

# Jahresbericht 2015

der Lehrstühle für

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



FAKULTÄT FÜR  
ELEKTROTECHNIK UND  
INFORMATIONSTECHNIK



## Vorwort

Sehr geehrte Leserinnen und Leser,

mit diesem Jahresbericht möchten wir Sie wieder an unserer Arbeit und ihren aktuellen Ergebnissen teilhaben lassen:

Herr Prof. Styczynski, langjähriger Inhaber des Lehrstuhls für Elektrische Netze und Alternative Elektroenergiequellen (LENA), der seine Arbeit immer auch als Berufung sah, ist mit Erreichen seines 65. Lebensjahres nach mehr als 16 Dienstjahren an unserer Universität in den wohlverdienten Ruhestand gegangen. Wir sind ihm zu großem Dank verpflichtet; durch seine unermüdliche Arbeit, auch über die Universität hinaus, hat er sich bei vielen Studenten, Mitarbeitern und Kollegen höchste Achtung und Anerkennung erworben. Natürlich bedauern wir seinen Weggang, wünschen ihm aber für seinen „Unruhestand“ weiterhin alles Gute.

Als Nachfolger konnten wir Herrn Prof. Martin Wolter gewinnen, der seit April den Lehrstuhl für Elektrische Netze und Erneuerbare Energie leitet. Wir sind sehr froh über diesen nahtlosen Übergang, der weiterhin erfolgreiche Forschung und Lehre in diesem wichtigen Gebiet gewährleistet und somit unmittelbar Studierenden, Projektpartnern und Universität zugutekommt.

Unser umfangreiches Lehrangebot umfasst mehr als 40 Lehrveranstaltungen: Die Grundlagenorientierten und weiterführenden Module zur elektrischen Energietechnik erfreuen sich einer großen Nachfrage von Studierenden sowohl elektrotechnischer als auch interdisziplinärer Studiengänge. Darüber hinaus vermitteln wir Grundlagen der ebenso faszinierenden wie unverzichtbaren Elektrotechnik in nicht-elektrotechnischen Studiengängen. In jeweils mehr als 60 studentischen Forschungsprojekten, 20 Bachelor- und 40 Masterarbeiten konnten Studierende das Erlernte an aktuellen Themen der elektrischen Energietechnik anwenden und vertiefen.

Verschiedene unserer zahlreichen Forschungsprojekte, in denen wir Lösungen für drängende Fragen der elektrischen Energietechnik erarbeiten, sind in diesem Bericht skizziert. Erzielte Ergebnisse konnten wir darüber hinaus in Publikationen und Vorträgen der internationalen Fachwelt vorstellen. Vier Doktoranden haben ihre Dissertation in diesem Jahr erfolgreich abgeschlossen. Auch auf diese Weise tragen wir zur Sichtbarkeit der Otto-von-Guericke-Universität bei; besonders erfreulich ist in diesem Zusammenhang die Frau Dr.-Ing. Hauer zuteil gewordene Ehrung mit dem Literaturpreis der Energietechnischen Gesellschaft im VDE (ETG).

Auch über Forschung und Lehre hinaus haben wir uns engagiert, beispielsweise Herr Prof. Lindemann als Dekan bzw. Herr Prof. Vick als Prodekan der Fakultät, Herr Prof. Wolter als Ausrichter einer IEEE-Veranstaltung an der Universität und mehrere Mitarbeiter und Studierende in der IEEE Student Branch „Otto-von-Guericke“.

Unsere Arbeit wird befruchtet durch Kooperationen mit Partnern im In- und Ausland. Zu nennen sind hier beispielsweise die TU Breslau (Wrocław), die Universidad Nacional de Rio Cuarto in Argentinien sowie ukrainische und russische Universitäten. Natürlich möchten wir uns an dieser Stelle ganz herzlich bei all denjenigen Partnern bedanken, die unsere Arbeit sowohl materiell als auch inhaltlich unterstützen, sei es durch Förderprogramme, Spenden oder wissenschaftliche Beiträge. Unser besonderer Dank gilt der DFG, dem BMWi, dem BMU, dem BMBF, dem Land Sachsen-Anhalt und natürlich allen Firmen, die unsere Arbeit mittragen.

Für das kommende Jahr wünsche ich Ihnen im Namen der Professoren und aller Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der berichtenden Lehrstühle Gesundheit, Glück und alles Gute.

Prof. Dr.-Ing. Roberto Leidhold  
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 . . . . .	1
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	Mitarbeiter in Technik und Verwaltung . . . . .	3
1.4	Lehrstuhl für Leistungselektronik . . . . .	3
1.4.1	Hochschullehrer . . . . .	3
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 . . . . .	11
2.1.3	Abgeschlossene Bachelor- und Studienarbeiten . . . . .	11
2.1.4	Abgeschlossene Master- und Diplomarbeiten . . . . .	12
2.2	Lehrstuhl Elektrische Netze und Erneuerbare Energie . . . . .	13
2.2.1	Vorlesungen, Übungen und Praktika . . . . .	13
2.2.2	Abgeschlossene Forschungsprojekte . . . . .	18
2.2.3	Abgeschlossene Bachelor- und Studienarbeiten . . . . .	19
2.2.4	Abgeschlossene Master- und Diplomarbeiten . . . . .	20
2.3	Lehrstuhl für Elektromagnetische Verträglichkeit . . . . .	22
2.3.1	Vorlesungen, Übungen und Praktika . . . . .	22
2.3.2	Abgeschlossene Forschungsprojekte . . . . .	28
2.3.3	Abgeschlossene Bachelor- und Studienarbeiten . . . . .	28
2.3.4	Abgeschlossene Master- und Diplomarbeiten . . . . .	28
2.4	Lehrstuhl für Leistungselektronik . . . . .	29
2.4.1	Lehrveranstaltungen für Bachelor-Studiengänge . . . . .	29
2.4.2	Lehrveranstaltungen für Master-Studiengänge . . . . .	31
2.4.3	Abgeschlossene Forschungsprojekte . . . . .	35

2.4.4	Abgeschlossene Bachelor- und Studienarbeiten . . . . .	35
2.4.5	Abgeschlossene Master- und Diplomarbeiten . . . . .	35
2.5	Institutsebene . . . . .	37
2.5.1	Exkursionen . . . . .	37
2.5.2	Studienwerbung . . . . .	42
<b>3</b>	<b>Forschung</b>	<b>45</b>
3.1	Lehrstuhl für Elektrische Antriebssysteme . . . . .	45
3.1.1	Forschungsprofil . . . . .	45
3.1.2	Forschungsprojekte . . . . .	47
3.1.3	Promotionen . . . . .	52
3.1.4	Veröffentlichungen . . . . .	53
3.2	Lehrstuhl Elektrische Netze und Erneuerbare Energie . . . . .	55
3.2.1	Forschungsprofil . . . . .	55
3.2.2	Forschungsprojekte . . . . .	55
3.2.3	Promotionen . . . . .	67
3.2.4	Veröffentlichungen . . . . .	73
3.3	Lehrstuhl für Elektromagnetische Verträglichkeit . . . . .	75
3.3.1	Forschungsprofil . . . . .	75
3.3.2	Forschungsprojekte . . . . .	76
3.3.3	Promotionen . . . . .	87
3.3.4	Veröffentlichungen . . . . .	87
3.4	Lehrstuhl für Leistungselektronik . . . . .	91
3.4.1	Forschungsprofil . . . . .	91
3.4.2	Forschungsprojekte . . . . .	91
3.4.3	Promotionen . . . . .	109
3.4.4	Veröffentlichungen . . . . .	110
3.5	Institutsebene . . . . .	112
3.5.1	Kooperationen . . . . .	112
3.5.2	Technische Gremien und Verbände . . . . .	112
3.5.3	Kolloquien . . . . .	114

# **1 Personalia**

## **1.1 Lehrstuhl für Elektrische Antriebssysteme**

### **1.1.1 Hochschullehrer**

- Prof. Dr.-Ing. Roberto Leidhold  
(Lehrstuhlleiter, geschäftsführender Leiter des Instituts für elektrische Energiesysteme)

### **1.1.2 Wissenschaftliche Mitarbeiter/Stipendiaten**

- M. Sc. Shokoofeh Abbaszadeh
- Dipl.-Ing. Andreas Bannack
- 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

### **1.1.3 Gastwissenschaftler**

- Kemal Ibrahim Yassin, Adama Science and Technology University, Äthiopien
- Milkias Berhanu Tuka, Adama Science and Technology University, Äthiopien
- Dr. Mouloud Adli, Université de Béjaia, Algerien

### **1.1.4 Externe Promovenden**

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

### **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, seit 01.04.2015)
- Prof. Dr.-Ing. Zbigniew A. Styczynski  
(Lehrstuhlleiter, bis 31.03.2015)
- 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
- Prof. dr. hab. inż. Dr.-Ing. E. h. Waldemar Rebizant, TU Wrocław, Polen: Digitale Schutztechnik

### 1.2.3 Wissenschaftliche Mitarbeiter

- Dr.-Ing. Bartłomiej Arendarski (bis 16.06.2015 in Zusammenarbeit mit der Fraunhofer Gesellschaft, IFF Magdeburg)
- M. Sc. Stephan Balischewski (in Zusammenarbeit mit der Fraunhofer Gesellschaft, IFF Magdeburg)
- M. Sc. Illia Bielchev
- M. Sc. Iryna Chychykina
- Dr.-Ing. Ines Hauer
- Dr.-Ing. Günter Heideck (bis 30.11.2015)
- Dr.-Ing. Maik Heuer
- M. Sc. Christian Klabunde
- M. Sc. Philipp Kühne
- Dr.-Ing. Natalia Moskalenko
- M. Sc. André Richter
- M. Sc. Marc Richter
- M. Sc. Przemyslaw Trojan
- Dipl.-Ing. Mike Weber (seit 07.10.2015)
- Dipl.-Ing. Michael Wenske

