einkopplung statistischer Felder, wie sie in großen Hohlraumresonatoren vorkommen, in Mehrfachleitungsstrukturen. Dazu sollen verschiedene Mehrfachleitungsstrukturen untersucht werden, die in Abbildung 3.21 dargestellt sind. Die hier untersuchten Leitungen sollen auf gleichförmigen Mehrfachleitungen beschränkt bleiben. Das Simulationsmodell basiert auf der etablierten Beschreibung durch eine Mehrfachleitungs-BLT-Gleichung mit Supermatrizen. Hierbei soll die Einkopplung nur einer ebener Welle auf die Anregung durch ein statistisches Feld erweitert werden.

Das Simulationsmodell erlaubt eine schnelle Untersuchung des Einflusses verschiedener Parameter, wie die Leitungslänge, der Abstand zwischen den Leitern oder die Anordnung der Leiter auf

<sup>14</sup> von M. Sc. Anke Fröbel

<sup>15</sup> von M. Sc. Johanna Kasper

den Mittelwert des Betrags bzw. des Betragsquadrats der eingekoppelten Spannung oder des eingekoppelten Stroms in die Mehrfachleitung.

Die Simulationsergebnisse können mit Messungen, die in der großen Modenverwirbelungskammer (MVK) des Lehrstuhls für elektromagnetische Verträglichkeit durchgeführt wurden, verglichen werden.

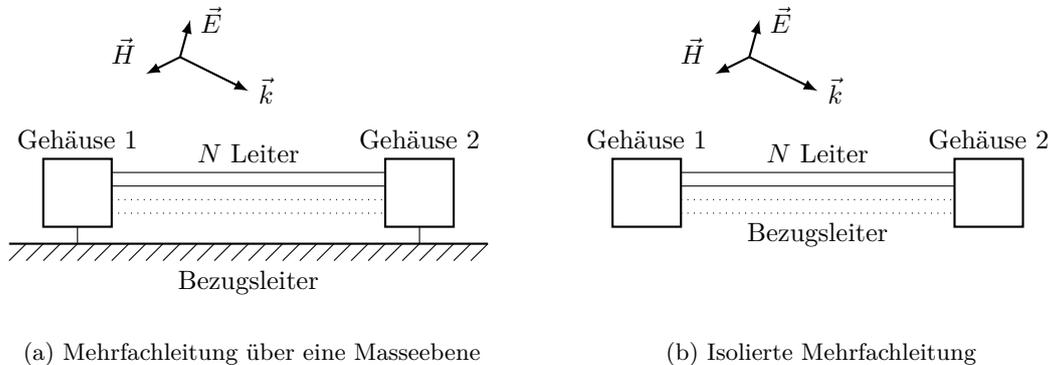


Abbildung 3.21: Beispiele für Mehrfachleistungsstrukturen

### Implementierung eines Ablations-MRT-Hybridsystems<sup>16</sup>

**Motivation** Die Nutzung der Magnetresonanztomographie (MRT) zur Begleitung der Radiofrequenz-Ablation ermöglicht die Elektroden-Positionierung mit sehr guten Weichgewebekontrast und die Aufnahme von Temperaturkarten. Der Ablationsgenerator ist aber nicht MR-kompatibel was den Aufbau der Ablation verkompliziert (siehe Abbildung 3.22a).

Die Idee des Ablations-MRT-Hybridsystems besteht darin, wie in Abbildung 3.22b gezeigt, die Ablationselektrode direkt am Hochfrequenzverstärker des MR-Gerätes anzuschließen. Der separate Ablationsgenerator wäre somit obsolet.

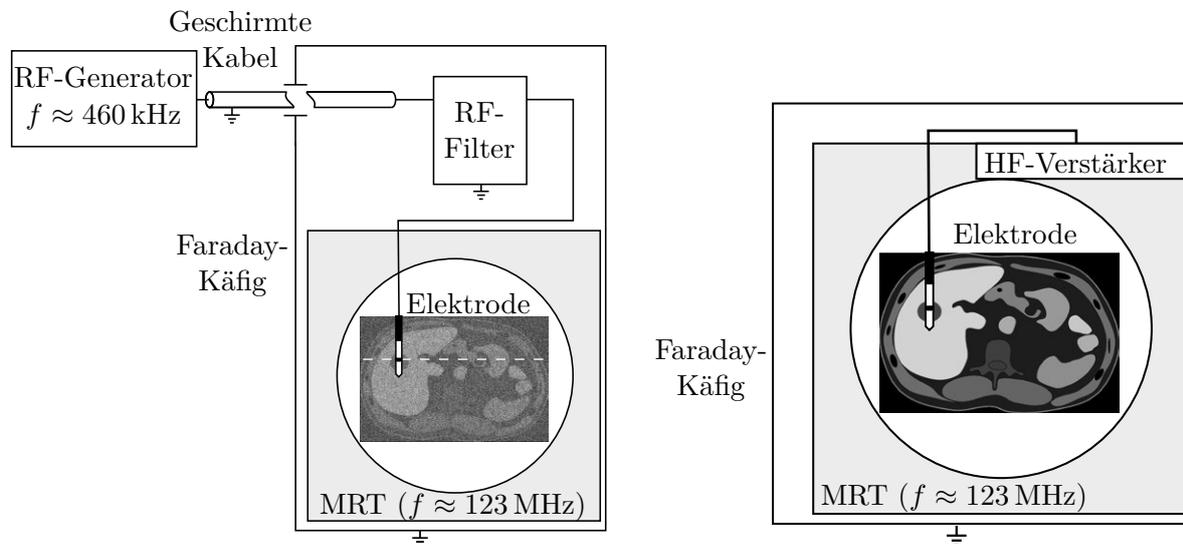
**Methoden** Es wurden elektromagnetische sowie Wärmeleitungssimulationen durchgeführt, um die Ablation mit der Larmorfrequenz für ein 3 T-MR-Gerät ( $f \approx 123$  MHz) numerisch zu beschreiben. Dabei wurde die Temperaturabhängigkeit der dielektrischen und thermischen Eigenschaften eines Leber-Phantoms beachtet.

Das Konzept der Ablation durch Anschluss einer Elektrode am MRT wurde mit einem realitätsnahem Polyacrylamide-Phantom für ein 3 T-MR-Gerät validiert.

**Ergebnisse** Die Simulationen zeigten, dass die Ablation mit der Larmorfrequenz Merkmale aufweist der konventionellen Radiofrequenz-Ablation mit 460 kHz und der Mikrowellenablation mit 900 MHz. Experimentelle Versuche in einem Polyacrylamide-Phantom zeigten, dass mit einem Elektroden-Leiterschleifen System Temperaturen über 100 °C generiert werden konnten. Mit dem Ablationssystem konnten MRT-Signale aufgenommen werden, welche mit dem simulierten Verlauf der Magnetfeldverteilung eines Elektroden-Leiterschleifensystems korrelierten.

<sup>16</sup> von M. Sc. Thomas Gerlach

**Ausblick** Zukünftige Verbesserungen des Hybridsystems sollen die Anbindung am MRT vereinfachen, eine zur Ablation parallele Thermometrie ermöglichen, sowie soll der Ansatz verfolgt werden die Ablationsströme im MRT zu visualisieren.



(a) Aufbau einer MRT-geführten Radiofrequenzablation (b) Konzept des Ablations-MRT-Hybridsystems

Abbildung 3.22: Vergleich des Aufbaus einer MRT-geführten Radiofrequenzablation mit dem des Ablations-MRT-Hybridsystems

### Elektromagnetische Verträglichkeit bei Radnabenmotoren<sup>17</sup>

Im Zuge des COMO-Projektes wurde die Elektromagnetische Verträglichkeit bei Radnabenmotoren untersucht. Bei dem im COMO-Projekt entwickelten Motor ist die Leistungselektronik im Motorengehäuse verbaut. Die von der Elektronik erzeugten hochfrequenten Störgrößen müssen von dem Motorengehäuse abgeschirmt werden. Ein besonderes Augenmerk wurde dabei auf die Lager gelegt. Die Lager sind unerlässlich, um eine Bewegung zwischen Welle und Gehäuse zu ermöglichen. Sie sind allerdings auch Schwachstellen in der elektromagnetischen Schirmung. Es wurde ein Ersatzschaltbild für ein Kugellager beschrieben. Die elektrischen Eigenschaften werden vor allem durch den Übergang zwischen den Lagerschalen und den Kugeln bestimmt. Der Übergang kann mit einem Ersatzschaltbild in Abbildung 3.23 beschrieben werden.

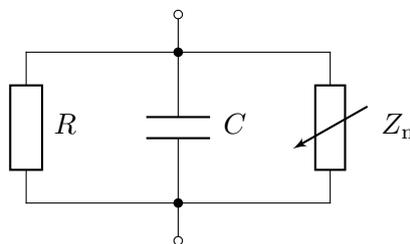


Abbildung 3.23: Ersatzschaltbild für den Übergang einer Lagerschale zu den Lagerkugeln oder Walzen

Der nichtlineare Widerstand  $Z_n$  bildet elektrische Entladungen ab, die bei höheren Spannungen an der Grenzschicht entstehen können. Die Bestimmung der einzelnen Parameter ist nicht ganz unproblematisch, da der Übergang nicht gleichförmig ist und die Parameter schwanken. Zusätzlich

<sup>17</sup> von M. Sc. Matthias Hirte

sind sie von der Belastung und Drehzahl des Lagers abhängig. Die Abhängigkeiten wurden untersucht. Ziel der Untersuchungen war zum einen, die elektromagnetische Schirmwirkung der Lager beschreiben zu können, und zum anderen Ströme, die über die Lager fließen, modellieren zu können.

### Streuung an Hohlraumresonatoren mit kleinen Aperturen und nicht linearer Beladung<sup>18</sup>

Die Einflüsse von Öffnungen in leitfähigen Wänden von Hohlraumresonatoren auf die innere Feldverteilung sind entscheidend für die Kenntnis der Schirmdämpfung eines Gehäuses. Aktuelle Arbeiten beschreiben die durch die Apertur hervorgerufene Kopplung eines äußeren elektromagnetischen Feldes mit dem inneren Feld. So angeregte Hohlraummoden können gerade im hochenergetischen Resonanzfall weitere Strukturen, wie nichtlineare Bauelemente, anregen. Die auftretenden Demodulationseffekte an der Nichtlinearität koppeln dann mit dem inneren Feld des Resonators und über die Apertur auch mit dem äußeren Feld. Diese Arbeit untersucht anhand eines neuen analytischen Modells den eingekoppelten Strom auf einer nichtlinear belasteten Leiterschleife, wenn das System durch ein äußeres einfallendes Feld angeregt wird. Dabei wird Bezug genommen auf eine Anordnung, die, ohne Beschränkung der Allgemeinheit, eine Beachtung nur des magnetischen Feldes nötig macht (siehe Abbildung 3.24). Zur Lösung der auftretenden Integralgleichungen wird ein Verfahren zur analytischen Regularisierung der Greenschen Funktionen genutzt, um die klassische Theorie der Aperturkopplung nach Bethe zu verallgemeinern. Die so im Frequenzbereich bestimmten linearen Systemeigenschaften können im Anschluss im Zeitbereich auch auf nichtlineare Lasten verallgemeinert werden.

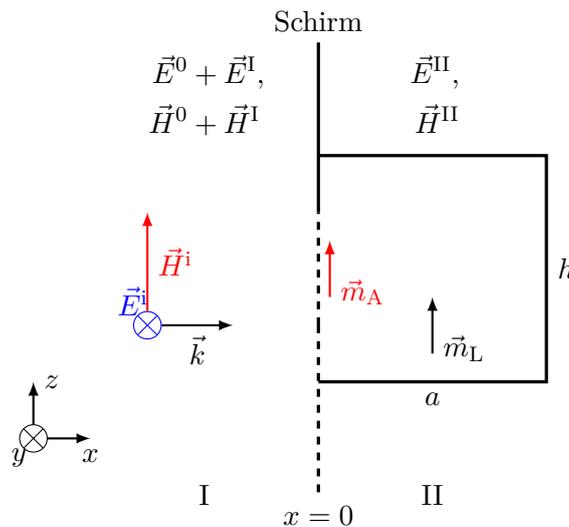


Abbildung 3.24: Schematische Darstellung der untersuchten Konfiguration

### Ganzheitliche Optimierung energieeffizienter Antriebslösungen für Elektrofahrzeuge (GENIAL)<sup>19</sup>

Im Rahmen des Verbund-Projektes GENIAL wird ein Demonstrator für E-Fahrzeuge entworfen. In einem Teilprojekt ist die Aufgabe des Lehrstuhls, EMV-Störaussendungen und die gegenseitige Beeinflussung der Komponenten des Demonstrators zu identifizieren und zu beseitigen. Zum Erstellen der Modelle für simulative EMV-Untersuchungen wurden Messungen für die Gleichtakt-

<sup>18</sup> von Dipl.-Phys. Jörg Petzold

<sup>19</sup> von M. Sc. Moustafa Raya

und Gegentaktimpedanz, der Einzelkomponenten durchgeführt. Mit Hilfe verschiedener Methoden wie Vektorfitting und 3D-Feldsimulationen wurden Simulationsmodelle entworfen, die das Verhalten der Komponenten bei hohen Störfrequenzen nachbilden können. Dazu gehört auch ein EMV-Modell der Traktionsbatterie, das hier als Beispiel kurz näher erläutert wird.