#### 1.2.4 Externe Promovenden

- M. Eng. Maik Plenz, Brandenburgische Technische Universität Cottbus - Senftenberg
- M. Eng. Karsten Schatz, Brandenburgische Technische Universität Cottbus - Senftenberg

#### 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)

#### 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 (seit 18.05.2015)
- M. Sc. Xiaowei Wang
- M. Sc. Matthias Hirte
- M. Sc. Ahmed Hassan
- M. Sc. Enrico Pannicke
- M. Sc. Farzin Godarzi (seit 16.09.2015)

#### 1.3.3 Mitarbeiter in Technik und Verwaltung

- Janet Morscheck (Sekretärin)

### 1.4 Lehrstuhl für Leistungselektronik

#### 1.4.1 Hochschullehrer

- Prof. Dr.-Ing. Andreas Lindemann  
(Lehrstuhlleiter, Dekan der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik)

#### **1.4.2 Wissenschaftliche Mitarbeiter**

- Dr.-Ing. Reinhard Döbbelin  
(Mitglied des Vorstandes des Instituts für elektrische Energiesysteme)
- Dr.-Ing. Wolfgang Fischer
- Dipl.-Ing. Folkhart Grieger
- M. Sc. Xudan Liu
- 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)
- Lutz Kastner (Werkstatt)
- Kevin Pesch (Auszubildender, Werkstatt)
- Maximilian Halt (Auszubildender, Werkstatt)

#### **1.5.2 Verwaltung**

- Martina Krieger (Ökonomie, Buchhaltung am Institut für elektrische Energiesysteme)
- Katja 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. Gerd Kuhlemann
	P 1 SWS:	Dipl.-Ing. Niklas Förster
	P 1 SWS:	Dipl.-Ing. Detlef Baumecker
	P 1 SWS:	M.Sc. Marc Richter
	Ü 1 SWS:	Dr.-Ing. Reinhard Döbbelin
	Ü 1 SWS:	Dr.-Ing. Thomas Schallschmidt
	Ü 1 SWS:	Dipl.-Ing. Julia Bauch

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 permanenterregten 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
- Reglerentwurfsverfahren 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 elektrischen 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. Hoke, Thomas: Profibusinterface für einen Stromrichter
2. Andreu, John: Literaturrecherche zu elektrischen Maschinen mit nicht sinusförmiger elektromotorischer Kraft
3. Chandranna, Gowtham: Bonded magnets for permanent magnet electrical machines
4. Jacob, Thomas: Literaturrecherche zu sensorlosen Regelungsmethoden für Literaturrecherche zu sensorlosen Regelungsmethoden für permanent erregte Synchron Maschinen
5. Möller, Albert: Verwendungsanalyse eines Raspberry Pi
6. Mahlfeld, Hannes: Konstruktionsplanung eines langsam laufenden Transversalflussgenerators
7. Lagunov, Dmytro: Patentanalyse und Literaturrecherche zum Prinzip der Transversalflussmaschine
8. Kurylo, Anna: Überführung einer Zustandsregelung in eine Kaskadenstruktur
9. Thanh Long Lam: Ansteuerung eines BLDC-Motors
10. Wölk, Moritz: Grundlagen zur Gleichstrommaschine - Lehrbeispiel
11. Anselm, Sebastian: FEM Simulation eines Freiheitsgrad Magnetlagers
12. Esaulenko, Alina: Netzsynchronisation für einen Stromrichter
13. Raghava, Charan: Soft Magnetic Composite Materials

### 2.1.3 Abgeschlossene Bachelor- und Studienarbeiten

1. Raberger, Benny: Modellierung eines Tubularmotors mittels FEM
2. Sandmann, Paul: Regelung eines Synchronmotors zur Steuerung der Nockenwelle eines Freikolbenmotors
3. Becker, Kai: Realisierung hochdynamischer Stromregelkreise für wechselrichter-gesteuerte Magnetaktoren
4. Körner, Jens: Die negative Kapazität als semi-aktive Maßnahme für die Unterdrückung von mechanischen Schwingungen
5. Leps, Kevin: Optimierung einer Antriebsregelung mit Störgrößenbeobachter
6. Benecke, Sebastian: Entwurf eines Läufers für eine elektrische Maschine eines Freikolbenantriebssystems
7. Tucholke, Dennis: Bestimmung des elektrischen Winkels einer elektrischen Maschine mithilfe einer Signaleinprägung

#### 2.1.4 Abgeschlossene Master- und Diplomarbeiten

1. Hieke, Sebastian: Aktive Dämpfung von Drehmomentenschwingung einer dreisträngigen Transversalfussmaschine
2. Marti Puy Ruiz: FPGA basierte Soft Core Lösungen für Echtzeitanwendungen im Bereich Rapid Control
3. Witzel, Rick: Entwurf eines Simulationsmodells mit der Kombination eines Freikolbenmotors und einer elektrischen Linear Maschine
4. Kasper, Johanna: Untersuchung verschiedener Wirkungsstrukturen bei Linearmotoren mit Zahnspulenwicklung
5. Podoliak, Oleksii: Polyoptimale Steuerung eines Kranhubwerkes
6. Günther, Sebastian: Design of a Modular Flywheel Energy Storage for Academic Demonstration Purposes
7. Horn, Benjamin: Implementierung und Vergleich verschiedener drehgeberloser Verfahren im hohen Drehzahlbereich
8. Roth, Tankred: Inbetriebnahme eines Segways
9. Schwallach, Kristin: Fehlererkennung bei umrichter gespeisten Asynchronmaschinen
10. Hoscher, Christoph: Prüfanordnung zur Bestimmung des Energieeffizienzindex (EEI) an Druckerhöhungsanlagen
11. Mahlfeld, Hannes: Untersuchung von Verfahren zur Übermodulation bei wechselrichtergespeisten Asynchronmaschinen

## 2.2 Lehrstuhl Elektrische Netze und Erneuerbare Energie

### 2.2.1 Vorlesungen, Übungen und Praktika

#### Regenerative Elektroenergiequellen - Systembetrachtung

— Renewable Energy Sources —

WS 2014/15	V 2 SWS:	Prof. Dr.-Ing. Zbigniew Antoni Styczynski
	Ü 1 SWS:	M. Sc. Marc Richter
WS 2015/16	V 2 SWS:	Prof. Dr.-Ing. Martin Wolter
	Ü 1 SWS:	M. Sc. Marc Richter

- Einführung in die Grundlagen von erneuerbaren Energien
- Wirkungsprinzipien der erneuerbaren Energiegewinnung unterschiedlicher Technologien
- Prinzipien der Speicherung von elektrischer Energie
- Integration von erneuerbaren Energiequellen in die Netzinfrastruktur
- Modellierung ausgewählter erneuerbarer Anlagen

#### Elektrische Energienetze I

— Electric Power Network I —

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

- Kennenlernen der Aufgaben der Netzplanung und Netzbetriebsführung
- Gleichungssysteme zur Beschreibung des stationären und quasi-stationären Verhaltens der Netze
- Beschreibung des Netzes in modalen Komponenten
- Grundlagen der Algorithmen zur Leistungsfluss-, Kurzschluss- und Stabilitätsberechnung sowie zur Netzzustandsschätzung
- Einführung in das Arbeiten mit entsprechenden Computerprogrammen

#### Elektrische Energienetze II - Smart Grid

— Electric Power Network II - Smart Grid —

SS	V 2 SWS:	Prof. Dr.-Ing. Martin Wolter
		Dr.-Ing. Przemyslaw Komarnicki
	Ü 1 SWS:	M. Sc. Marc Richter

- Einleitung, Grundlagen, Netzplanung
- Betriebsmittelmodellierung und Netzbetrieb, Regelung, Parallelbetrieb von Generatoren
- Beobachtbarkeit des Systems und State-Estimation, PMU und Wide-Area-Monitoring
- Windpark Modellierung: Elektrische Aspekte, Wake und Reduktion
- Elektrizitätswirtschaft, Diskontrechnung, Investitionsbewertung

## 2 Studium und Lehre

- Netzzuverlässigkeit, Definition, Verfahren, Netzplanung
- Dynamic-Security-Assessment und Black-Out-Prevention
- Liberalisierter Energiemarkt – Unbundling, Energiebörse, Netznutzungsentgelte
- Stabilität des elektrischen Energiesystems - Statische Stabilität
- Netzbetrieb - Systemregelung und Netzdienstleistungen
- Netzsimulationen mit PSS@SINCAL & PSS@NETOMAC

### 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 2014/15 V 2 SWS: Prof. Dr.-Ing. Zbigniew Antoni Styczynski  
Ü 1 SWS: M.Sc. Marc Richter  
WS 2015/16 V 2 SWS: Prof. Dr.-Ing. Martin Wolter  
Ü 1 SWS: M.Sc. Marc 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 Energiemarkts

## Modellierung und Expertensysteme in der elektrischen Energieversorgung

— Modelling and Expert Systems for Power Supply —

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

- Modellierung
  - Schaltvorgänge und Schaltgeräte (Definition, Konstruktion, Funktionsfähigkeiten und Modelle, Lichtbogen, Steuerung und Beherrschung)
  - Darstellung von Wanderwellenvorgängen im Netz
  - Begrenzung von Überspannung
- Expertensysteme
  - Expertensysteme in der Energieversorgung
  - Grundbegriffe der künstlichen Intelligenz
  - Wissensakquisition und Wissensrepräsentation
  - Entscheidungen bei nichtvollständigen Informationen
  - Fuzzy-Logik
  - Künstliche Neuronale Netze