Ein 3D-Modell des Batteriesystems für die Feldsimulation ist in Abb. 3.26 dargestellt. Die Traktionsbatterie besteht aus einer Vielzahl von prismatischen Zellen des Lithiumeisenphosphat-Typs (Li-FePO<sub>4</sub>), die in Reihe geschaltet sind, um die nötige HV-Spannung zu erreichen. Der Innenaufbau der Einzelzellen besteht aus mehreren Aluminium- und Kupfer-Schichten, die übereinander gefaltet sind. Zwischen den Schichten befinden sich, zusammen mit einem Elektrolyt und einem Separator, Elektroden aus Graphit und LiFePO<sub>4</sub>-Material. Der positive Pol (+-Pol) ist mit den Aluminiumschichten und der negative Pol (--Pol) mit den Kupferschichten verbunden. Im Simulationsmodell wurde die komplexe innere Struktur der Batterie, bestehend aus Multielektroden, Elektrolyten und Separator als Massivleiter nachgebildet. Die effektiven Werte der Permeabilität und der elektrischen Leitfähigkeit wurden zuerst berechnet und anschließend im Lauf der Parametrisierung im Simulationsmodell angepasst. In Abb. 3.25a werden die Simulationsergebnisse mit den durchgeführten Messungen verglichen. Die Messungen und Simulationen zeigen eine gute Übereinstimmung.

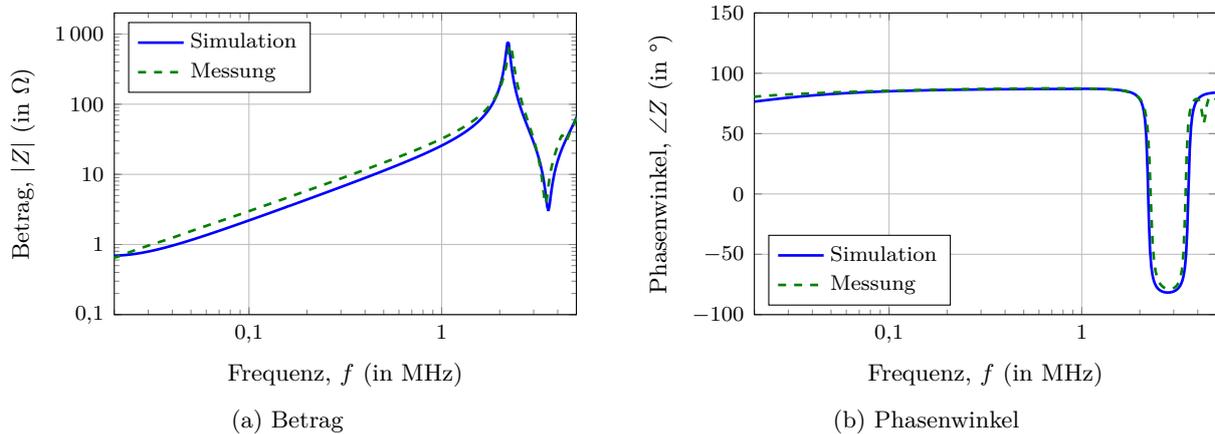


Abbildung 3.25: Messung und Simulation der Gegentaktimpedanz der Traktionsbatterie

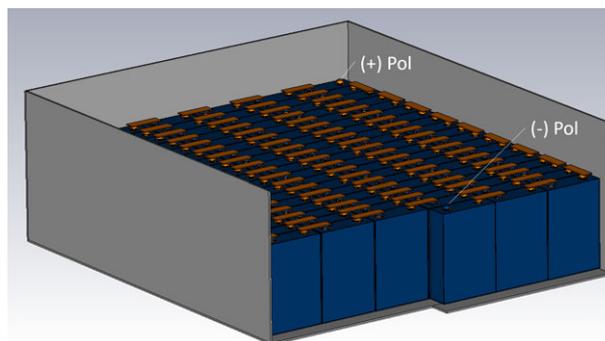


Abbildung 3.26: Simulationsmodell der Traktionsbatterie

**Danksagung** Diese Arbeit wurde unter dem Kennzeichen 16EMO0120K vom Bundesministerium für Bildung und Forschung aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.



### Propagation of Current Waves along a Transmission Line with Randomly Located Non-Uniformities in Rectangular Resonator<sup>20</sup>

The propagation of high-frequency current waves along stochastic transmission lines in rectangular cavities was investigated using the method of symmetrical lines in resonators (MoSL) of canonical forms. This method yields an exact solver for the arbitrary excitation of the wire, including distributed excitation, lumped excitation(s) and arbitrary number of loads, which can be considered as controlled sources.

The stochastization of the line is created by an stochastically arranged chain of lumped impedances, which can have as reactive as well as lossy components. Using this model, one also can take into account a stochastic geometry of the line, by the expansion of the deviation of the vertical coordinate of the transmission line from the horizontal one into a sin-Fourier series, a further definition of a deviation of the inductance and capacitance per-unit-length from their uniform values and quantization of these values. Calculations in the considered method are greatly facilitated by the fact that for each Fourier mode, an amplitude of the lumped potential and its position define only the nominator of the corresponding Fourier series coefficient through a simple trigonometric function. The denominator, including a one-dimensional summation and depending from the transversal geometry of resonator, is the same for each of the elements. The method can be used to obtain statistical moments of the current and the square of its absolute value as well as for the PDF of these values.

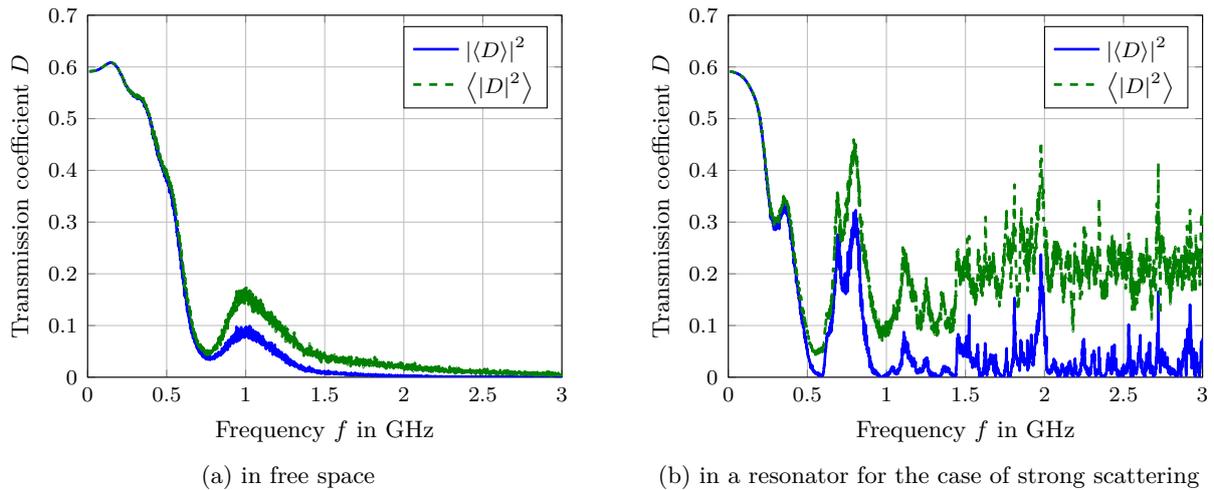


Figure 3.27: Comparison of the statistical moments of the „transmission coefficient“ defined as  $D = 2I(h) \cdot Z_c / U$  for a transmission line

The research has shown a significant difference between the propagation of current waves along a transmission line with stochastically arranged loads (TL with stochastic geometry) in free space (see Fig. 3.27a) and in a resonator (see Fig. 3.27b).

The corresponding parameters are listed below.

Resonator:  $a = 0.3 \text{ m}$ ,  $b = 0.53 \text{ m}$ ,  $h = 0.79 \text{ m}$

Transmission line:  $x_0 = a/2$ ,  $y_0 = b/2$ ,  $r_0 = 1 \text{ mm}$ ,  $l = h$ ,  $H_{t1} = x_0$  (height above the ground plane)

Loads:  $Z(0) = Z(h) = Z_c$ ,  $Z_1 = Z_2 = Z_3 = j\omega L + R$ ,  $L = 0.1 \mu\text{H}$ ,  $R = 50 \Omega$

<sup>20</sup> von Dr. rer. nat. Sergey Tkachenko, Prof. Dr. rer. nat. habil. Jürgen Nitsch, M.Sc. Moustafa Raya und Prof. Dr.-Ing. Ralf Vick

### 3 Forschung

Position of the loads:  $z_{01} = 0.2h$ ,  $z_{02} = 0.4h$ ,  $z_{03} = 0.6h$ ,  $z_{04} = 0.8h$

Gauss distribution:  $\sigma = h/30$

In the first case, the average square of the absolute value of the transmission coefficient exponentially tends to be zero with increasing length of the line because of interference phenomena for current waves.

In the second case, on average, the current can penetrate through the stochastic chain of the loads (TL with stochastic geometry) due to the re-reflection of the signal from the walls of the resonator.

#### Experimentelle Analyse eines RFID-Tunnelgates<sup>21</sup>

Die *Radio Frequency Identification* (RFID) wird zur Objekterkennung in der Logistik benutzt. Zur Abschirmung des Lesebereich und zur Absenkung von Falschauslesungen, findet die Identifizierung der RFID-Tags häufig in einem metallischen Tunnelgate statt, das Ähnlichkeiten mit einer elektromagnetische Modenverwirbelungskammer aufweist. Im Projekt wurde eine experimentelle Analyse zur Optimierung eines solchen RFID-Tunnelgates durchgeführt. Um die Optimierungsmöglichkeiten herauszustellen, wurde ein Messobjekt mit UHF-RFID-Transpondern für den Frequenzbereich von 865 MHz bis 868 MHz, welche nach dem *EPC Class 1 Gen 2* Standard aufgebaut sind, mittels eines Linearförderers durch ein Tunnelgate transportiert. Durch eine Variation der Anzahl von Antennen, der Sendeleistung und der Geschwindigkeit des Linearförderers wurde eine optimale Konfiguration des Tunnel-Gates ermittelt, die eine möglichst hohe Lese- und Erkennungsrate ermöglicht, um Zeit und damit Kosten einzusparen.



Abbildung 3.28: Tunnelgate und Linearförderer zur Optimierung der Lese- und Erkennungsrate von RFID-Tags

<sup>21</sup> von Dr.-Ing. Mathias Magdowski, B. Sc. Daniel Grefkes und Dipl.-Ing. Martin Kirch

### **Circuit Approximation of the Reflection Coefficients for the Asymptotic Approach and the SEM Method<sup>22</sup> und Prof. Dr. Farhad Rachidi**

The singularity expansion method (SEM) method, developed by C. E. Baum, F. M. Tesche, D. Giri and other researchers in the earlier 70th, allows to describe the high-frequency electromagnetic response of different scattering objects both in frequency and time domain and can be used for identification of scattering systems. However, the main method of obtaining the SEM expansion for the system of general view is the processing of numerical (e.g. obtained by the method of moments) data. On the other hand, the application of the SEM to thin-wire systems (e.g. antennas and transmission lines) has several specific features, which allows to obtain analytical results.

The case of a long transmission line can be treated by the so named asymptotic approach, which yields parameters for the SEM expansion. The key role in the application of the asymptotic approach for the SEM play the reflection coefficients for TEM waves. In earlier work, they were obtained using an analytical iteration method by an analysis of numerical results. In this work, we have shown that these high-frequency reflection coefficients can be obtained using a concept of the additional high-frequency terminal impedance (terminal reactance plus terminal radiation resistance) and usual equations of TL theory, and apply then these knowledge for the SEM.

On the first step, by using the method of induced EMF, we calculate the additional complex power on the terminal by integrating a product of complex conjugate current and scattered field with a negative sign (with subtracted TL contribution) along the wire. The scattered field can be found as an integral of the current with the corresponding scalar Green's function kernel using the mixed-potential integral equations (MPIE). In this way, the additional complex power is given by the double integral of the product of the current and the complex conjugate current with different argument and their derivatives and some kernels constructed from the scalar Green's function. Then we define the terminal impedance using the usual electrical engineering relations between power, terminal current and lumped impedance for the short-circuited line and power, terminal voltage and lumped impedance for the open-circuited wire.

The terminal impedance can be represented as a terminal reactance (inductive for the short-circuited line and capacitive for the open-circuited line) plus a terminal radiation resistance. Then, the reflection coefficient is defined by the usual equations from the classical transmission line approximation. By direct analytical calculations, it was shown that at least in the first approximation of the small TL parameters ( $1/2 \ln(2h/r_0)$ , where  $h$  is the height of the line and  $r_0$  is the radius of the wire), the reflection coefficients obtained by the circuit approximation and perturbation theory coincide both for the open-circuited and short-circuited wire.

### **Numerische Berechnung der komplexen Resonanzfrequenzen beliebiger Drahtstrukturen<sup>23</sup>**

Die SEM ist nicht nur aus theoretischer Sicht eine nützliche Sichtweise auf die Systemantwort von Leitungsstrukturen. Die Position der komplexen Singularitäten eines Systems, die anregungsunabhängig sind, ist stark mit den Maxima der Systemantwort im reellen Frequenzbereich verbunden. Daher kann man von der Position der Singularitäten auf kritische Frequenzen zur Feldeinkopplung schließen.

Die Singularitäten sind für jede Leitungsstrukturen wahrscheinlich einzigartig in der komplexen Ebene angeordnet. Dabei treten die SEM Pole in verschiedenen Schichten, welche ungefähr parallel zur Frequenzachse verlaufen, auf. Die Position der Singularitäten in der ersten Schicht

<sup>22</sup> von Dr. rer. nat. Sergey Tkachenko, M. Sc., Felix Middelstädt, Prof. Dr. rer. nat. habil. Jürgen Nitsch, Prof. Dr.-Ing. Ralf Vick

<sup>23</sup> von M. Sc. Felix Middelstädt

hängt hauptsächlich von der Länge und den Abschlüssen der Leitung ab und ist gut bekannt. Ein grober Zusammenhang zwischen der Geometrie einer Leitung und der Anordnung der SEM-Pole in allen anderen Schichten ist jedoch unbekannt.