## Netzschutz und Leittechnik

— Power System Protection and Control —

WS V 2 SWS: Prof. Dr.-Ing. Rainer Krebs  
Ü 1 SWS: Prof. Dr.-Ing. Rainer Krebs  
Dr.-Ing. Ines Hauer  
M. Sc. Marc Richter

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

## Photovoltaische Energiesysteme

— Photovoltaic Systems —

SS V 2 SWS: Prof. Dr.-Ing. Martin Wolter  
Ü 1 SWS: M. Sc. Stephan Balischewski

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

## Power Network Planning and Operation

WS 2014/15 V 2 SWS: Prof. Dr.-Ing. Zbigniew Antoni Styczynski  
Ü 1 SWS: Dipl.-Ing. Ines Hauer  
WS 2015/16 V 2 SWS: Prof. Dr.-Ing. Martin Wolter  
Ü 1 SWS: M. Sc. Stephan Balischewski

- 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 2014/15 V 2 SWS: Prof. Dr.-Ing. Zbigniew Antoni Styczynski  
Dr.-Ing. Pio Lombardi  
Ü 1 SWS: Dr.-Ing. Pio Lombardi  
WS 2015/16 V 2 SWS: Prof. Dr.-Ing. Martin Wolter  
Dr.-Ing. Pio Lombardi  
Ü 1 SWS: Dr.-Ing. Pio Lombardi

- Basics of economy and overview of markets
- Electric market architecture
- Economic electric dispatch
- Market for ancillary Services
- 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  
Ü 1 SWS: M.Sc. Marc Richter

- Introduction to Renewable sources
- Legal Framework, priority and subsidies
- Functionality of energy conversion
  
- Photovoltaic energy (physics and principle, potential, costs)
- Wind energy (physics, potential, costs, function of wind turbines)
- Fuel cells (fundamentals, types, applications)
- Hydroelectric power plants, geothermal energy, biomass
- Energy storage systems (hydro pump storage systems, compressed air storage systems, batteries, superconducting magnetic energy storage, flywheel)
- Grid connection of renewables
- Outlook

## Windenergie

— Wind Energy —

SS V 2 SWS: Prof. Dr.-Ing. Antje Orths  
Ü 1 SWS: M.Sc. Christian Klabunde

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

### 2.2.2 Abgeschlossene Forschungsprojekte

1. Lang Yuan: Cross Energie System in Smart Grids; modelling and simulations
2. Polina Sokolnikova: Untersuchung des Speicherpotentials zur Unterstützung der Netzstabilität
3. Steffen Drabe: Verfahren zur quantitativen Bewertung der Beobachtbarkeit von elektrischen Netzen
4. Ratnakumar Gudimetla: Technical data overview of Ground Power Units
5. Aditya Sai Kovvali: Embedded fuel cell application based on ARM processor
6. Shuo Chen: Methoden zur Spannungsregelung basierend auf Blindleistung in Verteilungsnetze
7. Christoph Humpisch: Parametrierung, Inbetriebnahme und Erprobung von Netzschutzgeräten für Distanzschutz und Überstromzeitschutz
8. Eric Glende: Einführung und Bewertung eines Brennstoffzellensystems für eine Ground Power Unit
9. Justyna Herlender: Analysis of needed materials for assembling Battery Storage Systems
10. Fabian Wohlgemuth: DSM-Potentialanalyse im Haushalts- und GHD-Sektor
11. Benjamin Höpfner: Genauigkeits- und Fehleranalyse einer PMU-basierten Netzzustandsbestimmung
12. Martin Heger: Integration von MODBUS-Kommunikation in ein stationäres Speichersystem
13. Carsten Dulleck: Funktionsprinzip und technische Voraussetzungen einer Ground power unit
14. Matthias Plancke: Gegenüberstellung von Speichermethoden für Wasserstoff und Lade- Entladeverhalten eines Metall-Hybrid-Speichers
15. Ievgen Opanasenko: Literature research on existing and future control rooms of power grids
16. Muhammad Akif: Analysis of Gas Power Systems, Today & Tomorrow
17. Andreas Peter: Vergleich und Bewertung von PMU-Platzierungsalgorithmen zur vollständigen Beobachtbarkeit in Verteilnetzen
18. Michael Haaß: Integrationskonzepte für Virtuelle Kraftwerke mit hohem Anteil regenerativer Energiequellen
19. Shang Cai: Accuracy of Conventional Measurements in Power Systems — Influences and Determination —
20. Vinothkumar Dhanapal: Voltage Regulation in Low Voltage Grids
21. Dmytro Korost: Literature research on high-voltage direct current (HVDC) systems
22. Sankar Singaravelu: Development of market based operational concepts for energy storage integration

23. Joanna Pisiakowska: Medical Uninterruptible Power Supplies (UPS)
24. Joyonta Dey: PMUs and RTUs measuring systems for network monitoring
25. Mariia Krasnorutskaja: Analyse von Energiemärkten und deren Segmentierung für Energiespeicher
26. Andrii Lytvynenko: Wirtschaftliche Analyse unterschiedlicher Betriebsmodi eines Hochspannungsstromnetzes
27. Martin Berlin: PMU-Platzierungsalgorithmen auf Basis binärer Zuordnung
28. Frederieke Kücke: Überarbeitung der Übungsmaterialien für die Lehrveranstaltung „Grundlagen der Elektrischen Energietechnik“
29. Fatima Muhammad Saleem: Concepts and Algorithms for Static Reduction of Power Networks
30. Aleksandra Pankova: Sensitivity Analysis for Installation Location of Energy Storage Systems in High Voltage Networks
31. Iuliia Shevtsova: Untersuchung und Durchführung von Netzsicherheitsmanagement-Maßnahmen im 110 kV-Verteilnetz
32. Axel Guicking: Rahmenbedingungen für die Integration von Elektroenergiespeichern
33. Marcel Böhme: Konzeptentwicklung für ein Promovenden-Transportgerät für den feierlichen Gang zum Otto-von-Guericke-Denkmal
34. R. Balasubramanian: Autonomous voltage control methods in power system through distribution generation
35. Shoaib Ansari: Lifetime prediction for PEM fuel cells
36. Artem Kudashov: Fernwartung von Brennstoffzellen USV-Anlagen

### 2.2.3 Abgeschlossene Bachelor- und Studienarbeiten

1. Patrick Arnold: Validierung und Optimierung einer Feuchtehaushalt-Simulation mit experimentellen Messdaten
2. Florian Steffen: Einsatz von Automotive-Komponenten im Rahmen von Power-to-Gas-Prozessen
3. Nicola Gast: Modellierung eines Energiehubs für die Integration erneuerbarer Energie
4. Niklas Sundorf: Optimierung und Ergänzung einer MATLAB-Applikation zur hybriden Zustandsabschätzung
5. Sophie-Christine Schubert: Untersuchung von Zusammenhängen der elektrischen und thermischen Leitfähigkeit in Graphit-Compound-Bipolarplatten für Niedertemperatur-PEM-Brennstoffzellen
6. Minh Duc Pham: Wirtschaftlichkeitsanalyse zum Einsatz von Großbatteriespeichern

## 2 Studium und Lehre

7. Tamara Schröter: Entwicklung eines Konzeptes zur Einbindung von EE-Anlagen in die Redispatchplanung unter Berücksichtigung der verschiedenen Marktteilnehmer
8. Marc Gebhardt: Entwicklung und simulative Untersuchung eines Netzmodells mit Integration realer Netzschutzgeräte
9. Daniel Mager: Technische und ökonomische Betrachtung von Bipolarplatten für die Niedertemperatur-PEM-Brennstoffzelle
10. Alexander Markurt: Implementierung einer Beobachtbarkeitsanalyse für elektrische Netze auf Basis reiner PMU-Messungen in MATLAB
11. Stephan Gehrs: Erstellung eines Anforderungskatalogs für den Informationsaustausch aus organisatorischer Sicht für die Energiespeicherintegration
12. Alexander Ulrich: Herstellungskostenkalkulation von Messgeräten für Niedertemperatur-Brennstoffzellen auf Basis des Target-Costing-Ansatzes
13. Patrick Duong: Marktanalyse für USV-Systeme auf Basis von PEM-Brennstoffzellen mit integrierter Reformereinheit

### 2.2.4 Abgeschlossene Master- und Diplomarbeiten

1. Esther Jähne: Bewertung und Optimierung von bereichsübergreifenden Transformationsprogrammen
2. Nidhi Sharma: Development of power train control strategies for optimization of fuel consumption of fuel cell system driven vehicle platform
3. Jann Klatt: Wirtschaftlichkeitsanalyse und Entwicklung von optimalen Betriebskonzepten für Großbatteriespeicher
4. M. Budiguppe Shivaraju: Enhancement of PSS<sup>®</sup>NETOMAC models for the automatic mitigation of network congestion by reduction of renewable Generators
5. Jing Zhu: Model Predictive Control Approach for intelligent building controlling
6. Torsten Fromme: Steuerbarkeit von Erneuerbaren Energiequellen – eine Potentialanalyse
7. Kay Nowotnig: Entwicklung eines dynamischen Netzmodells für den automatischen Lastabwurf
8. Matthias Bölle: Entwicklung eines dynamischen Verfahrens zur optimalen Redispatchplanung
9. Shookofeh Abbaszadeh: Konzeption und Umsetzung der Anbindung dezentraler Energieanlagen mittels IEC 61850
10. Christian Thiel: CE-Zertifizierung und ATEX-Prüfung für ein Brennstoffzellensystem
11. Iaroslav Bystrov: Drahtlose Messdatenübermittlung in Brennstoffzellensystemen
12. Lennart Frank: Wind Power Integration via Power-to-Heat Technologies

13. Stefan Drabe: Entwicklung eines MATLAB-Tools zur binären PMU-Platzierung unter Berücksichtigung von Nebenbedingungen
14. Justyna Herlender: Analysis of the long term effects on residential photovoltaic power plants
15. Tobias Wintsche: Konzeptionierung und Umsetzung eines autonomen Messsystems zur optimierten Evaluation und Planung hybrider Energiesysteme
16. Sridevi Mallappa Hosur: Detection of Voltage Instability
17. Andrii Shypulin: Untersuchung von Spannungshaltungskonzepten in Niederspannungsnetzen
18. Johann Leipi: Optimaler Einsatz von Energiespeichern im marktgeführten und netzdienlichen Betrieb am Beispiel von AA-CAES
19. Oleksii Zakharchenko: Entwicklung eines Tools für das Monitoring der Leitungstemperatur von Freileitungen und Visualisierung des thermischen Netzzustandes
20. Bohdan Vakula: Automatische Berechnung und Aktualisierung der Auslöseeinstellungen von digitalen Schutzgeräten im Verteilungsnetz
21. Christoph Humpisch: Modellierung und Verknüpfung von Komponenten eines Virtuellen Kraftwerks in MATLAB
22. Benjamin Hoepfner: Untersuchungen zu Netzminimierungsmaßnahmen bei unvollständiger Beobachtbarkeit durch PMUs
23. Martin Heger: Speicher für dynamische Energiemanagementsysteme

## 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  
Ü 1 SWS: Dr.-Ing. Mathias Magdowski

- 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  
Ü 2 SWS: Dr.-Ing. Mathias Magdowski  
M.Sc. Anke Fröbel  
M.Sc. Matthias Hirte  
M.Sc. Enrico Pannicke  
Dipl.-Phys. Jörg Petzold

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.

### Non-technical Project Seminar

SS Seminar Dr.-Ing. Mathias Magdowski  
M. Sc. Anke Fröbel  
M. Sc. Enrico Pannicke

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

## 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)

## Grundlagen der Elektrotechnik II

SS V 2 SWS: Prof. Dr.-Ing. Ralf Vick  
Ü 2 SWS: Dr.-Ing. Mathias Magdowski  
M. Sc. Anke Fröbel  
M. Sc. Matthias Hirte  
M. Sc. Enrico Pannicke  
Dipl.-Phys. Jörg Petzold

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“ sollen Studierende Grundkenntnisse in der Programmierung und im Umgang mit Sensoren, Motoren und Regelungen vermittelt werden (siehe Abbildung 2.1). Nach den guten Erfahrungen aus den vorherigen Jahrgängen wurde auch diese Veranstaltung auf die HAITI-Methode umgestellt. Zur Unterstützung wurde ein Handbuch (siehe Abbildung 2.2) geschrieben, um den selbstständigen Einstieg in MATLAB zu ermöglichen. Das Seminar wurde auch um eine Reihe von Vorträgen ergänzt, um den Studierenden wichtige Grundkompetenzen des wissenschaftlichen Arbeitens näher zu bringen.

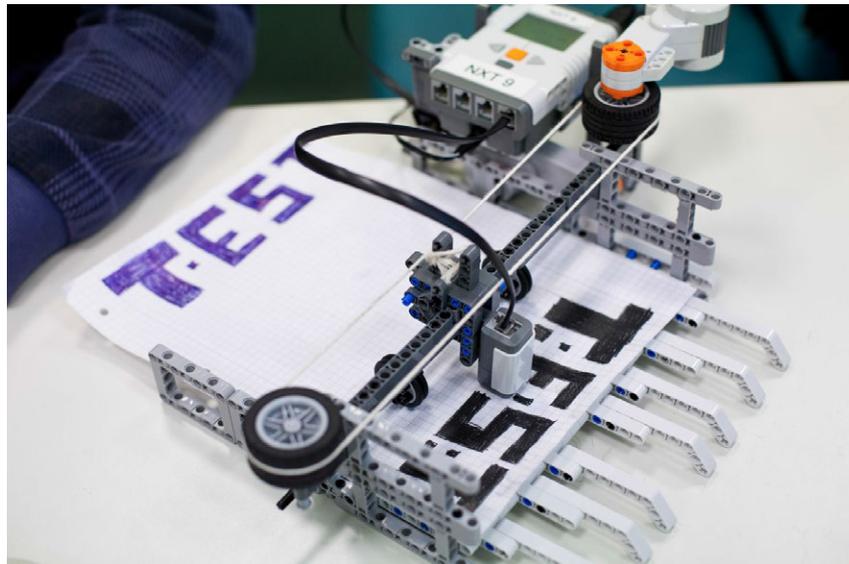


Abbildung 2.1: Im Seminar entwickelter Scanner aus Lego

### Gastvorlesung am German-Russian Institute of Advanced Technology in Kasan, Russland

Seit 2014 besteht zwischen der Otto-von-Guericke-Universität (OvGU) in Magdeburg und der Technischen Andrej-Nikolajewitsch-Tupolew-Universität (KNRTU-KAI) in Kasan, Russland eine Kooperation im Rahmen des German-Russian Institute of Advanced Technologies (GRIAT). 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 Partneruni.

Für den Masterstudiengang „Electrical Engineering and Information Technologies“ hielt Dr. Mathias Magdowski in einem Blockseminar vom 16. bis 20. März den ersten Teil der Vorlesung „Modern Concepts of Electromagnetic Compatibility and EMC Measurements“ in Kasan. Der Kurs bestand aus einer täglichen Vorlesung und einer Rechenübung. Behandelt wurden die Themen:

- Rechnen in Dezibel,
- Gleichtakt- und Gegentaktsignale,
- Zeit- und Frequenzbereich,

## 2.1 Numerische Variablen

**Genauigkeit** Beliebige Zahlen können in unterschiedlichen Genauigkeiten dargestellt bzw. abgespeichert werden. Die am höchsten verfügbare Genauigkeit hängt vom jeweiligen System ab und kann mit **eps** bestimmt werden. MATLAB™ verwendet standardmäßig die doppelte Genauigkeit, d. h. die Dezimalzahlen weisen eine Genauigkeit bis zur 16. Stelle auf. Mit **single(Var)** wird die einfache Genauigkeit verwendet. Ganzzahlige Zahlen werden z. B. mit der Funktion **int32(Var)** erzeugt.

### Hinweis

Gleitkommazahlen zu verwenden, um Variablen auf Gleichheit (==) zu überprüfen ist eine schlechte Idee. Die begrenzte Genauigkeit führt bei Rechnungen zu Rundungsfehlern, weshalb zwei gleiche Ergebnisse auf der letzten Stelle unterschiedlich sein können (siehe unteres Beispiel ??).

### Beispiel 4

```
format long
1/sqrt(2)==cos(pi/4)
1/sqrt(2)
cos(pi/4)
```

Abbildung 2.2: Handbuch zum selbstständigen Einstieg in die Programmiersprache MATLAB (Ausschnitt)

- Kopplungsmechanismen und
- Elementarstrahler.

Wie alle anderen Lehrveranstaltungen am GRIAT wurde auch dieser Kurs in Englisch durchgeführt. Die zehn russischen Studenten des ersten Masterstudiengangs (siehe Abbildung 2.3) waren mit großen Interesse dabei und bedankten sich am Ende der Woche mit Schak-Schak, einer tatarischen Gebäckspezialität, als Abschiedsgeschenk bei ihrem Dozenten.



Abbildung 2.3: Seminargruppe der Gastvorlesung am German-Russian Institute of Advanced Technology in Kasan, Russland mit dem Dozenten Dr.-Ing. Mathias Magdowski

## 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. Xiaowei Wang

- 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

### 2.3.2 Abgeschlossene Forschungsprojekte

Buddhi Ram Banjade: Simulation of the Stochastic Electromagnetic Field Coupling to Transmission Line Networks with CONCEPT-II  
Constantin Jacob: Experimentierplatz zur MR-Spulenentwicklung  
Klemens Opfermann: Weiterentwicklung des Experimentierplatz zur MR-Spulenentwicklung  
Jan Pilarski: Messung der Sensitivität von MR-Empfangsspulen

### 2.3.3 Abgeschlossene Bachelor- und Studienarbeiten

Thomas Gerlach: Elektromagnetische Feldsimulation einer Ablationsnadel in der MR-Bildgebung  
Philipp Wollmann: Einfluss der Kabelverlegung auf die Störemission in der GTEM-Zelle verglichen mit der Störemission in der Absorberhalle

### 2.3.4 Abgeschlossene Master- und Diplomarbeiten

Martin Krüger: Ersatzschaltbilder typischer Antriebsmaschinen für EMV-Simulationen von elektrifizierten Fahrzeugen  
Shabnam Dafedar: Simulation of the Radiated Emissions of Grid Connected Power Converters with the Numerical Electromagnetic Code  
Sanket Sonvalkar: Simulation of the Radiated Emissions of Grid Connected Power Converters using CONCEPT-II  
Pradeepkumar Iyer Kothamangala Subramanyam: Simulation of the Coupling of Stochastic Electromagnetic Fields to Transmission Lines with CONCEPT-II

## 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

- 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 Dr.-Ing. Reinhard Döbbelin M. Sc. Lars Middelstädt

- Leistungshalbleiter-Bauelemente:
  - MOSFET
  - IGBT
  - Diode
  - Thyristor

## 2 Studium und Lehre

unter besonderer Berücksichtigung von

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

### **Simulation und Entwurf von Leistungselektronik**

— Simulation and design of power electronics —

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

- Simulation leistungselektronischer Schaltungen am Beispiel des Simulationsprogramms SIMPLORER
- Modellbildung bei leistungselektronischen Bauelementen
- Besonderheiten der Messtechnik in der Leistungselektronik
- Funktionsprinzipien und Anwendung digitaler Messmittel
- Signalanalysesoftware
- Integration von Leistungshalbleitern
- Ausführung leistungselektronischer Baugruppen