Um diese Fragestellung zu klären wurde ein Algorithmus implementiert, der mit Hilfe klassischer numerischer Verfahren zur EM-Feldberechnung die Singularitäten beliebiger Leitungsstrukturen in der komplexen Ebene berechnet. Der Algorithmus nutzt eine Konturintegralmethode, die auf dem allgemeinen Argumentprinzip aus der Funktionentheorie basiert.

Zur EM-Feldsimulation wurde die Momentenmethode mit den NEC-Basisfunktionen für komplexe Frequenzen implementiert. Die Algorithmen wurden getestet und mit anderen numerischen oder analytischen Lösungen verglichen. Sehr gute Übereinstimmungen wurden beobachtet.

In nachfolgenden Projekten wird der implementierte Algorithmus genutzt werden, um den Zusammenhang zwischen Leitungsgeometrie und Position der Singularitäten in der zweiten und dritten Schicht genau zu analysieren.

#### **Messung der Feldeinkopplung in Mehrfachleitungen in der Modenverwirbelungskammer<sup>24</sup>**

Im Forschungsprojekte wurde die Einkopplung von stochastischen elektromagnetischen Feldern in Mehrfachleitungen experimentell untersucht. Solche Felder treten in elektrisch großen Hohlraumresonatoren mit nennenswerter Güte auf, z. B. in Flugzeugrümpfen, Karosserien von Fahrzeugen oder Satellitengehäusen. Die Messungen wurden in der großen Modenverwirbelungskammer (MVK) des Lehrstuhls für elektromagnetische Verträglichkeit durchgeführt. Dabei wurden generische Aufbauten untersucht, dessen Messergebnisse sich aufgrund der festen und bekannten Parameter der Leitung gut mit Simulationsergebnissen vergleichen lassen. Neben Mehrfachleitungen über einer leitenden Massefläche bzw. einer Wand der Modenverwirbelungskammer (siehe Abbildung 3.29a) wurden ebenso Leitungen in einer Freiraumumgebung bzw. im Arbeitsvolumen der MVK analysiert (siehe Abbildung 3.29b. Bei der Messungen wurden verschiedene Parameter wie z. B.

- die Leitungslänge,
- der Abstand der Leiter und
- die Abschlussimpedanzen der Leitung

variiert, um den jeweiligen Einfluss auf den Mittelwert des Betrags bzw. Betragsquadrats der eingekoppelten Spannung zu untersuchen.

#### **Monte-Carlo-Simulation der statistischen Unsicherheit von Emissionsmessungen in einer Modenverwirbelungskammer<sup>25</sup>**

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurden die Ergebnisse einer Monte-Carlo-Simulation genutzt, um die statistische Unsicherheit der gestrahlten Emissionsmessung in einer Modenverwirbelungskammer zu quantifizieren. Solche Messungen werden typischerweise auf Basis der mittleren oder maximalen Empfangsleistung an der Referenzantenne durchgeführt. Abhängig davon, welche Größe gemessen wird, sind weitere Größen wie der Kammervalidierungsfaktor CVF, der Kammerbeladungsfaktor CLF oder die Einfügedämpfung CLF notwendig, um die gesamt-abgestrahlte Leistung eines Prüflings zu bestimmen. Jede dieser Größen, die während der Validierung der leeren bzw. mit dem Prüfling beladenen Kammer ermittelt werden, sowie die Messung selbst haben jeweils eine bestimmte statistische Unsicherheit. Im Forschungsprojekt

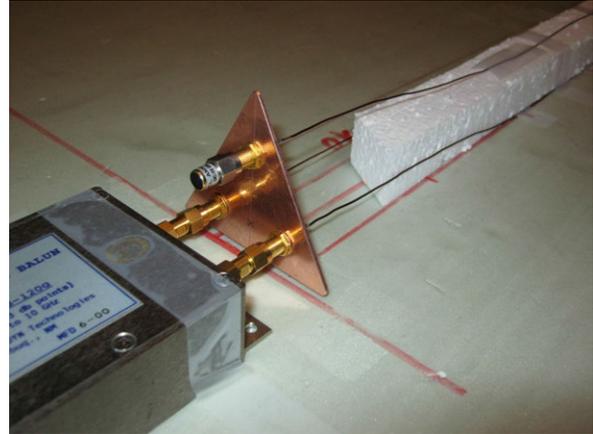
---

<sup>24</sup> von Dr.-Ing. Mathias Magdowski und M. Sc. Johanna Kasper

<sup>25</sup> von Dr.-Ing. Mathias Magdowski



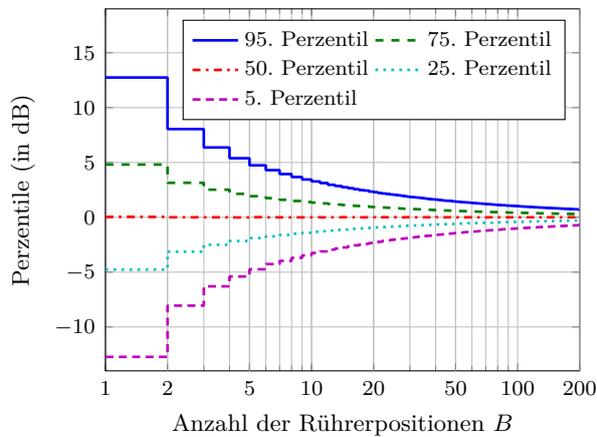
(a) über einer leitfähigen Masseebene bzw. einer Wand der Modenverwirbelungskammer



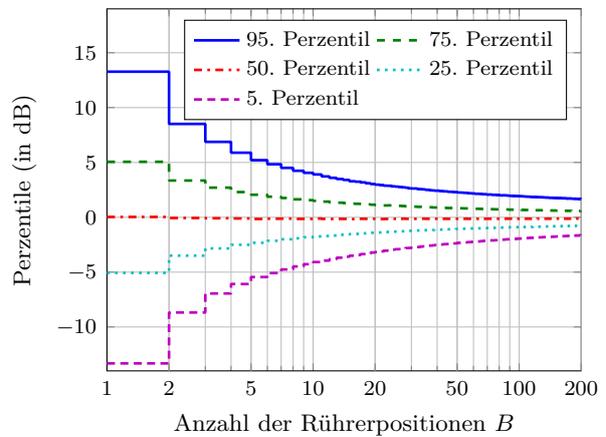
(b) in einer Freiraumumgebung bzw. im Arbeitsvolumen der Modenverwirbelungskammer

Abbildung 3.29: Messaufbau zur experimentellen Analyse der Feldeinkopplung in Mehrfachleitungen in der Modenverwirbelungskammer

wurde dann die resultierende Unsicherheit auf das Messergebnis ermittelt. Als zentrales Ergebnis kann festgehalten werden, dass das mittelwertbasierte Verfahren eine geringere statistische Unsicherheit aufweist (siehe Abbildung 3.30). Außerdem kann durch Messung einer größeren Anzahl von unabhängigen Rührerpositionen die Messunsicherheit gesenkt werden, wobei der Zeitaufwand jedoch ansteigt.



(a) basierend auf der mittleren Empfangsleistung



(b) basierend auf der maximalen Empfangsleistung

Abbildung 3.30: Perzentile der normierten gesamt-abgestrahlten Leistung in einer Modenverwirbelungskammer für unterschiedliche Anzahlen  $B$  von gemessenen unabhängigen Rührerpositionen

### 3.3.3 Promotionen

In diesem Jahr wurden am Lehrstuhl für Elektromagnetische Verträglichkeit keine Doktoranden promoviert.

### 3.3.4 Veröffentlichungen

#### Zeitschriften- und Konferenzbeiträge

- [1] D. Grefkes, M. Kirch und M. Magdowski, „Experimental Analysis of an RFID Tunnel Gate“, in *Smart SysTech*, München: VDE Verlag GmbH - Berlin - Offenbach, Juni 2017, ISBN: 978-3-8007-4428-2.
- [2] X. Wang und R. Vick, „Determination of radiated emissions of an electrically large EUT: simulation and experiment“, *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, Jg. 6, Nr. 2, S. 32–35, Aug. 2017, ISSN: 2162-2264. DOI: 10.1109/MEMC.0.7989988.
- [3] J. Kasper und R. Vick, „Simulation of the Stochastic Electromagnetic Field Coupling to Multiconductor Transmission Lines Using Enhanced Per-Unit-Length Parameters“, in *International Symposium and Exhibition on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe)*, Angers, Frankreich, Sep. 2017, S. 6, ISBN: 978-1-5386-0689-6.
- [4] J. Kasper, M. Magdowski, M. Ali und R. Vick, „Theoretical and Experimental Analysis of the Stochastic Electromagnetic Field Coupling to Multiconductor Transmission Lines Above a Ground Plane“, in *International Symposium and Exhibition on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe)*, Angers, Frankreich, Sep. 2017, S. 6, ISBN: 978-1-5386-0689-6.
- [5] M. Magdowski und R. Vick, „Monte Carlo Simulation of the Statistical Uncertainty of Emission Measurements in an Ideal Reverberation Chamber“, in *International Symposium and Exhibition on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe)*, Angers, Frankreich, Sep. 2017, S. 6, ISBN: 978-1-5386-0689-6.
- [6] M. Raya und R. Vick, „A Simulation Method to Determine the RF Impedance of Batteries“, in *International Symposium and Exhibition on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe)*, Angers, Frankreich, Sep. 2017, S. 5, ISBN: 978-1-5386-0689-6.
- [7] E. Yavolovskaya, B. Willmann, G. Gabriadze, G. Chiqovani, Z. Sukhiashvili, S. Iosava und L. Svanidze, „Low Frequency Human Exposure Analysis for Automotive Applications“, in *International Symposium and Exhibition on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe)*, Angers, Frankreich, Sep. 2017, S. 6, ISBN: 978-1-5386-0689-6.
- [8] B. Willmann und R. Vick, „EMVU von induktiven Ladesystemen“, in *GMM-Fachbericht 88: EMV in der Kfz-Technik*, Wolfsburg: VDE/VDI-Gesellschaft Mikroelektronik, Mikrosystem- und Feinwerktechnik (GMM), VDE-Verlag GmbH, Sep. 2017, S. 23–28, ISBN: 978-3-8007-4460-2.
- [9] M. Magdowski, R. Vick und M. Obholz, „Modellierung von Verkopplungen im Hochvolt-bordnetz eines Elektro- oder Hybridfahrzeugs“, in *13. Magdeburger Maschinenbau-Tage 2017 Autonom – Vernetzt – Nachhaltig*, R. Kasper, U. Gabbert, K.-H. Grote, R. Leidhold, A. Lindemann, M. Scheffler, B. Schmidt und M. Klaeger, Hrsg., Magdeburg, Sep. 2017, S. 228–237, ISBN: 978-3-944722-54-2. DOI: 10.24352/UB.0VGU-2017-085.
- [10] H.-D. Brüns, A. Vogt, C. Findeklee, A. Schröder, M. Magdowski, M. Robinson, F. H. Heidler und C. Schuster, „Modeling challenging EMC problems“, *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, Jg. 6, Nr. 3, S. 45–54, Nov. 2017, ISSN: 2162-2264. DOI: 10.1109/MEMC.0.8093837.
- [11] E. Pannicke, F. Lüsebrink, U. Kägebein, B. Hensen, F. Wacker, O. Speck und R. Vick, „Offcenter Imaging During Magnetic Resonance Interventions to Improve Patient Access.“, in *Image-Guided Interventions*, Gesellschaftshaus Magdeburg, Nov. 2017.
- [12] E. Pannicke und R. Vick, „Interventional Coil Design.“, in *Image-Guided Interventions*, Gesellschaftshaus Magdeburg, Nov. 2017.

- [13] —, „Rapid Test Setup for Interventional MRI Coil Designs.“, in *Image-Guided Interventions*, Gesellschaftshaus Magdeburg, Nov. 2017.

### Patente

- [1] E. Pannicke und K. Opfermann, „Operatives Assistenzsystem für einen Magnetresonanztomographen.“, Nr. 10 2016 005 436, Sep. 2017.
- [2] —, „Operatives Assistenzsystem für einen Magnetresonanztomographen und Verfahren hierzu.“, Nr. 10 2016 005 437, Sep. 2017.

### Beiträge zu Kolloquien u. a. Vorträge

- [1] M. Magdowski, „Was ist und macht ein Ingenieur?“, in *Science Slam*, Freylinghausen-Saal, Franckesche Stiftungen, Halle: HALternativ e. V., Apr. 2017.
- [2] —, „Mobilfunkmasten-Karneval: Strahlend schöne Verkleidungen“, in *Science Slam*, Volksbankhörsaal, Gebäude 22, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg: Lange Nacht der Wissenschaften, Mai 2017.
- [3] —, „Mobilfunkmasten-Karneval: Strahlend schöne Verkleidungen“, in *Science Slam*, Hörsaal 5, Gebäude 16, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg: Ingenieure ohne Grenzen, Fachschaftsrat der Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik, Okt. 2017.
- [4] —, „Mobilfunkmasten-Karneval: Strahlend schöne Verkleidungen“, in *Science Slam*, Freylinghausen-Saal, Franckesche Stiftungen, Halle: HALternativ e. V., Nov. 2017.
- [5] —, „HAITI-Methode, Live-Quizze, Video-Klausurbesprechungen, Twitter-Challenge – Was geht und was nicht?“, in *Webinarreihe – Digitalisierung an den Hochschulen in Sachsen-Anhalt*, Verbundprojekt Heterogenität als Qualitätsherausforderung für Studium und Lehre in Sachsen-Anhalt (HET LSA), Nov. 2017. Adresse: <http://www.llz.uni-halle.de/verbund/netzwerk/webinare/>.
- [6] —, „Mobilfunkmasten-Karneval: Strahlend schöne Verkleidungen sowie Wozu braucht man eine 4 m × 6 m × 8 m große Mikrowelle?“, in *Science Slam*, Hörsaal 1, Hochschule Anhalt, Bernburg: HALternativ e. V., Nov. 2017.