### **Bauelemente der Elektronik**

— Electronic devices —

WS V 2 SWS: Prof. Dr.-Ing. Andreas Lindemann  
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  
Dipl.-Ing. Bastian Strauß  
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  
Ü 1 SWS: Dr.-Ing. Wolfgang Fischer

- 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

- 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 2014/15 V 2 SWS: Prof. Dr.-Ing. Andreas Lindemann  
Dr.-Ing. Reinhard Döbbelin  
Dr.-Ing. Wolfgang Fischer  
Ü 1 SWS: Dr.-Ing. Reinhard Döbbelin  
Dr.-Ing. Wolfgang Fischer  
WS 2015/16 V 2 SWS: Dr.-Ing. Wolfgang Fischer  
Dr.-Ing. Reinhard Döbbelin  
M. Sc. Lars Middelstädt  
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
  - passives
    - \* inductive components — inductors, transformers
    - \* capacitive components — capacitors
- power electronic systems
  - component stress in selected systems
  - dimensioning
  - reliability

### 2.4.3 Abgeschlossene Forschungsprojekte

1. Revanth Kumar Esaragundi: Web-based Calculation and Simulation Tools for Power Electronics
2. Stefan Fleissner: Grundlagenuntersuchungen zur Oszillationsentstehung in leistungselektronischen Schaltungen
3. Rahul Ghadkari: Current Sensing for Power Electronic Applications
4. Sachin Hegde: A Review on Start-up Scheme for Modular Multilevel Converter
5. Arunkumar Jayaraman: GaN Power Semiconductors
6. Kostiantyn Koïro: Betriebsverhalten eines Sperrwandlers mit mehreren Ausgangsspannungen
7. Kranthi Moreddy: Advanced Driver Circuits
8. Rajati Ramachandran: Modular Multilevel Converters for Energy Conversion Systems
9. Jan Ressel: Anlagentechnik für Lebensdaueruntersuchungen an Leistungshalbleiter-Bauelementen
10. Dennis Richter: Inbetriebnahme und Test eines Demonstrators für Leistungshalbleitermodule mit neuer Aufbau- und Verbindungstechnik
11. Bhargava Undrakonda: High-frequency AC-based nanogrids for power distribution
12. Sebastian Wedler: Optimierung und Genauigkeitsuntersuchungen an einer Messschaltung zur indirekten Bestimmung der Sperrschichttemperatur

### 2.4.4 Abgeschlossene Bachelor- und Studienarbeiten

1. Robin Löder: Adaptiver Stromregler für einen Lastwechselfersuchsstand
2. Albert Möller: Leistungselektronischer Wandler zur Einbindung einer Brennstoffzelle in ein Bordnetz

### 2.4.5 Abgeschlossene Master- und Diplomarbeiten

1. Illia Dziundzia: Aufbau, Programmierung und Inbetriebnahme eines CAN-BUS-basierten Messwert-Erfassungssystems mit Mikrocontroller und DSP
2. Oleksandr Krykun: Aufbau und Inbetriebnahme eines mittels Dreipunkt-Umrichter gespeisten Antriebssystems
3. Yuan Lang: Investigation of Power Losses and Thermal Loading in Modular Multilevel Converters
4. Claudia Lehmann: Koordinierte Steuerung von Multi-Terminal-HVDC-Offshore Windparks in Übereinstimmung mit den Netzanschlussregeln
5. Moritz Meinhardt: Entwicklung und Inbetriebnahme einer universellen Treiberkarte mit Überwachungs- und Messfunktionen
6. Son Thai Nguyen: Hochintegrierte leistungselektronische Wandler

## 2 *Studium und Lehre*

7. Franz Reichardt: Ermittlung der parasitären Elemente komplexer Leiterstrukturen mit Hilfe des Feldsimulationsprogramms Fast Henry
8. Nikolaus Wirtz: Multiterminal-HVDC für die Integration von Windenergie und für die Unterstützung von AC-Netzwerken

## 2.5 Institutsebene

### 2.5.1 Exkursionen

#### Teilnahme der IEEE Student Branch Magdeburg am Hochhauslauf der Uni Magdeburg<sup>1</sup>

Beim 17. Uni-Hochhauslauf am 21. Januar im Campustower belegte das Team der IEEE Studentbranch der OVGU (Abbildung 2.4) einen erfolgreichen 8. Platz. Die 14 Etagen mit insgesamt ca. 230 Stufen wurden von Julia Bauch, Lars Middelstädt (beide Lehrstuhl für Leistungselektronik) und Mathias Magdowski (Lehrstuhl für EMV) erklommen. Vorher mussten noch 60 Meter in der Ebene zurückgelegt werden. In der Einzelwertung reichte es für die Plätze 178 (in 106,5 s), 62 (in 73,2 s) und 50 (in 71,6 s). Als weiteres Mitglied der IEEE SB Magdeburg nahm Nils Harder erfolgreich (Platz 118 in 83,8 s) an dem Hochhauslauf teil.

Insgesamt haben 200 Einzelstarter und 16 Mannschaften die Strecke gemeistert.



Abbildung 2.4: Gruppenfoto der IEEE Student Branch Teilnehmer beim Hochhauslauf

#### Excursion of the Student Branch Magdeburg to Siemens<sup>2</sup>

From 11th-12th of May the Student Branch from Otto-von-Guericke-University Magdeburg organized an excursion to Erlangen (Figure 2.5) to visit SIVANTOS and the corporate technology (CT) center of SIEMENS. On the first day Mr. Kircher from SIEMENS CT arranged a broad program under the key aspect of electrical energy technology. A brief overview over research and development at SIEMENS was followed by presentations focusing on compact and energy efficient motors, smart grids as well as multi level converters for high voltage applications.

In the evening the 15 students and postgraduates were able to discuss with and question SIEMENS engineers while having a taste of the local beer at Erlanger Berg, a local area with a high density of beer gardens.

On the next day SIVANTOS opened their development laboratories for the Student Branch. As one of the leaders in highly developed hearing aid technology, SIVANTOS organized a detailed program from a general introduction of SIVANTOS by Dr. Fischer, digital signal processing and signal quality optimization to the development and design of low-power circuits of hearing aid devices. On a tour through the laboratories measurement and evaluation techniques like a

<sup>1</sup>von Dr.-Ing. Mathias Magdowski

<sup>2</sup>from M. Sc. Lars Middelstädt

laser-vibrometer, an anechoic chamber as well as an acoustic chamber for creating a 3D sound environment were presented. Finally, the wireless communication via blue tooth between two hearing aid devices, remote control and smart phone was introduced.



Figure 2.5: Group picture of the IEEE excursion participants and Siemens CT engineers

### **Teilnahme der IEEE Student Branch Magdeburg bei den Uni-Open im Drachenbootrennen<sup>3</sup>**

Am 18.06.2015 fanden zum wiederholten Mal die jährlichen Uni-Open im Drachenbootrennen statt (Abbildung 2.6). Die Magdeburger IEEE Student Branch hat zusammen mit dem Team Biberjäger erfolgreich teilgenommen und von 16 Teams einen hervorragenden 6. Platz erpaddelt. Trotz kalter Brise hatten alle Teilnehmer eine Menge Spaß und freuten sich am Ende über das sehr gute Ergebnis. Eine erneute Teilnahme im nächsten Jahr ist wieder fest eingeplant.



Abbildung 2.6: Die Biberjäger mit der IEEE Student Branch beim Drachenbootrennen

### **Teilnahme der IEEE Student Branch Magdeburg am IEEE Chairmen-Meeting<sup>4</sup>**

Am 20.06.2015 hat die Student Branch Hamburg Harburg alle Chairmen der deutschen Student Branches zu einem Treffen eingeladen (Abbildung 2.7). Das Meeting fand im Anschluss an die jährliche IEEE Student Conference statt, welche ebenfalls von der SB Hamburg Harburg

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

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

ausgetragen wurde. Die Uni Magdeburg wurde vertreten durch Andreas Mantzke und Lars Mittelstädt. Die SB aus Passau, Aachen, Chemnitz, Regensburg und Bielefeld nahmen ebenfalls teil. Nach einer kurzen Vorstellungsrunde aller Studentbranches wurde Organisatorisches besprochen, Fragen zum IEEE internen Abläufen geklärt und die Internetpräsenz der IEEE Germany Section diskutiert sowie deren Neuheiten präsentiert.

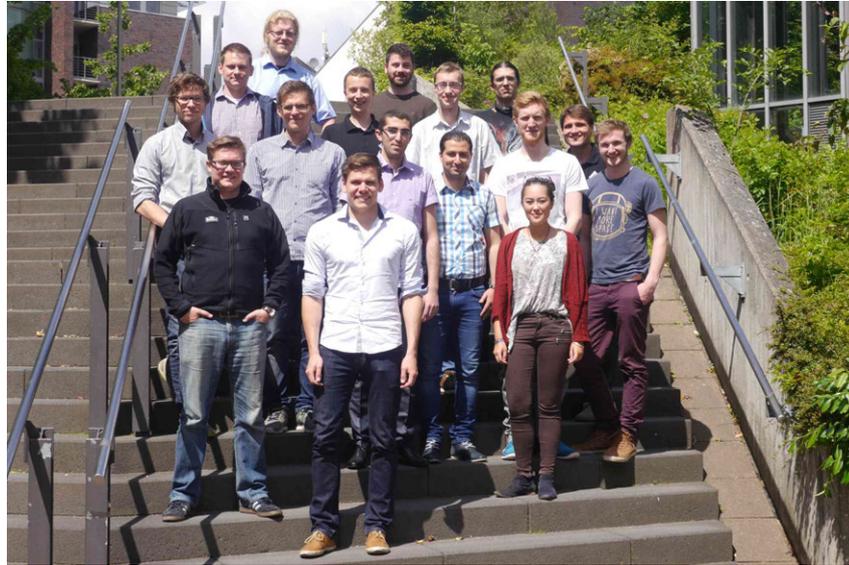


Abbildung 2.7: Teilnehmer des IEEE Student Branch Chairmen Meetings in Hamburg-Harburg

### **Teilnahme der IEEE Student Branch Magdeburg am Firmenstaffellauf in Magdeburg<sup>5</sup>**

Bei der 7. Magdeburger Firmenstaffel am 9. Juli im Elbauenpark belegte das Mixed-Laufteam der IEEE Student Branch (Abbildung 2.8) einen erfolgreichen 141. Platz von ca. 550 anderen Mixed-Staffeln. Die jeweils 3 km liefen Nils Harder, Katrin Ibing, Daniel Helge-Theune, Frederieke Kücke und Mathias Magdowski (Lehrstuhl für Elektromagnetische Verträglichkeit) in einer Gesamtzeit von 01:15:23 h. Bei trockenen, nicht zu warmen und leicht windigen Wetterbedingungen konnten die bei den gemeinsamen Trainingsterminen erarbeiteten Potentiale gut umgesetzt werden. An der diesjährigen Firmenstaffel nahmen insgesamt knapp 1000 Mannschaften teil, davon 44 Mannschaften der Otto-von-Guericke-Universität.