## 3.4 Lehrstuhl für Leistungselektronik

### 3.4.1 Forschungsprofil

Das Forschungsprofil des Lehrstuhls für Leistungselektronik trägt der rasch fortschreitenden Entwicklung in diesem Gebiet der Elektrotechnik Rechnung, die maßgeblich geprägt wird durch die Verfügbarkeit neuer, optimierter Bauelemente einerseits sowie durch gestiegene Anforderungen an verschiedene technische Systeme andererseits, die zweckmäßigerweise unter Einsatz leistungselektronischer Stellglieder realisiert werden. So zählt die Leistungselektronik zu den Schlüsseltechnologien für energieeffiziente elektrische Verbraucher, für die Einspeisung von aus erneuerbaren Quellen erzeugter elektrischer Energie in das aktuelle und zukünftige Netz sowie für die Elektromobilität.

Der enge Zusammenhang von Komponenten- und Systemebene findet am Lehrstuhl für Leistungselektronik bei der Forschung zu leistungselektronischen Schaltungen und Systemen mit neuen Bauelementen Berücksichtigung: Die betrachteten neuen Leistungshalbleiter-Bauelemente umfassen insbesondere weiterentwickelte MOSFETs, IGBTs und Dioden, aber auch Bauelemente aus Halbleitermaterialien mit großem Bandabstand wie SiC oder GaN; darüber hinaus ist die Aufbau- und Verbindungstechnik von nicht zu vernachlässigender Bedeutung, da sie das elektrische und thermische Verhalten sowie die Zuverlässigkeit der Leistungselektronik mitbestimmt.

Aktuelle Arbeiten beziehen sich hierbei schwerpunktmäßig auf Schaltungen bzw. Systeme, zu denen Antriebsumrichter, Stromversorgungen und auch resonante Umrichter gehören. Zu den zu untersuchenden Aspekten zählen die elektrische Funktionsweise unter Berücksichtigung parasitärer Elemente, die thermische Auslegung, eine geeignete Ansteuerung und Regelung, die Zuverlässigkeit sowie die elektromagnetische Verträglichkeit bzw. Umweltverträglichkeit. Nur ein Verständnis der Wechselwirkung zwischen Bauelement und Schaltung bzw. System erlaubt eine fundierte und anwendungsgerechte Optimierung.

Die hierfür am Lehrstuhl für Leistungselektronik angewandte Methodik ist geprägt durch eine Kombination theoretischer Untersuchungen – wie Berechnung, Modellbildung und Simulation – mit experimentellen Arbeiten – insbesondere an Bauelement, leistungselektronischem System und Prozess. Angesichts des ausgeprägt interdisziplinären Charakters vieler der beschriebenen Arbeiten hat sich eine Zusammenarbeit mit Arbeitsgruppen anderer Lehrstühle, außeruniversitären Instituten sowie industriellen Partnern bestens bewährt. Für die gute Zusammenarbeit und auch die diese oft erst möglich machende Förderung sei allen Partnern an dieser Stelle herzlich gedankt.

Einige der im Jahr 2017 bearbeiteten Projekte mit Bezug auf leistungselektronische Bauelemente und Systeme werden im folgenden Abschnitt detaillierter erläutert. Viele von ihnen sind den oben genannten Schwerpunktthemen der elektrischen Energieversorgung unter Einbeziehung erneuerbarer Quellen sowie der der Automobiltechnik zuzuordnen.

### 3.4.2 Forschungsprojekte

#### **Ein Modularer Gleichstromsteller zur Regelung des Leistungsflusses zwischen Hochvolt-Bordnetz und Doppelschichtkondensator im Elektrofahrzeug<sup>26</sup>**

**Motivation** Die Lebensdauer einer Lithium-Ionen-Batterie im Hybrid- oder Elektrofahrzeug hängt unter anderem von den Betriebsbedingungen, dem Ladeverhalten, sowie der Fahrweise ab. So können durch Anfahr- und Bremsvorgänge bedingte hohe Strombelastungen eine beschleunigte

---

<sup>26</sup>von Dipl.-Ing. Bastian Strauß

Degradation der Traktionsbatterie zur Folge haben. Um die Belastung der Traktionsbatterie durch derartige Leistungsspitzen zu reduzieren, können dynamische Leistungsreserven bereitgestellt werden.

**Systemarchitektur** Während der Bremsvorgänge wird kinetische Energie von Hybrid- und Elektrofahrzeugen durch Rekuperation in elektrische Energie umgewandelt. Als Speicher für die elektrische Energie steht die Traktionsbatterie mit hoher Energie- aber geringer Leistungsdichte zur Verfügung. Das Energie-Speichersystem eines Elektrofahrzeugs kann durch einen geregelten Zwischenspeicher, bestehend aus Doppelschichtkondensator (DSK) und bidirektionalem DC/DC-Wandler, ergänzt werden. Der Zwischenspeicher übernimmt Leistungsspitzen und entlastet damit die Traktionsbatterie von kurzen leistungsstarken Umladezyklen, was zur Erhöhung der Batterielebensdauer und des energetischen Wirkungsgrades beiträgt. Da der Energiegehalt eines Kondensators proportional zum Quadrat seiner Klemmenspannung ansteigt, muss dieser über einen regelbaren Gleichspannungswandler an das Hochvolt-Bordnetz gekoppelt werden.

Der im Rahmen des Verbundprojektes GENIAL entworfene Versuchsstand dient unter anderem der Untersuchung eines solchen DC/DC-Wandlers im Hinblick auf sein Betriebs- und Regelverhalten sowie die elektromagnetische Verträglichkeit im Kfz-Bordnetz, insbesondere bei Einsatz schnellschaltender GaN-Transistoren. Der dazu vorgesehene Systemaufbau ist in Abbildung 3.31 als Blockschaltbild dargestellt. Die Traktions- oder Hochvoltbatterie wird im Versuchsaufbau durch eine bidirektionale DC-Quelle nachgebildet. Der bidirektionale DC/DC-Wandler besteht aus sechs symmetrischen Brückenweigen, welche mit einer Schaltfrequenz von  $\geq 40$  kHz betrieben werden. Er lädt oder entlädt die zur Zwischenspeicherung der Energie dienenden fünf seriell geschalteten Doppelschichtkondensator-Module.

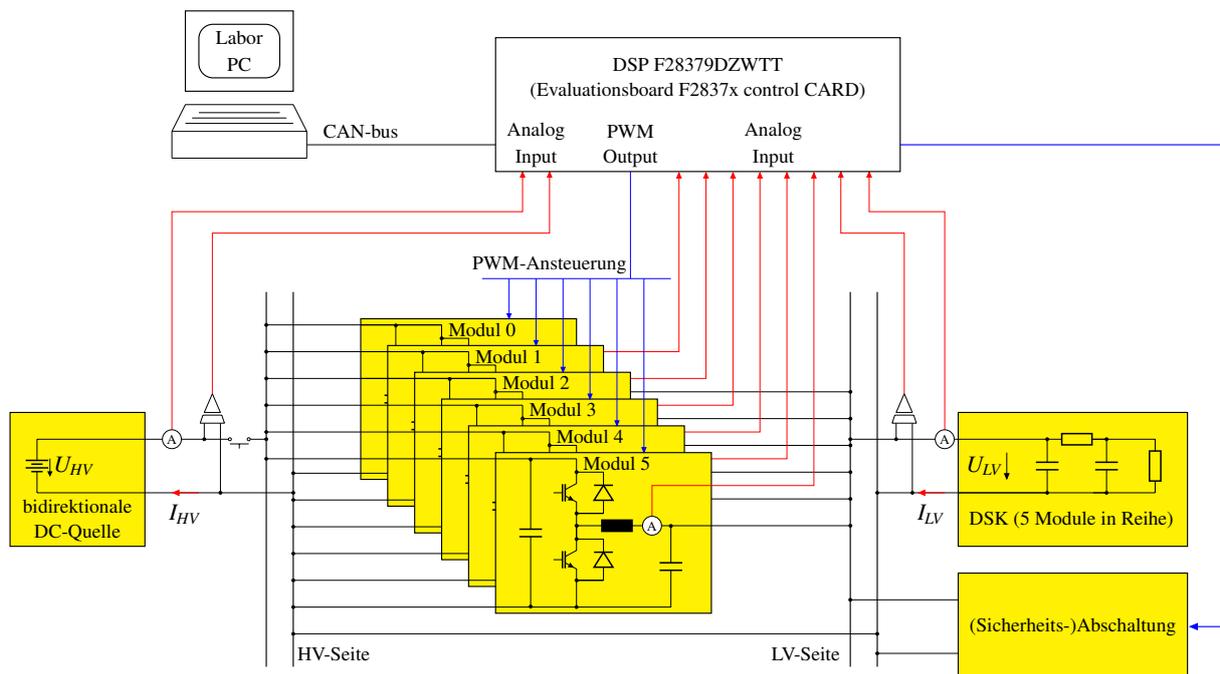


Abbildung 3.31: Versuchsaufbau für Untersuchungen an modularen DC/DC-Wandlern

**Untersuchungen** In Abbildung 3.32a sind die beispielhaft simulierten Verläufe der DC-Ströme sowie der Leistungssoll- und -istwerte eines bidirektional geregelten modularen DC/DC-Wandlers abgebildet. Die Einstellung der Modulströme erfolgt jeweils über eine Modulstrom-Regelung. Bei Vorgabe eines Leistungssollwertes wird der unterspannungsseitige Sollstrom  $I_{LV,soll}$  über die

gemessene Klemmenspannung des DSKs bestimmt. Abhängig vom momentanen Leistungssollwert wird die Anzahl  $n$  der aktiven Module berechnet. Der skalierte Sollwert  $I_{\text{Mod,soll}} = 1/n \cdot I_{\text{LV,soll}}$  wird daraufhin an die Modulstrom-Regelkreise übergeben. In Abbildung 3.32b wird bei vier aktivierten DC/DC-Wandlermodulen ersichtlich, dass durch die Regelung der einzelnen Modulströme eine symmetrische Stromaufteilung zwischen den Wandler-Modulen sichergestellt werden kann.

Ferner wird bei phasenverschobener Ansteuerung der Module eine reduzierte Stromwelligkeit erreicht. Somit lassen sich die Wechselstrombelastungen der Hochvoltbatterie und des DSKs – verursacht durch den DC/DC-Wandler – unter Verwendung eines geeigneten Regelkonzeptes verringern. Die Reduzierung der Wechselstrombelastung führt zu geringeren Temperaturen beider Energiespeicher und trägt somit zur Verlängerung ihrer Lebensdauern bei. Messungen haben des Weiteren bestätigt, dass mit einer sollwertabhängigen Anpassung der Modulkonstellation die Effizienz eines modularen DC/DC-Wandlers sowohl im Teillastbereich, als auch im oberen Leistungsbereich optimiert werden kann.

Die Regelung auf Basis eines Leistungssollwertes stellt abschließend sicher, dass dynamische Leistungsanforderungen der aus dem Hochvolt-Bordnetz versorgten Traktionsantriebe über den DC/DC-Wandler bedient werden können, was die Abbildung 3.33 entsprechend zeigt. Für einen Kleinwagen wurde hier die Lade- und Entladeleistung des Zwischenspeichers auf Basis des *Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle* (WLTC) berechnet. Es wird ersichtlich, dass mit einer Nennleistung von  $\pm 24 \text{ kW}$  der überwiegende Anteil dynamischer Leistungsspitzen im Hochvolt-DC-Netz durch den geregelten Zwischenspeicher abgedeckt wird.