### **Exkursion zu Siemens Berlin am 17.04.2015<sup>6</sup>**

Magdeburger Studenten aus den Bereichen Elektrotechnik, Energietechnik und Maschinenbau bekamen auch in diesem Jahr die Möglichkeit, ihre theoretischen Kenntnisse durch eine Besichtigung von Fertigungsstätten des Industriegiganten SIEMENS zu vertiefen. Am 17.04.2015 wurde im Rahmen der Vorlesung „Netzschutz und Leittechnik“ von Prof. Krebs (SIEMENS Erlangen) eine Exkursion zum Messgerätewerk sowie anschließend zum Schaltgerätewerk von SIEMENS Berlin organisiert (Abbildung 2.9).

Ca. 20 Studenten aus verschiedenen Studiengängen wurden zunächst herzlichst im Messgerätewerk – dem einzigen Produktionsstandort von SIEMENS für Messgeräte – begrüßt. Nach einem Einführungsvortrag über das Portfolio und den Produktionsprozess vor Ort konnten die Studenten die einzelnen Stationen mit eigenen Augen begutachten und bekamen so einen Überblick über

---

<sup>5</sup> von Dr.-Ing. Mathias Magdowski

<sup>6</sup> von M. Sc. Iryna Chychykina



Abbildung 2.8: Gruppenfoto der IEEE Student Branch Staffel beim Firmenstaffellauf in Magdeburg

den hohen Qualitätsstandard von SIEMENS-Produkten. Die automatisierten Schritte umfassten beispielsweise die Leiterplattenbestückung, das selektive Löten von SMD-Einzelkomponenten sowie die Montage und die abschließenden Qualitätstests fertiggestellter Komponenten.

Den zweiten Teil der Exkursion bildete die Besichtigung des Schaltwerks Berlin. Hier erfolgt unter anderem die Fertigung von Trenn- und Schutzschaltern sowie Überspannungsableitern für Mittel- und Hochspannungsanwendungen. Zunächst gab es auch hier eine kurze Einführung in Form einer Präsentation, bei der auch die Geschichte des Stadtteils „Siemensstadt“ näher beschrieben wurde. Bei der anschließenden Werksführung wurden die Produktionslinien für Mittelspannungs- und Hochspannungsschalter Schritt für Schritt erläutert. Insbesondere die baulichen Ausmaße der Einzelkomponenten beeindruckten die Studenten und führten zu interessanten Gesprächen mit den Werksführern.

Besonderer Dank und großes Lob ist abschließend noch einmal den Mitarbeitern der SIEMENS Werke geschuldet, die sich viel Zeit für die Beantwortung von Fragen genommen haben. Das hohe Interesse und die positiven Eindrücke der Teilnehmer führen sicherlich zur weiteren Exkursionen im nächsten Jahr



Abbildung 2.9: Gruppenfoto am SIEMENS Messgerätewerk

### Studentenexkursion zum ENERCON Werk Magdeburg Rothensee<sup>7</sup>

Am 12.06.2015 fand die jährliche Exkursion zum ENERCON Werk in Magdeburg Rothensee statt, die im Rahmen der Vorlesung „Windenergie“ für alle teilnehmenden Studenten der Fakultäten Elektrotechnik und Informationstechnik sowie Maschinenbau organisiert wird. Das ENERCON-Werk in Magdeburg-Rothensee befasst sich u. a. mit der Rotorblatt-, der Gondel- und der Generatorfertigung. Außerdem befindet sich auf dem Gelände des ENERCON Werkes eine der weltweit größten Onshore-Windenergieanlagen. Daher war das Interesse der Studenten an dieser Exkursion sehr hoch, so dass die Gruppe (siehe Abbildung 2.10) in diesem Jahr aus insgesamt 44 Teilnehmern bestand.

Im Anschluss an die Begrüßung haben die Studenten im Rahmen einer kurzen Präsentation allgemeine Informationen über das ENERCON-Gelände, die Geschichte des Werkes und die geplante Entwicklung erhalten. Nach einer Fragerunde, in der den Studenten sowohl tiefergehende Fragen zur Anlagenfertigung, den Anlagenkosten und ebenso zu weiteren Produktionsstätten beantwortet wurden, erhielten die Studenten noch eine ausführliche Werksführung. Im Rahmen dieser Führung konnten die Studenten ausführliche Einblicke in die Fertigungsprozesse erhalten. Abgerundet wurde die Exkursion mit einer Besichtigung der Mess- und Kontrollleinrichtungen der ENERCON WEA E-126/7,850 MW im Inneren des Turmfußes.



Abbildung 2.10: Gruppenfoto

### Kraftwerksbesichtigung KKW Emsland<sup>8</sup>

Im Rahmen einer Exkursion erhielten die Mitarbeiter des Lehrstuhls für elektrische Netze und erneuerbare Energie am 23.11.2015 die Möglichkeit, das Kernkraftwerk Emsland (KKE) in Lingen (Niedersachsen) zu besichtigen, und konnten dabei einen tieferen Einblick in die konventionelle Kraftwerkstechnik und die nukleare Energiegewinnung gewinnen.

Nach knapp vierstündiger Fahrt erreichte die zwölköpfige Gruppe um Lehrstuhlleiter Prof. Wolter das 350 km entfernte Kraftwerksgelände (Abbildung 2.11) und wurde im Besucherzentrum freundlich empfangen. Dort gab es zunächst die Möglichkeit, sich an verschiedenen Exponaten mit dem Standort Lingen sowie der Energieerzeugung durch nukleare Brennstoffe zu informieren. Das heutige KKE befindet sich in direkter Nachbarschaft zum Einspeisepunkt Hanekenfähr, wo es seine produzierte Leistung von max. 1336 MW an die 380 kV-Höchstspannungsebene

<sup>7</sup> von M. Sc. Christian Klabunde

<sup>8</sup> von M. Sc. Stephan Balischewski

abgibt, sowie dem deutlich kleineren Demonstrationskernkraftwerk Lingen (KWL), welches sich allerdings seit 1977 im sicheren Einschluss befindet. Im Anschluss an den Rundgang und die Begutachtung eines Brennelementmodells und eines maßstäblichen Castorbehälters folgten diverse Fachvorträge, beginnend mit einer Schilderung der technischen Funktionsweise des Primärkreises des Druckwasserreaktors, der als einer der modernsten in Deutschland gilt.

Auch das Thema Sicherheit und die verschärften Auflagen im Anschluss an den Vorfall in Fukushima wurden offen angegangen und die verschiedenen Sicherheitssysteme erklärt. Das KKE verfügt über 4 Hauptnotstromaggregate zur Versorgung von Kühlwasserpumpen etc. im Havariefall, welche im 4 Wochenrhythmus gewartet werden, um eine hohe Zuverlässigkeit und Einsatzsicherheit gewährleisten zu können. Sollten diese auf Grund äußerer Einflüsse nicht einsatzfähig sein, stehen 4 weitere Aggregate in getrennten Bunkeranlagen zur Verfügung und übernehmen die Funktionen der primären Notstromversorger. Abschließend wurden die Herausforderungen, die die Energiewende für den Kraftwerksbetreiber mit sich bringt, sowie die Themen Entsorgung und Endlagerung beleuchtet. Im zweiten Teil konnten ausgewählte Bereiche der Anlage, wie zum Beispiel die Dampfaufbereitung und der Turbinenraum, begangen werden. Die Größe von Turbine und nachgeschaltetem Generator beeindruckte die Teilnehmer ebenso wie die hohe Laufruhe angesichts der Drehzahl von  $1500 \frac{1}{\text{min}}$ .

In Folge des Kernkraftmoratoriums wird auch das seit 1988 betriebene KKW Emsland vom Netz gehen. Da es zu den drei modernsten deutschen Kernkraftwerken zählt, fällt es in die letzte geplante Abschaltperiode und wird daher bis 2022 stillgelegt, wodurch die durchschnittliche Jahresenergiemenge von ca. 11 000 GWh nicht mehr zur Verfügung steht.



Abbildung 2.11: Gruppenfoto LENA

### 2.5.2 Studienwerbung

#### **Mehr als 50 interessierte Schülerinnen und Schüler beim Zukunftstag<sup>9</sup>**

Beim jährlichen Zukunftstag, der in diesem Jahr am Donnerstag, den 23. April stattfand, besuchten mehr als 50 Schülerinnen und Schüler die Experimentelle Fabrik. An diesem Tag sollen

---

<sup>9</sup>von Dr.-Ing. Mathias Magdowski

vor allem jüngere Schüler und besonders Schülerinnen für technische Berufe und Arbeitsfelder begeistert werden.