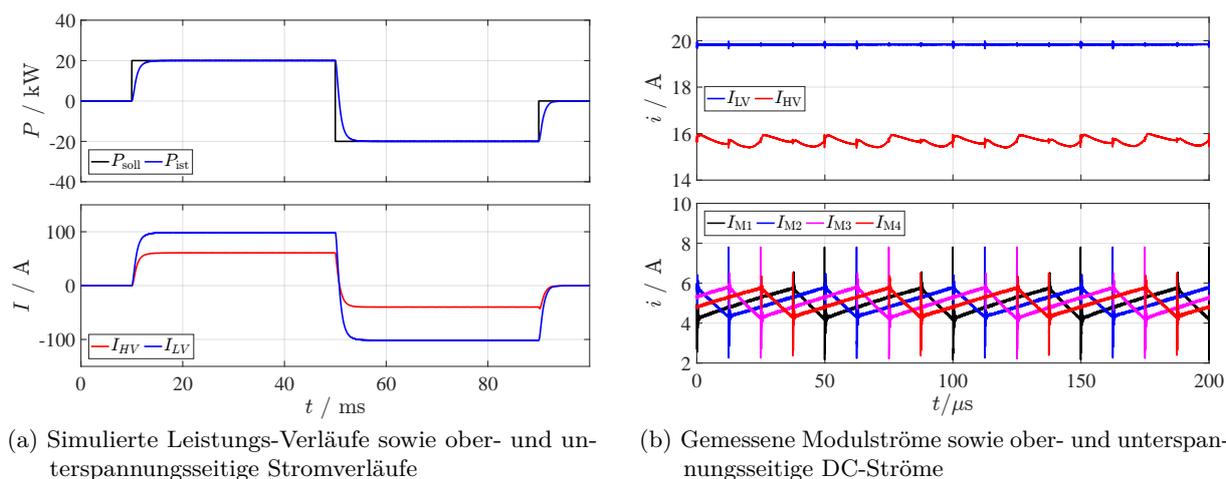


Abbildung 3.32: Geregelter Betrieb eines modularen bidirektionalen DC/DC-Wandlers

### Strategie zur Reduzierung von Oszillationen in leistungselektronischen Schaltungen mittels Gateansteuerung <sup>27</sup>

Wide-Bandgap-Halbleiter, wie GaN- oder SiC-Transistoren, können in vielen Anwendungsbereichen zum Einsatz kommen. Ihre vorteilhaften Eigenschaften, wie kleiner  $R_{\text{ds,on}}$  und kurze Schaltzeiten, führen zu höherer Effizienz und Miniaturisierung von leistungselektronischen Schaltungen. Vor allem das schnelle Schalten der Bauteile führt jedoch gleichzeitig zu größeren elektromagnetischen Störungen. Insbesondere die durch die Schaltflanken angeregten Oszillationen beeinflussen die Amplitude des Spektrums der elektromagnetischen Störung nachteilig. Das Verstehen der Anregungsmechanismen und eine daraus abzuleitende Optimierungsstrategie

<sup>27</sup> von M. Sc. Lars Middelstädt

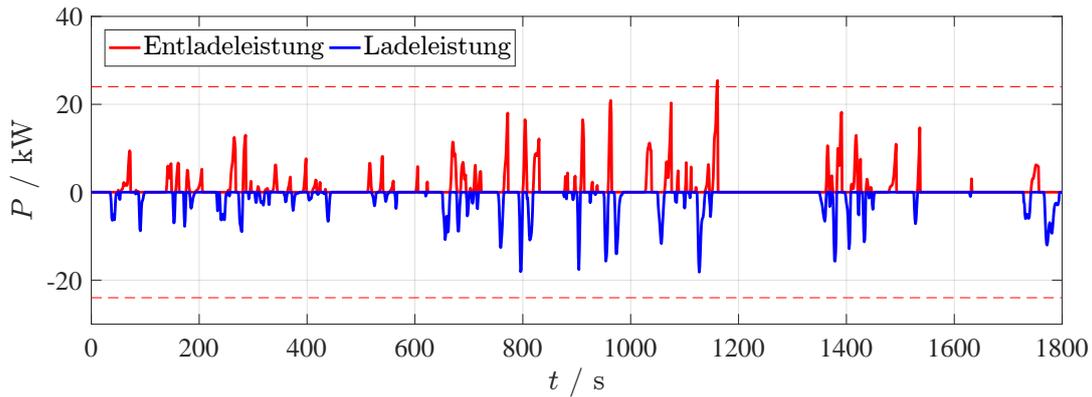


Abbildung 3.33: Berechnete Lade- und Entladeleistung eines geregelten Zwischenspeichers auf Basis eines Standard-Lastprofils (WLTC)

für das Schaltverhalten kann die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) der Schaltung ohne zusätzlichen Filteraufwand bereits signifikant verbessern.

Untersuchungen zur Wirkungsweise der Anregung haben ergeben, dass sich der kritische Resonanzkreis aus parasitären Elementen des Kommutierungskreises zusammensetzt und die Oszillation beim Einschalten als Reihenresonanz sowie beim Ausschalten als Parallelresonanz vereinfacht modelliert werden kann. Daraus ergibt sich, dass die Einschaltoszillation durch die transistorbestimmte Spannungsflanke und die Ausschaltoszillation durch die transistorbestimmte Stromflanke hervorgerufen wird. Entsprechend kann für das Ein- und Ausschalten die Differentialgleichung für ein *RLC*-Schwingkreis angewendet werden. Es ergeben sich zwei zu definierende Phasen für jeden Schaltvorgang (siehe Abbildung 3.34).

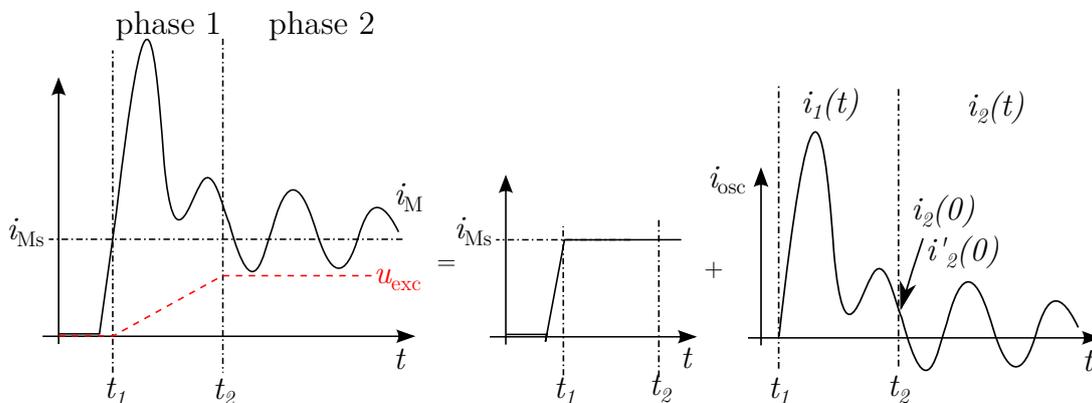


Abbildung 3.34: Phasen der Einschaltoszillation des Stromes mit Spannungsanregung  $u_{exc}$

In Phase 1 wird die Oszillation von der entsprechenden Flanke angeregt. Die Anfangsbedingungen sind hierbei Null. Diese Phase ist in der Regel kurz und von untergeordnetem Interesse. Die nach EMV-Maßstäben wichtigere Phase 2 beginnt nach dem Ende der kritischen Flanke. Hier ist die Anregung Null, die Anfangsbedingungen der entsprechenden Differentialgleichung ergeben sich durch die Endwerte der ersten Phase und bestimmen allein die Amplitude der Oszillation, wie in Gleichung (3.1) zu erkennen ist,

$$i_2(t) = e^{-\gamma t} \sqrt{\left(\frac{i_2'(0) + \gamma i_2(0)}{\omega_d}\right)^2 + i_2(0)^2} \cdot \sin\left(\omega_d t + \arctan\left(\frac{i_2(0)\omega_d}{i_2'(0) + \gamma i_2(0)}\right)\right) \quad (3.1)$$

wobei  $\gamma$  der Dämpfung und  $\omega_d$  der gedämpften Eigenresonanz entsprechen. Aus dieser Erkenntnis ergibt sich die Strategie zur Oszillationsreduzierung. Das Schaltverhalten ist so zu steuern, dass

die Anfangsbedingungen minimal werden. Dies ist nicht zwangsläufig bei langsamerem Schalten der Fall und bedeutet, dass schnelleres Schalten zu kleineren Oszillationen führen kann.

Um diese Strategie für das Einschalten messtechnisch zu verifizieren, wurde eine geeignete Gatebeschaltung aus parallelem Gatewiderstand und -Kondensator gewählt. Während der Kondensator ein sehr schnelles und gatewiderstandsunabhängiges  $di/dt$  gewährleistet, kann die anregende Spannungsflanke  $du/dt$  über die Variation des Gatewiderstandes eingestellt werden. Auf diese Weise werden die Anfangsbedingungen der zweiten Phase maßgeblich bestimmt. In Abbildung 3.35a wurde ein Kondensator  $C_g$  mit 750 pF parallel zu einem veränderlichen Widerstand  $R_g$  zwischen Treiber und Gate des zu steuernden Transistors geschaltet. Es ist zu erkennen, dass das  $di/dt$  für unterschiedliche Gatewiderstände konstant bleibt. Das  $du/dt$  wird hingegen mit größerem Widerstand kleiner. In Abbildung 3.35b ist das korrespondierende Spektrum dargestellt. Es ist gut zu erkennen, dass es möglich ist, die Amplitude der kritischen Resonanzfrequenz bei 80 MHz zu beeinflussen, und dass nicht das langsamste Schaltverhalten mit der geringsten Amplitude des Spektrum korreliert. Somit ist es möglich, durch das Minimieren schaltbedingter Oszillationen die EMV zu verbessern und gleichzeitig durch ausreichend schnelles Schalten die Schaltverluste gering zu halten.

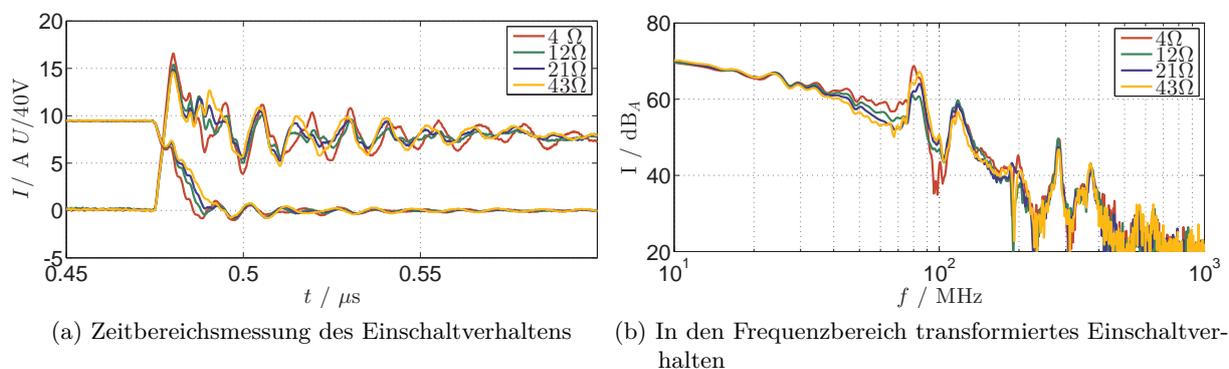


Abbildung 3.35: Gemessene Einschaltoszillation des Drainstromes  $i_d$  und Drain-Source-Spannung  $u_{ds}$  mit beeinflusstem  $du/dt$  und reduzierter Oszillation durch konstanten Gatekondensator  $C_g$  parallel zum veränderlichen Gatewiderstand  $R_g$

### A VSC-HVDC Hardware Model for Research related to Power Electronics in the Grid<sup>28</sup>

This synopsis gives a brief overview over a voltage source converter based high voltage dc transmission (VSC-HVDC) hardware model, consisting of the hardware setup, suitable control algorithms implemented in the digital signal processing (DSP) controller, and the interface between the HVDC hardware model and intelligent substations operated by the Chair of Electric Power Networks and Renewable Energy Sources.

Figure 3.36 shows the system plan of the HVDC hardware model. There will be two separated point-to-point HVDC links. Nominal dc voltage is downscaled to nominally 500 V at equal 50 Hz grid voltages of 220 V. Nominal power in the models is 1 kW or 2 kW respectively; the rated power of the second link is higher for purpose of future possible multi-terminal operation. According to the requirements of certain grid codes, such as the network code on requirements for grid connection of HVDC systems and DC-connected power park modules from ENTSO-E, the HVDC system shall be capable to operate within wide frequency and voltage range around the aforementioned nominal values. In each converter, the saturation block and rate limiter are implemented to restrict all the setpoints within safe range.

<sup>28</sup> von Dr.-Ing. Xudan Liu

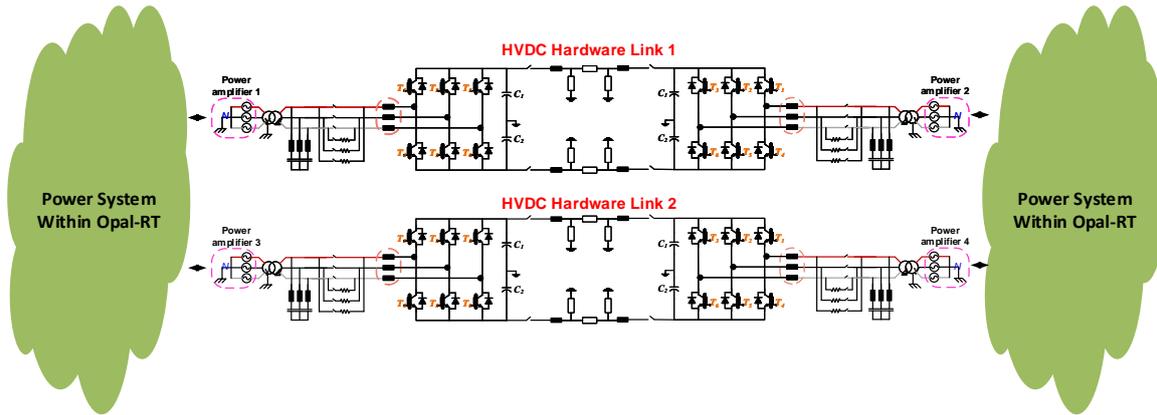


Figure 3.36: System plan of the VSC-HVDC hardware model

### Investigation of the usage of a chip integrated sensor to determine junction temperature during power cycling tests<sup>29</sup>

**Background** For an exact qualification of power semiconductor devices' power cycling withstand capability it is crucial to determine junction temperature  $T_j$  as quickly and accurately as possible. State of the art is to measure  $T_j$  of silicon (Si) devices indirectly by  $V_{CE}(T)$ -method, using the dependence of saturation voltage  $V_{CE}$  on temperature at low measurement current. This method however is not applicable to silicon carbide (SiC) transistors. Since SiC MOSFET power modules are very attractive devices for use in various applications (e. g. automotive, renewable energy), the identification of a suitable  $T_j$  measurement approach is of high interest.