Vom Forschungscampus STIMULATE wurde zusammen mit dem Lehrstuhl für Elektromagnetische Verträglichkeit eine Demonstrationsreihe „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
- Rettungswagen der Zukunft
- Mit wie vielen funkferngesteuerten Autos kann man gleichzeitig fahren?
- Warum hört man das Handy manchmal im Radio?

lernten die Schüler interessante Details über Medizintechnik und elektromagnetische Verträglichkeit und konnten auch selbst kleine Experimente durchführen.



Abbildung 2.12: Die Schülerinnen und Schüler gingen beim Zukunftstag der Frage nach, wie eine Funkübertragung funktioniert.

### Mäuse in der Absorberhalle<sup>10</sup>

Am bundesweiten Türöffner-Tag von MausFans für MausFans öffnete der Lehrstuhl für Elektromagnetische Verträglichkeit am 3. Oktober zum zweiten Mal die Türen der Absorberhalle in der Experimentellen Fabrik. In kleinen Experimenten konnten Kinder zwischen 5 und 10 Jahren alles über Funkwellen und ferngesteuerte Autos erfahren.

In Mitmach-Stationen konnten die Kinder ausprobieren, wie ein ferngesteuertes Auto funktioniert, wie die Funksignale übertragen werden und warum sich manche Fernbedienungen gegenseitig stören. Außerdem wurde gezeigt, wie man Funkwellen mit einem Metallgitter unterdrücken kann und warum Essen in einem Metalltopf in der Mikrowelle nicht warm wird. Die sechs Vorführungen zwischen 10 und 16 Uhr für jeweils etwa 10 Kinder waren mehrere Wochen im Voraus ausgebucht. Die Vorbereitungen und Anstrengungen der Organisatoren wurden mit vielen interessierten, erstaunten und begeisterten Kinderaugen belohnt.

<sup>10</sup> von Dr.-Ing. Mathias Magdowski



Abbildung 2.13: Zahlreiche Kinder kamen zum Maus-Türöffner-Tag am 3. Oktober in die Absorberhalle

## 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.

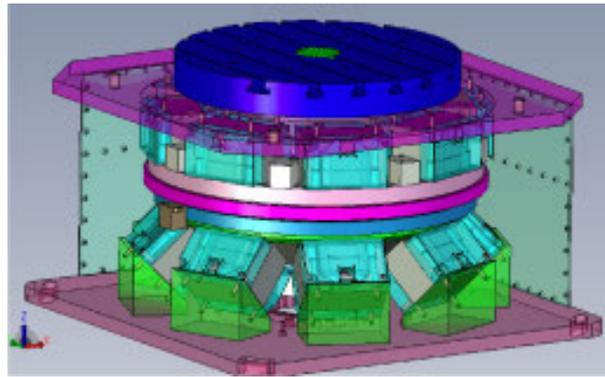


Abbildung 3.1: Magnetisch gelagerter Rundtisch

**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.

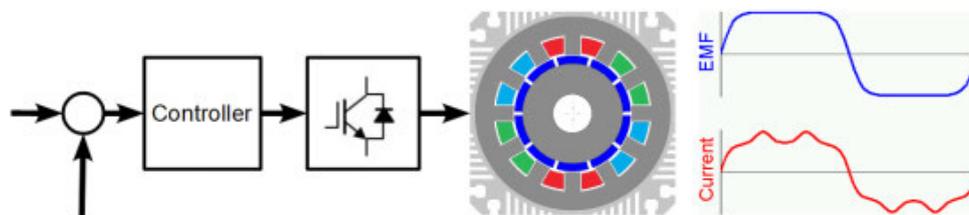


Abbildung 3.2: Regelung von Maschinen nicht sinusförmiger elektromotorischer Kraft

**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

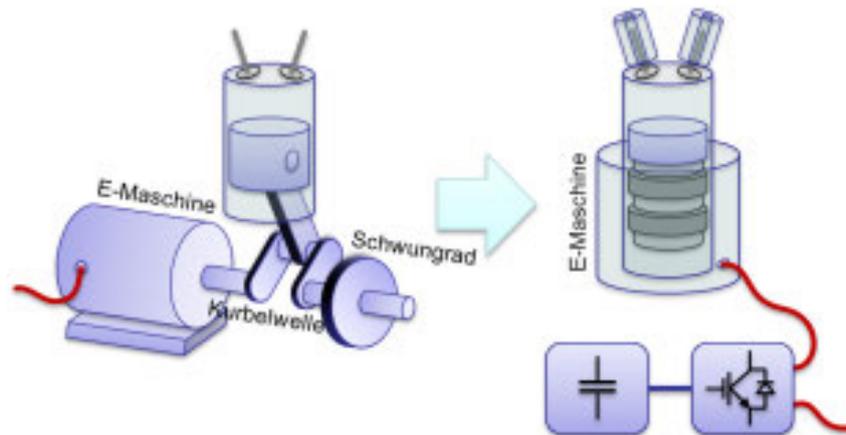


Abbildung 3.3: Einsatz von elektrischen Linearmaschinen bei Verbrennungsmotoren

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.

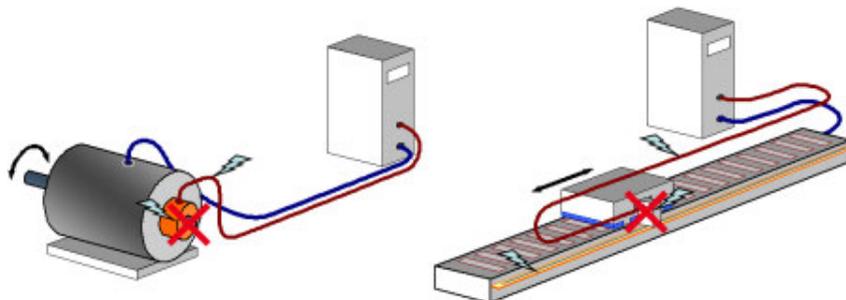


Abbildung 3.4: Sensorlose Regelung elektrischer Maschinen

### 3.1.2 Forschungsprojekte

#### Hochdynamische Regelung eines Verbrennungsmotors zur Untersuchung der Änderung des Kolbenhub- und Drehzahlverlaufs<sup>1</sup>

**Motivation** Der Verbrennungsmotor ist in der modernen Welt nicht mehr wegzudenken, da er bislang der am häufigsten eingesetzte Fahrzeugmotor ist. Um, unter anderem, den Wirkungsgrad des Gesamtantriebs zu verbessern, wird vermehrt im Bereich des Hybridfahrzeugs geforscht.

**Versuchsaufbau/Messungen** Die Kombination einer hochdynamischen elektrischen Maschine mit einem hochdynamischen Verbrennungsmotor bildet eine interessante Forschungsgrundlage. Die hochdynamische elektrische Maschine ist hierbei eine Synchronmaschine, mit einer verhältnismäßig

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

kleinen Massenträgheit. Bei dem Verbrennungsmotor handelt es sich um einen Einzylinder 4-Takt-Ottomotor, welcher ohne zusätzliche Schwungmasse betrieben wird. Mit diesem Versuchsaufbau soll gezeigt werden, wie stark der Drehzahlverlauf (vgl. Bild 3.5a) und somit der Kolbenhubverlauf beeinflusst werden kann. Für diesen Versuchsaufbau wurde eine Regelungsstruktur entworfen und vorgestellt.

Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, wurde eine Optimierung des Kraftstoffverbrauchs mit dem Massenschwungrad an einem Arbeitspunkt bei vorgegebener elektrischer Leistung durchgeführt. Optimiert wurde dabei die Drehzahl und der Zündzeitpunkt. (vgl. Bild 3.5b) Anschließend wurden einige Versuche ohne Massenschwungrad durchgeführt und untersucht wie sich dies auf den Kraftstoffverbrauch auswirkt.

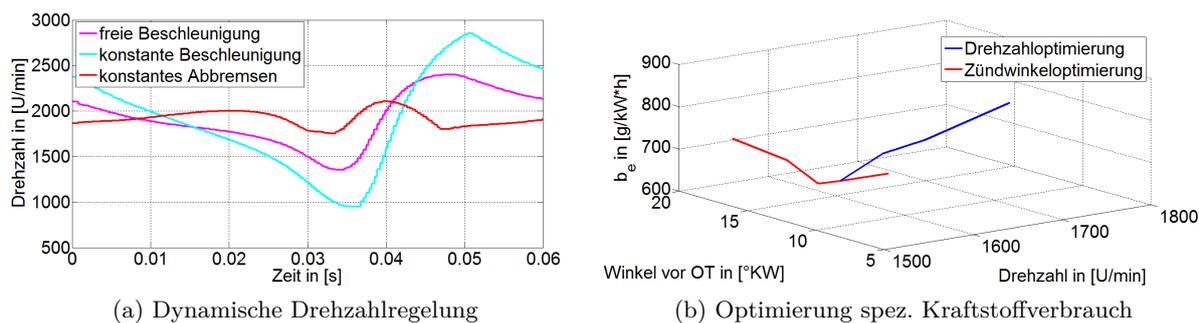


Abbildung 3.5: Ergebnisse hochdynamische Regelung

Auf dem Bild 3.5a ist dargestellt, wie sich die Drehzahl bei einem trägheitsarmen Verbrennungsmotor innerhalb eines Taktes verändern lässt. Dieser Verbrennungsmotor wurde mit einer Standarddrehzahlregelung geregelt und als Vergleich zusätzlich zur Drehzahlregelung, mit einer Beschleunigung bzw. Abbremsung des Verbrennungstaktes, aufgeschaltet. Auf dem Bild 3.5b wird gezeigt, wo der optimale Arbeitspunkt ermittelt werden konnte.