**Proposed approach and validation** Some power semiconductor chips provide an integrated temperature sensor, consisting of a small diode or a string of those located in the chip surface, as illustrated in figure 3.37. Its original purpose usually is over temperature protection and possibly condition monitoring in a converter. The use of such a sensor to also measure  $T_j$  in the power cycling test bench has been investigated as described in the following.

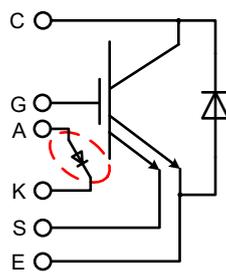


Figure 3.37: Circuit diagram of a Si IGBT with on chip sensor diode and additional package terminals

For validation, measurements taken with such a sensor are compared to those gained with conventional  $V_{CE}(T)$ -method and FEM simulation results, exemplarily considering a Silicon IGBT as device under test (DUT) with the sensor being placed approximately in its centre: As the sensor is not exposed to load current, no delay needs to be observed, permitting to measure

<sup>29</sup>von M. Sc. Carsten Kempiaik

$T_j$  permanently and in particular right before, at and after turning off the load current as can be seen in figure 3.38. In contrast, by using the state of the art  $V_{CE}(T)$ -method no  $T_j$  measurement is possible when load current is applied and a measurement delay is necessary after load current turn-off, causing an uncertainty in the determined temperature. Often  $T_j$  at load current turn-off is estimated by using the  $\sqrt{t}$ -method, see figure 3.38. Comparing the results, it needs to be taken into account that in contrast to  $T_j$  determined by using the  $V_{CE}(T)$ -method, which equals the area related mean temperature on the chip surface, such a temperature sensor provides a local temperature measurement, which may make some difference when temperature gradients are generated in a power chip during load current flow.

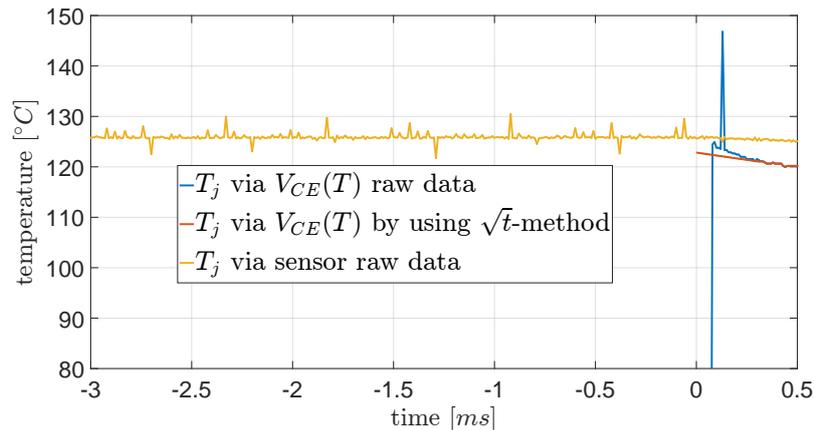


Figure 3.38: Comparison of measuring  $T_{j,max}$  in power cycling by using  $V_{CE}(T)$ -method and proposed approach; load current turn-off is at  $t = 0$  ms.

**Conclusion** Comparing the measurements taken with a sensor placed approximately in the chip centre and with  $V_{CE}(T)$ -method the deviation is lower than the measurement uncertainty of the latter. This has been confirmed by the FEM simulations not shown in detail in this summary. It can be concluded that the proposed approach enables a precise measurement of  $T_{j,max}$  by avoiding any measurement delay and thus permits to measure the cooling down behaviour right after load current turn-off. This is useful during power cycling and could additionally be used for a more accurate transient thermal characterisation.

### High temperature failure mode in power GaN devices <sup>30</sup>

**Introduction** As first power GaN devices are entering the market only since very recently, there is no deep knowledge of all failure modes at hand yet. Since GaN devices can operate at much higher temperatures than silicon, new failure modes previously hidden by thermal runaway in silicon may now become detectable. We present such a new failure mode, relating to thermo-mechanical stress in the aluminium-routing of a power-HEMT, appearing at temperatures around 600 °C that may be reached when switching the device on a short-circuited load.

**Experimental** For a detailed investigation of our failure mode, 600 V normally-off power GaN-HEMTs of 70 m $\Omega$  nominal resistance, assembled in a DSO-20 package, are stressed with varying currents in short circuit until failure. The current level is set by  $V_{GS}$  with a voltage source. In order to enable a subsequent physical failure analysis, a special test bench was built to protect

<sup>30</sup>von Dipl.-Ing. F. Pribahnsnik, KAI

the chips from total destruction after failure. This test bench also measures the voltage  $V_{DS}$  and the current  $I_{DS}$  of the short circuit pulse in order to track the dissipated power in the chip.

**Results and discussion** Time until failure in short circuit is neither determined by the peak current nor by the dissipated energy. Therefore a Finite Element Method (FEM) model was built to simulate the pulses in the device. The FEM model covers the geometry of a single cell in the chip. In order to correctly model the local distribution of dissipated power, TCAD simulations were conducted. From the subsequent thermal simulations, one can obtain a temperature field for each individual short circuit pulse, using thermal FEM simulation with standard values for the thermal conductivity of GaN, Al, and the PECVD-oxide ILD layers. The thermal interface between GaN and Si was modelled by a gross thermal resistance of  $10 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ . The corresponding maximum temperature of the aluminum gate metallisation is plotted in Fig. 3.39a.

Although the temperature transients vary quite significantly for the different devices, it seems that a peak temperature of about  $600^\circ\text{C}$  in the gate-metal is reached at the moment of failure. These values mostly stay below the melting point of Al ( $660^\circ\text{C}$ ), and indeed no indication for material melting was found in physical analysis. On this basis, for each temperature field of each individual short circuit pulse a static mechanical simulation was conducted. The mechanical parameters (linear elastic for all brittle layers, elasto-plastic for the aluminium layer) were taken from literature. For pulses, roughly the same maximum first principle stress in the ILD is obtained. The stress peak at the gate metallization is in good agreement with the physical failure analysis of the tested chips, where a protrusion of the gate metal through the ILD layer was found.

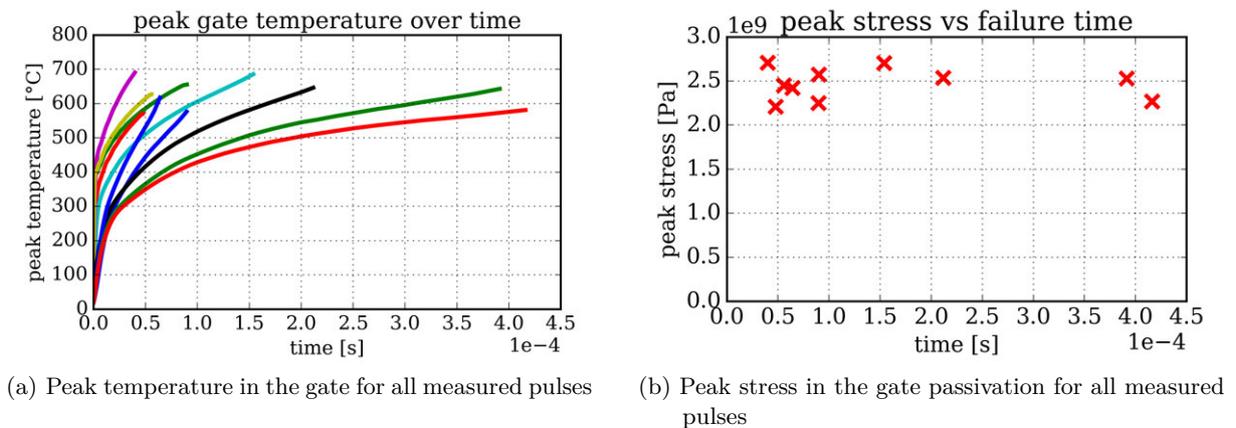


Figure 3.39: Analysis result of the high temperature failure mode in power GaN devices

**Conclusion** It was found that the root cause of failure in short circuit in GaN devices is a protrusion of the gate metallization. This is caused by a temperature field depending on the shape of the current pulse leading to a high stress concentration at a specific edge at the gate metal. All measured pulses were modeled by electrical TCAD and subsequent thermo-mechanical Finite Element Simulations. The resulting stress concentration values at the investigated location consistently show that the ILD above the gate metal is the most likely area to fail.

### 3.4.3 Promotionen

#### **Dr.-Ing. Thomas Baier: Antriebsumrichter mit Impedanz-Zwischenkreis-Topologie und Gleichspannungsspeisung**

Gutachter:

- Prof. Bernhard Piepenbreier, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
- Prof. Andreas Lindemann, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

verteidigt am 27. Juli 2017 an der der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

#### **Dr.-Ing. Jan Wettlaufer: Systementwurf hochintegrierter Antriebe**

Gutachter:

- Prof. Jürgen Wilde, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg (Br.)
- Prof. Holger Borchering, Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Lemgo
- Prof. Andreas Lindemann, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

verteidigt am 04. August 2017 an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg (Br.)

#### **Dr.-Ing. Nasser Badawi: Experimental Investigation of GaN Power Devices – Dynamic Performance, Robustness and Degradation**

Gutachter:

- Prof. Sibylle Dieckerhoff, TU Berlin
- Prof. Andreas Lindemann, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
- Prof. Nando Kaminski, Universität Bremen

verteidigt am 29. November 2017 an der Technischen Universität Berlin

### 3.4.4 Veröffentlichungen

#### **Zeitschriften- und Konferenzbeiträge**

- [1] Y. Liu, S. Kochetov, T. Smazinka, and A. Lindemann, „Characterizing the conducted EMI performance of a power module through passive measurement“, in. Nürnberg: VDE Verlag, Berlin, May 2017, pp. 1517–1523.
- [2] B. Strauß and A. Lindemann, „Ein modularer Gleichstromsteller zur Regelung des Leistungsflusses zwischen Hochvolt-Bordnetz und Doppelschichtkondensator im Elektrofahrzeug“, in *13. Magdeburger Maschinenbau-Tage 2017 Autonom – Vernetzt – Nachhaltig*. Magdeburg: Otto-von-Guerick-Universität Magdeburg, Sep. 2017, pp. 419–427. DOI: 10.24352/UB.OVGU-2017-085. [Online]. Available: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:ma9:1-10182>.
- [3] X. Liu and A. Lindemann, „Control of VSC-HVDC Connected Offshore Windfarms for Providing Synthetic Inertia“, in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. IEEE, Sep. 2017, pp. 1–1. DOI: 10.1109/JESTPE.2017.2751541.

**Beiträge zu Kolloquien u. a. Vorträge**

- [1] A. Lindemann, „7th ECPE SiC & GaN user forum - potential of wide bandgap semiconductors in power electronic applications“, *Bodo's power systems electronics in motion and conversion Laboe A Media*, no. 5, pp. 24–25, 2017.
- [2] X. Liu and A. Lindemann, „Research on power electronics – a key to use renewable energy“, in *International Conference on Renewable Energy Development and Technology*, Frankfurt (M.), Jun. 2017.
- [3] —, „Control of voltage source converter based high voltage direct current transmission (VSC-HVDC) for providing synthetic inertia“, in *Korea-Germany Symposium on Power Electronics*, Berlin, Jun. 2017.
- [4] C. Kempiak, „Variable Kompensation induktiver Uebertragungssysteme mittels aktiver Blindleistungseinprägung“, in *Forschungskolloquium Leistungselektronik OvGU und TU Berlin*, Berlin, Oct. 2017.
- [5] B. Strauß, „Ein modularer Gleichstromsteller zur Regelung des Leistungsflusses zwischen Hochvolt-Bordnetz und Doppelschichtkondensator im Elektrofahrzeug“, in *Forschungskolloquium Leistungselektronik OvGU und TU Berlin*, Berlin, Oct. 2017.
- [6] L. Middelstädt and A. Lindemann, „Reduzierung EMV-kritischer Oszillationen von schnellschal-tenden Leistungshalbleitern“, in *46. Kolloquium Halbleiter-Leistungsbaulemente und ihre systemtechnische Anwendung*, Freiburg (Br.), Oct. 2017.

**3.4.5 Veranstaltungen****7th ECPE SiC & GaN User Forum — Potential of Wide Bandgap Semiconductors in Power Electronic Applications – Report of Conclusions<sup>31</sup>**

**Overview** ECPE wide bandgap user forum – taking place 08.–09. March 2017 at Nürnberg – celebrated a decadal anniversary: As premier event of this kind it has accompanied the development of Silicon Carbide (SiC), Gallium Nitride (GaN) and other wide bandgap power semiconductor devices and their design-in into circuits and systems for more than ten years. Following several other European venues the seventh event took place in March at Nürnberg. The highest number of registrations ever showed the great interest of power electronics community in this actual subject. Main technical focus has been on new developments with SiC and GaN transistors including system and circuit design, related aspects like packaging and parasitics, and an outlook on future prospects. Renowned experts from industry and research institutes all over the world have been invited to explain state of the art and trends, to foster physical understanding, to in depth explain their research and development work in technical presentations and to share their knowledge in discussions. The wide bandgap user forum this way has established a valuable platform to exchange experience and ideas, to show best practise of power electronic systems with SiC or GaN, to discuss and find out how to appropriately design-in those almost ideal but also challenging components, and which open issues need to be addressed. It aimed at pointing out approaches to fully exploit the high potential of wide bandgap devices for the benefit of modern electric and electronic systems in a variety of applications. Presentations of results of relevant European research projects impressively complemented this aspect. Some main topics of this year's ECPE wide bandgap user forum are summarised in the following:

---

<sup>31</sup>by Prof. Andreas Lindemann, chairman together with Dr. Peter Friedrichs (Infineon Technologies) and Prof. Leo Lorenz (ECPE)

**State of the Art and Trends** SiC power electronics is well established in the voltage range 600 V, 1200 V and 1700 V. Circuits make use of diodes and increasingly transistors where the diversity of types observed in recent years today converges to MOSFETs. Devices and their base material have reached a considerable level of maturity, also permitting to understand and implement useful device properties like avalanche ruggedness. Packaging still is a issue with some novel approaches, usually without wire bonds, demonstrated by research institutes and industry. Package related parasitics will influence electromagnetic compatibility (EMC) as they tend to foster current or voltage oscillations respectively in conjunction with switching actions. Besides optimised packages dedicated gate drivers promise to counteract this undesirable effect. As appropriate for a user forum, related practical aspects of lab work like suitable current sensing have also been addressed. Research and development with regard to SiC devices aim at exploiting higher power ranges using devices with higher voltage or current ratings, the latter also being achievable through parallel connection. Obviously devices used in durable goods such as photovoltaic inverters in the Megawatt range, wind converters or traction converters of railway rolling stock, serving as application examples, will need to prove an appropriately high level of reliability. The experience already gained thus significantly fosters the pursued evolution towards higher power levels of compact and highly efficient SiC converters.

GaN devices – mostly transistors with blocking voltages up to 600 V – and circuits employing them have been realised and concurrently are subject to considerable research and development: On device level, main interest is dedicated to parameter stability, reliability and ruggedness. Intermediate results have shown actual achievements in particular of optimised stability, and unveiled approaches for a deeper understanding of underlying mechanisms. GaN devices are mainly used in switched mode power supplies with moderate nominal power. As such, automotive on board chargers in electric or hybrid vehicles might become a lead application. Accepting the challenge of holistic system design permits to create innovative solutions, together optimising semiconductor devices, passives – i. e., capacitors and inductors or transformers – and assembly, for example permitting to integrate the transformer into the printed circuit board. While miniaturisation may be limited by the application – e. g. single phase inverters requiring a certain capacity to compensate the ripple of instantaneous power – experience has been gained that resonant switching is advantageous when employing frequencies above 100 kHz to 150 kHz. Below, hard switching with fast GaN devices would still be efficient. The aforementioned considerations related to packaging, drivers and EMC of course apply for GaN devices and circuits as well.

The user forum's review intendedly hasn't been restricted to SiC and GaN: In their particular field of application both kinds of devices compete with Silicon (Si) power semiconductors. While the latter still are produced in the highest volume, the former increasingly replace and complement them in circuits and applications their particular properties – in many cases especially switching speed – are advantageous for. Two alternatives have been presented as well, promising extraordinary characteristics at moderate cost: 3C SiC exhibits a different structure of the atomic lattice, enabling the use of different production technology being currently under development, especially with the aim to avoid wafer bow and stress. Tentatively Schottky diodes, MOSFETs and IGBTs up to 1200 V seem feasible. It is further suggested to assemble such MOSFETs in a lead frame based surface mount package, thus constituting a compact phaseleg circuit. As a different approach, vertical Gallium Oxide ( $\text{Ga}_2\text{O}_3$ ) Schottky diodes are proposed as a potential cost efficient solution for the voltage range between 600 V and 1200 V, competing with SiC and GaN.

**Conclusion and Outlook** Power electronics is an enabling technology for a multitude of rapidly growing applications: It permits to increase energy efficiency, to feed electrical energy from renewable sources into the grid, to control drives and power supplies in electric vehicles or also to control machinery and robots in any modern production environment. Wide bandgap

devices and the related circuits and systems are a fascinating and rapidly evolving part of power electronics as the aforementioned up-to-date contributions to ECPE wide bandgap user forum have impressively underlined. This important subject is continuously followed up by the ECPE wide bandgap working group; an update about further progress in this area will be available on the occasion of the next ECPE SiC & GaN User Forum.

## 7. ETG-Fachtagung Bauelemente der Leistungselektronik und ihre Anwendungen

Diese Fachtagung, die am 06.-07. April 2017 in Bad Nauheim stattfand, gibt traditionell einen Überblick über die seit der einige Jahre zurückliegenden vorigen Tagung erreichten Fortschritte auf dem Gebiet der Leistungselektronik, und einen Ausblick auf kommende Innovationen:

Das Interesse gilt hierbei einerseits den Leistungshalbleiter-Bauelementen: Silizium-Bauelemente und Silizium-Karbid-Schottky-Dioden konnten in den vergangenen Jahren weiter optimiert werden. Außerdem sind mittlerweile Silizium-Karbid-Transistoren sowie Leistungshalbleiter auf der Basis von Gallium-Nitrid verfügbar. Solche schnell schaltenden Halbleiter stellen hohe Anforderungen u. a. an die Aufbau- und Verbindungstechnik, welcher zusätzlich unter Aspekten wie Zuverlässigkeit, Integrationsgrad und Kosten große Bedeutung zukommt. Zu einer leistungselektronischen Schaltung gehören neben den Leistungshalbleitern außerdem passive Bauelemente. Die Vorträge am ersten Tag befassen sich entsprechend mit Bauelement-bezogenen Themen.

Am zweiten Tag stehen die Anwendungen der Leistungselektronik im Vordergrund: Maßgebliche neue Entwicklungen zeichnen sich bei den elektrischen Netzen ab, bei denen nicht nur durch die Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung die Bedeutung der Gleichstromtechnik wächst, welche den Einsatz leistungselektronischer Stellglieder erfordert. Dies gilt auch für die Einspeisung aus erneuerbaren Quellen erzeugter elektrischer Energie ins Netz. Als weitere typische Anwendung für Stromrichter sind drehzahlvariable Antriebe bekannt, wie sie z. B. in Windgeneratoren, Industrieantrieben oder der Elektrotraktion bei der Bahn bzw. elektrisch angetriebenen Straßenfahrzeugen zum Einsatz kommen.

Die Beschränkung auf eingeladene Übersichtsvorträge verleiht der der deutschsprachigen Tagung einen eigenen Charakter; Teilnehmer schätzen sie wegen ihrer hohen Qualität und ihrem großen Informationsgehalt.

Die Tagung wird regelmäßig ausgerichtet vom Fachbereich Q1 „Leistungselektronik und Systemintegration“ der energietechnischen Gesellschaft im VDE (ETG) in Kooperation mit ECPE – dem European Center for Power Electronics e. V. Die wissenschaftliche Tagungsleitung hatten in diesem Jahr Herr Prof. Nando Kaminski, Universität Bremen, Herr Prof. Günter Eckel, Universität Rostock sowie Herr Prof. Andreas Lindemann, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg inne.

## 3.5 Institutsebene

### 3.5.1 Kooperationen

#### Studienaufenthalte ausländischer Wissenschaftler am Institut

- Juan Manuel Alemany  
(Lehrstuhl Elektrische Netze und Erneuerbare Energie, April 2016–April 2017)

### 3.5.2 Technische Gremien und Verbände

- Prof. Leidhold:
  - VDE und ETG Mitglied
  - IEEE Member
- Prof. Lindemann:
  - Mitgliedschaften und Gremien
    - \* Senior Member des Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)
    - \* Chair of Awards Committee der IEEE Power Electronics Society (PELS)
    - \* Counselor der IEEE Student Branch „Otto von Guericke“, Magdeburg
    - \* Past Chairman 2005–2006 des Joint IAS/PELS/IES German Chapters
    - \* Mitglied von VDE und energietechnischer Gesellschaft im VDE (ETG)
    - \* Vorsitzender des Fachbereichs Q1 (Leistungselektronik und Systemintegration) der ETG
  - Herausgeberschaft, Redaktion
    - \* Technical Programme Chair der International Conference on Integrated Power Electronics Systems CIPS, gemeinsam mit Prof. Kaminski, Prof. Silber und Prof. Wolfgang
    - \* Mitglied des International Steering Committees der European Power Electronics and Drives Association (EPE)
    - \* Mitglied des Fachbeirates der Konferenz PCIM (Power Conversion, Intelligent Motion)
    - \* Associate Editor at Large der IEEE Transactions on Power Electronics
  - Der Lehrstuhl für Leistungselektronik ist ein Competence Centre des European Centers for Power Electronics (ECPE).
- Prof. Vick:
  - Mitglied im Verein Deutscher Ingenieure (VDI)
  - Mitglied der Energietechnischen Gesellschaft (ETG) im Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik (VDE)
  - Mitglied im Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)
    - \* Senior Member
    - \* Mitglied der Electromagnetic Compatibility (EMC) Society
  - Gutachter für die IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility
  - Mitglied der Joint Task Force A-H der International Electrotechnical Commission (IEC)

- Prof. Wolter:
  - Mitgliedschaften und Gremien
    - \* IEEE PES Senior Member
    - \* VDE
    - \* ETG FB V2 Übertragung und Verteilung
    - \* ETG TF Perspektiven der Übertragungstechnik
    - \* BMWi AG Intelligente Netze und Zähler
    - \* BMWi AG Systemsicherheit
    - \* Executive Board Member IEEE PES German Chapter
    - \* Associate Editor des IET Generation, Transmission & Distribution Journal

### 3.5.3 Kolloquien

#### LENA bei der 4. Konferenz „Zukünftige Stromnetze für Erneuerbare Energien“<sup>32</sup>

Bereits zum vierten Mal haben sich Fachleute der Stromnetz-Branche in Berlin zur Konferenz „Zukünftige Stromnetze für Erneuerbare Energien“ getroffen. Die OTTI-Veranstaltung bietet ein Forum für Wissenschaftler sowie Vertreter von Wirtschaft und Politik in verschiedenen Segmenten der elektrischen Energietechnik, um Ideen auszutauschen, die Ergebnisse ihrer wissenschaftlichen Arbeit zu diskutieren und neue Kontakte zu knüpfen. Themenschwerpunkte waren der deutsche Netzausbau, Smart Grid, Informationsmanagement, Planung und Betrieb sowie Betriebsmittel am Netz, Versorgungssicherheit und Systemdienstleistungen.

In diesem Jahr hat die OTTI-Konferenz im Steigenberger Hotel, vom 31. Januar bis 1. Februar, stattgefunden. Im Rahmen einer Poster-Session wurden drei Paper zu den Forschungsergebnissen des Lehrstuhls LENA präsentiert. Zum Einen von Herrn M. Sc. P. Trojan mit dem Thema „Umsetzung eines Echtzeitüberwachungs- und -steuerungssystems im 110 kV-Verteilungsnetz“, von Herrn M. Sc. C. Klabunde zum Thema „Referenzarchitektur für die Integration von Energiespeicher in das Energiemarkt“ und zum Anderen von Herr M. Sc. A. Richter mit dem Poster „Das Virtuelle Kraftwerk als gewinnorientierter Akteur mit verteilnetzunterstützendem Potential“.

#### IEEE Power & Energy Society General Meeting 2017 in Chicago<sup>33</sup>

In Chicago trafen sich dieses Jahr vom 16. bis zum 20. Juli die weltweiten Experten der Energietechnik zum General Meeting des IEEE PES. Bei dieser Konferenz werden neben den neuesten Forschungsergebnissen auch neue Projekte aus der Industrie vorgestellt und diskutiert. Es wurden interessante Themen zu Messgeräten, HGÜ Technik, Übertragungs- und Verteilungstechnik und auch neueste Marktmechanismen bedient.

Der LENA war an dieser Konferenz mit dem Lehrstuhlleiter Prof. Wolter und auch zwei Mitarbeitern vor Ort (siehe Abbildung 3.40). André Richter stellte die Ergebnisse seiner Forschung, die er in einer wissenschaftlichen Veröffentlichung zusammengefasst hat, bei einer Postersession vor. Das Thema seiner Veröffentlichung lautet „Renewable Energy Forecasting Optimization for System Operator and Trader“. Eric Glende hielt auf einer Panelsession von Prof. Westermann (TU Ilmenau) einen Vortrag mit dem Titel „Advances in HVDC Station Control“. Darin hat er Forschungsschwerpunkte und erste Ergebnisse des aktuellen Projektes *DynaGridCenter* vorgestellt, in welchem ein Leitwartensystem der Zukunft aufgebaut wird.

<sup>32</sup> von M. Sc. Christian Klabunde

<sup>33</sup> von M. Sc. André Richter

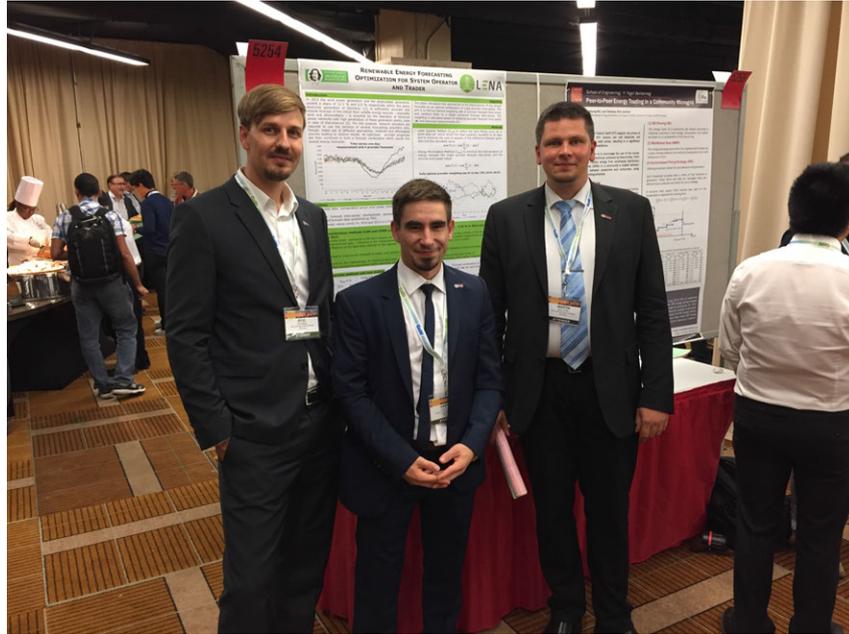


Abbildung 3.40: M. Sc. Eric Glende, M. Sc. André Richter und Prof. Dr.-Ing. habil. Martin Wolter auf der Poster Session des IEEE GM 2017

Das General Meeting kann mit seinen nahezu 3000 Teilnehmern auch sehr gut zum Netzwerken genutzt werden. Vor allem die Kontakte zu anderen deutschen Universitäten wurden gepflegt und es gab regen Informationsaustausch zu den jeweiligen Forschungsprojekten. Aber auch der Kontakt zur Industrie wurde gesucht, um Anregungen für neue Forschung zu gewinnen und neue Projekte zu generieren.

#### 14th International Conference on the European Energy Market<sup>34</sup>

Die 14. IEEE Konferenz „European Energy Market“ fand dieses Jahr vom 06.06.–09.06. im Hörsaalzentrum Dresden statt. Die Konferenz adressiert Teilnehmer aus vielen Bereichen der Energie, angefangen bei Vertretern aus Industrie und Politik bis hin zu Forschern aus allen Teilen der Welt. Thematische Schwerpunkte sind dabei regulatorische Rahmenbedingungen, Energiemärkte, Speicher, Sektorkopplung und viele mehr.

Vertreten wurde der Lehrstuhl Elektrische Netze und Erneuerbare Energie mit dem Beitrag: „Technical Integration of Virtual Power Plants into German System Operation“ durch A. Richter (Abbildung 3.41). Dabei wurden die Rahmenbedingungen für Virtuelle Kraftwerke in Deutschland näher untersucht und ein Verfahren zur Berechnung des Einflusses von Bilanzkreisen auf Übergabestellen des Übertragungsnetzbetreibers vorgestellt.

#### NEIS 2017 - Konferenz für Nachhaltige Energieversorgung und Integration von Speichern<sup>35</sup>

Am 21. und 22. September trafen sich zahlreiche Wissenschaftler in Hamburg zur NEIS-Konferenz. Neben vielen Teilnehmern aus dem deutschsprachigen Raum fanden auch zahlreiche Internationale den Weg zur Helmut-Schmidt-Universität der Bundeswehr Hamburg. Ausrichter war

---

<sup>34</sup> von M. Sc. André Richter

<sup>35</sup> von M. Sc. Marc Gebhardt



Abbildung 3.41: M. Sc. André Richter während seiner Präsentation auf der EEM 2017

das Fachgebiet Elektrische Energiesysteme der Fakultät für Elektrotechnik. Durch die Organisatoren wurde neben den spannenden Fachvorträgen auch eine Exkursion in ein nahegelegenes Umspannwerk durchgeführt. Ein Energy-Slam rundete die Veranstaltung auch kulturell ab.

Vom LENA waren die wissenschaftlichen Mitarbeiter M. Sc. Marc Gebhardt und M. Eng. Maik Plenz vor Ort. Am zweiten Tag der Konferenz präsentierte Gebhardt seine Veröffentlichung zum Thema „Optimal placement and operation strategies of phase shifting transformers based on heuristic algorithms“ (siehe Abbildung 3.42). Der rege Diskurs mit anderen Teilnehmern stellte die Priorität dieses Themas exzellent heraus.

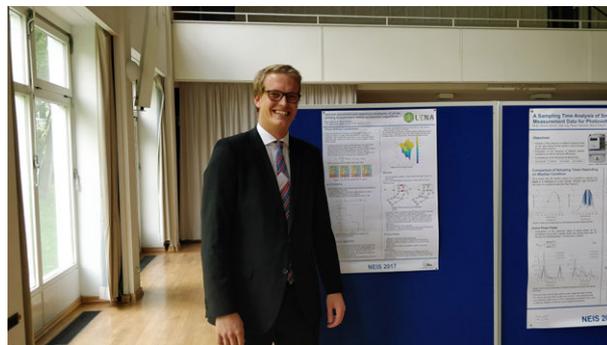


Abbildung 3.42: M. Sc. Marc Gebhardt während der Posterpräsentation auf der NEIS 2017

### RT17 Konferenz in Montreal<sup>36</sup>

Vom 5. Bis zum 8. September fand im schönen Montreal zum neunten Mal die Opal-RT Konferenz unter dem Titel „A new era of real time simulation“ statt. Auf der RT17 kamen Experten aus unterschiedlichen Bereichen der Energietechnik aus der ganzen Welt zusammen. Es wurden unterschiedliche Themen behandelt, die eine Simulation in einer Real Time Umgebung erfordern. Es gab einen regen Informationsaustausch mit Firmen wie National Instruments, ABB, Hydro Quebec, Etap und natürlich Opal-RT.

Auch der Lehrstuhl LENA war auf dieser Konferenz durch Eric Glende vertreten (siehe Abbildung 3.43). Er hielt dort einen Vortrag mit dem Thema: „HIL-Grid-Model on Opal-RT for Testing Future Grid Control Centers“ und stellte dort neben dem Projekt *DynaGridControlCenter* auch

<sup>36</sup> von M. Sc. Eric Glende

die Erfahrungen vor, die am Lehrstuhl mit dem Echtzeitsimulator gesammelt wurden. Neben den sehr interessanten Vorträgen konnte der Kontakt zu den Entwicklern hergestellt werden, um einen tieferen Einblick in das System und ein besseres Verständnis für das System zu bekommen. Am zweiten Tag gab es ein eindrucksvolles Gala Dinner mit gutem Essen, sehr guter Musik und es konnten Kontakte in einer sehr entspannten Atmosphäre gepflegt werden.



Abbildung 3.43: M. Sc. Eric Glende auf der RT17

#### **LENA-Mitarbeiterin auf der PowerTech 2017<sup>37</sup>**

Die PowerTech ist eine sehr wichtige Konferenz der IEEE Power & Energy Society in Europa. Sie bietet ein Forum für Wissenschaftler und technische Fachkräfte in verschiedenen Segmenten der elektrischen Energietechnik und Wissenschaft, um neue Kontakte zu knüpfen, Ideen auszutauschen und die Ergebnisse ihrer wissenschaftlichen Arbeit zu diskutieren. In diesem Jahr hat die PowerTech-Konferenz an der Universität Manchester, England, vom 18. bis 22. Juni stattgefunden. Die Konferenz umfasste vier Tutorials, mehr als 600 technische Präsentationen, 90 Präsentationen in Special Sessions und 10 Keynote-Vorträge. Die Konferenz wurde von 689 registrierten Delegierten besucht. Vertreten wurde der Lehrstuhl Elektrische Netze und Erneuerbare Energie mit dem Beitrag „Comparison Of Different Redispatch Optimization Strategies“ durch Iryna Chychykina. In diesem Artikel sind mehrere Optimierungsmethoden zur Lösung des Redispatch-Optimierungsproblems vorgestellt und verglichen worden.

#### **Dresdener Kreis 2017<sup>38</sup>**

Am 23. und 24. März 2017 besuchte der LENA den „Dresdner Kreis“, welcher in diesem Jahr in Duisburg an der dortigen Universität Duisburg-Essen stattfand. Das gemeinsame Kolloquium, das von Vertretern der vier Partneruniversitäten aus Duisburg/Essen, Hannover, Dresden und Magdeburg zusammen durchgeführt wird, soll den wissenschaftlichen Austausch zwischen Doktoranden und Professoren rund um das Thema Energietechnik durch gemeinsame Gesprächsrunden fördern.

Am ersten Tag präsentierten die Teilnehmer ihre aktuellen Forschungsinhalte aus einem breiten Spektrum vom Frequenzverhalten von Luftspulen bis hin zu quadratischer Optimierung von

---

<sup>37</sup> von M. Sc. Christian Klabunde

<sup>38</sup> von M. Sc. Tamara Schröter

Netzverlusten in insgesamt acht Fachvorträgen. Der LENA wurde dabei von Herrn M. Sc. Marc Gebhardt („Konzepte für einen optimierten Betrieb von Phasenschiebertransformatoren“) und Frau M. Sc. Tamara Schröter („Optimierung der Kombiprognose für die Vorhersage der Einspeisung aus Erneuerbaren Energien“) vertreten. Anschließend luden die Gastgeber der Universität Duisburg-Essen zum gemeinsamen Abendessen ein, wo den Teilnehmern die Möglichkeit gegeben wurde, die Fachgespräche vom Nachmittag in geselliger Atmosphäre ausklingen zu lassen.

Am Freitag besuchten die Teilnehmer des „Dresdner Kreises“ das *ThyssenKrupp Steel* Werk in Duisburg. Besonders beeindruckend war der Abstich am Hochofen, woraufhin das flüssige Eisen ausströmte und den umgebenden Raum erwärmte sowie erhellte. Das Gruppenfoto ist in Abbildung 3.44 dargestellt. Glücklicherweise fand der Abstich genau zu dem Zeitpunkt des dortigen Aufenthalts statt. Dem Weg des zu fertigenden Stahls folgend wurden im Anschluss u. a. die Walzwerke besichtigt, mit denen ein 5 Meter langer Quader auf eine Länge von über einem Kilometer gewalzt wird.

Ein abschließendes gemeinsames Mittagessen in den Räumen des Fachgebiets „Elektrische Anlagen und Netze“ an der Universität Duisburg-Essen bildete den gelungenen Abschluss der Veranstaltung.



Abbildung 3.44: Dresdner Kreis 2017: Gruppenfoto bei *ThyssenKrupp Steel*

### **Dritte Auflage des Forschergruppentreffens „Ilmenau – Magdeburg (IL-MA)“<sup>39</sup>**

Das zur Tradition gewordene Zusammentreffen der Universitäten und Fraunhofer-Institute aus Ilmenau und Magdeburg fand vom 13.–14. Juni 2017 an der Uni Magdeburg statt. Durchgeführt wurde das Forschergruppentreffen vom LENA unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. habil. M. Wolter.

Nach einer Begrüßung und Bekanntgabe der Agenda konnten sich alle Teilnehmer einander vorstellen und somit neue Gesichter kennenlernen. Der wichtigste Punkt folgte im Anschluss: Die Fachvorträge aller teilnehmenden Einrichtungen wurden am ersten Tag von N. Gast, T. Jiang, S. Balischewski und P. Trojan gehalten und vermittelten neue Aspekte der aktuellen

<sup>39</sup>von M. Sc. Eric Glende

### 3 Forschung

Forschungsthemen. Anschließende Diskussion schlossen den fachlichen Teil des Konferenztages ab.

Für die Abendveranstaltung hat Organisator C. Rinne eine Kanutour von etwa sieben Kilometern elbauf- und -abwärts angesetzt. Nach der Zuordnung der Boote fuhren die Kanuten die Elbe bis zum Mönchsgraben und hatten so ein sehr gelungenes Social-Event, das von einem gemeinsamen Grillabend am Bootshaus abgerundet wurde.

Mittwochmorgen standen neben dem Laborbesuch im HGÜ-, und Brennstoffzellenlabor am LENA auch eine Führung durch den Großbatteriespeicher des Fraunhofer IFF auf dem Plan. Die Fachvorträge des zweiten Tages wurden von S. Naumann, A. Kummerow, P. Lombardi und M. Wolfram gehalten. Das Gruppenfoto ist in Abbildung 3.45 dargestellt.

Der Lehrstuhl LENA bedankt sich für die gelungene Veranstaltung, die die Kooperation der beteiligten Partner mit Sicherheit intensiviert und für zukünftige Forschungsaufgaben Ideen gebracht hat.



Abbildung 3.45: Gruppenfoto beim Forschergruppentreffen Ilmenau – Magdeburg

#### **Exkursion der Enercon GmbH Produktionsstätte in Magdeburg am 14.08.2017<sup>40</sup>**

Am 14.08.2017 wurde eine Exkursion zur Enercon-Produktionsstätte in Magdeburg organisiert. Teilgenommen haben Gastwissenschaftler bzw. Doktoranden aus Äthiopien und der Ukraine und Mitarbeiter des Lehrstuhls für Elektrische Antriebssysteme (siehe Abbildung 3.46).

Besichtigt wurden z. B. die Schaltschrank-Montagebereiche für Umrichtertechnik, die Installation der Gondeln und die Rotorblattherstellung. Von besonderem Interesse war die Besichtigung einer Fertigungsstrecke für Windkraftgeneratoren, da die Auslegung und Fertigung von Sondermaschinen derzeit ein wichtiger Forschungsschwerpunkt am Lehrstuhl ist.

Einen besonderen Dank geht an die Enercon GmbH für die Ermöglichung dieser Exkursion und an den Exkursionsleiter, der den Teilnehmern einen guten Überblick über den Produktionsprozess der Windkraftanlagen verschafft hat und sich auch die Zeit nahm viele Fragen zu beantworten.

---

<sup>40</sup>von M. Sc. Dipl.-Ing. Mario Stamann



Abbildung 3.46: Teilnehmer der Enercon-Exkursion in Magdeburg