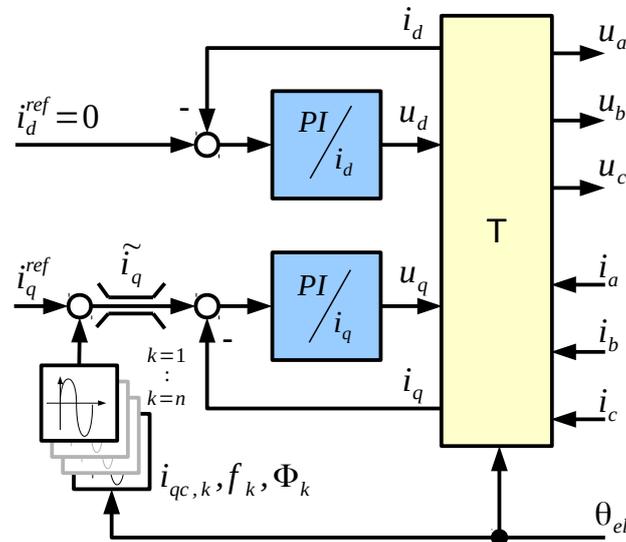
### 3.1.2.1 Kompensation von Drehmomentschwingungen in Transversalflussmaschinen

Als Teil aktueller und vergangener Projekte stellt die Transversalflussmaschine (TFM) weiterhin einen wichtigen Forschungsgegenstand am Lehrstuhl für elektrische Antriebssysteme dar. Beschränkte sich die Arbeit im letzten Jahr noch auf Literaturrecherche, Parameteridentifikation und Modellentwicklung, wurden im ablaufenden Jahr praktische Untersuchungen hinsichtlich der Kompensation von Drehmomentschwingungen eines dreisträngigen Prototyps der Firma Ramme Elektromaschinen GmbH und einer zweisträngigen Ausführung der Landert Motoren AG durchgeführt.

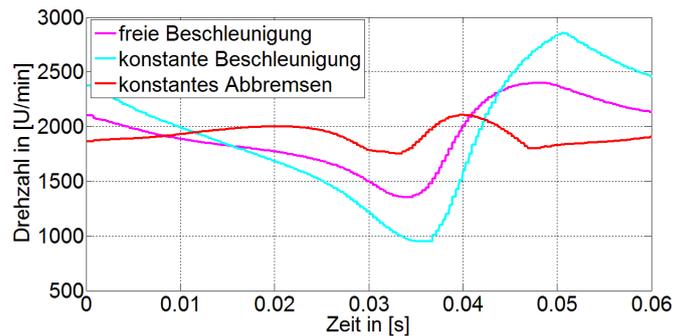
Die Transversalflussmaschine bietet im Vergleich zu herkömmlichen Synchronmaschinen den Vorteil ein hohes Drehmoment bei kompakter Bauweise (hohe Drehmomentdichte) und niedriger Drehzahl bereitzustellen. Von Nachteil ist die stärker ausgeprägte Drehmomentwelligkeit. Durch eine Vorsteuerung des eingepprägten Stroms besteht die Möglichkeit die Drehmomentwelligkeit zu dämpfen und entstehende Vibrationen und Geräusche zu minimieren.

Die Entstehung der Drehmomentwelligkeit lässt sich im wesentlichen auf zwei Ursachen zurückführen. Zum einen tritt eine Rastkraft auf, die bereits ohne Stromeinprägung wirksam ist und störende Tangentialkräfte verursacht. Zum anderen kann es aufgrund von Montagetoleranzen zu weiteren ungewollten Drehmomentschwingungen kommen. Der charakteristische Verlauf der Drehmomentwelligkeit ergibt sich aus der Konstruktion der Transversalflussmaschine und lässt sich aus Polpaarzahl und Drehzahl ableiten.

Das messbare Drehmoment ist in zwei Komponenten zerlegbar. Einen mittleren Anteil, welcher dem speisenden Strom proportional ist und jener Anteil, der für die Drehmomentschwingungen verantwortlich ist. Letztgenannter soll nach Möglichkeit eliminiert werden. Hierzu werden Sinusströme unterschiedlicher Frequenz, Amplitude und Phasenlage aufgeschaltet (Abb.: 3.6).



(a) Blockschaltbild



(b) Messergebnis

Abbildung 3.6: Kompensation der Drehmomentschwingungen durch Vorsteuerung des Stromes  $i_q$

Die Anzahl der aufzuschaltenden Sinuskomponenten richtet sich nach dem Frequenzspektrum des Drehmoments und beinhaltet mindestens den Anteil der Rastfrequenz. Alle experimentellen Untersuchungen an der drei- und zweisträngigen TFM wurden mit einem standardisierten Wechselrichtermodul durchgeführt. Durch den Einsatz der feldorientierten Regelung konnte ein zuverlässiger geregelter Betrieb erreicht werden, der die Basis für die Implementierung der Methode zur Verringerung der Drehmomentwelligkeit bildete. Exemplarisch sind die Ergebnisse der Untersuchung am Beispiel der zweisträngigen TFM in Abbildung 3.7 dargestellt. Die Drehmomentschwingungen können durch Kompensation mehrere Frequenzkomponenten um 30 dB gesenkt werden.

Das Verfahren zeichnet sich besonders durch seine Einfachheit und hohe Effektivität aus. Weitergehende Untersuchungen zielen auf eine adaptive Regelungen ab, die schon in ihren Grundzügen am praktischen Aufbau erprobt wurde.

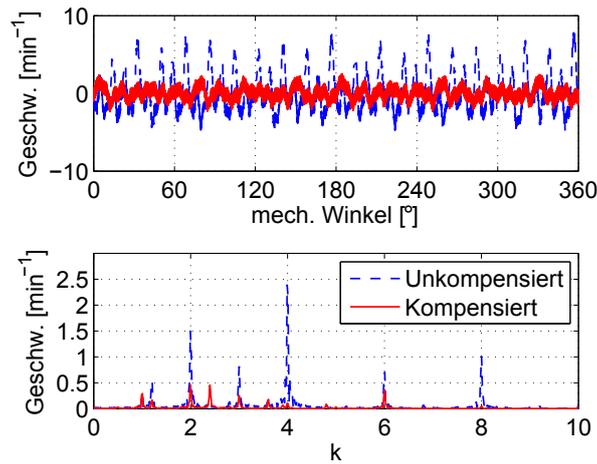


Abbildung 3.7: Kompensation der Drehmomentschwingungen bei 80 % Nennmoment und  $40 \frac{1}{\text{min}}$

### Umrichterbasierter Inselnetzbetrieb von Asynchrongeneratoren<sup>2</sup>

Die Gewinnung von elektrischer Energie aus fließenden Gewässern ist ein wichtiger Entwicklungsfaktor im Bereich der Urbanisierung ländlicher, schwachausgebauter Gebiete. Hierbei ist die Kombination von Wasserkraftanlagen in Verbindung mit Asynchrongeneratoren ein weitverbreiteter Anwendungsfall. Die eingesetzten Asynchronmaschinen sind robust, relativ wartungsfreundlich und im Vergleich zu permanenterregten Synchronmaschinen meist noch kostengünstiger. Nachteilig ist die unzureichende Inselnetzfähigkeit, was den Einsatz dieser Technik in nicht bzw. schlecht elektrisch ausgebauten Gebieten wiederum einschränkt. Werden die verwendeten Asynchrongeneratoren mittels Selbsterregung durch Kondensatorschaltungen betrieben, so liefern diese meist eine unzureichende Frequenz und Spannungsqualität bei Last- bzw. Drehzahlschwankungen.

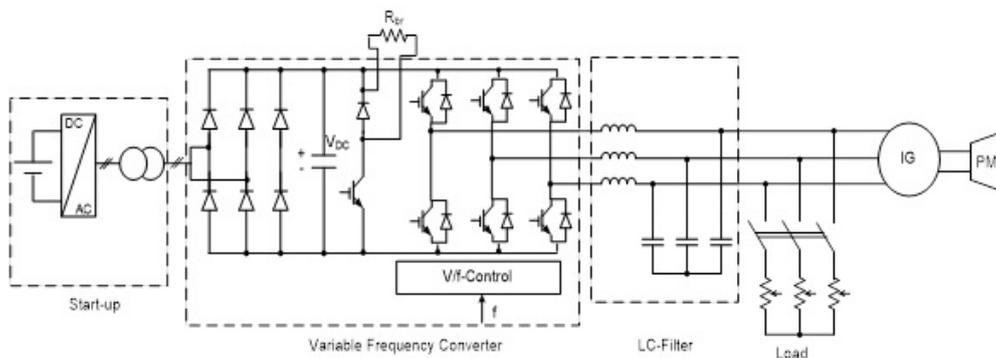


Abbildung 3.8: Systemaufbau

Das in Abbildung 3.8 dargestellte System besteht aus einem industriell verfügbaren Standardfrequenzumrichter in Kombination mit einem Asynchrongenerator. Diese Konstellation liefert eine nahezu konstante Frequenz und Spannung im Inselnetzbetrieb bei veränderlichen Lastverhältnissen, ungeregelter Kraftmaschine und ohne zusätzliche Kondensatoren zur Selbsterregung.

Die experimentellen Ergebnisse in Abbildung 3.9 zeigen, dass der Frequenzumrichter die notwendige Blindleistung für ein Inselnetzbetrieb von Asynchrongeneratoren bereitstellen kann. Das vorgestellte System liefert aufgrund des konstanten  $v/f$ -Verhältnisses eine sinusförmige Netzspannung mit konstanter Amplitude und Frequenz auch bei unterschiedlichen Lastverhältnissen.

<sup>2</sup>von Dr.-Ing. Thomas Schallschmidt

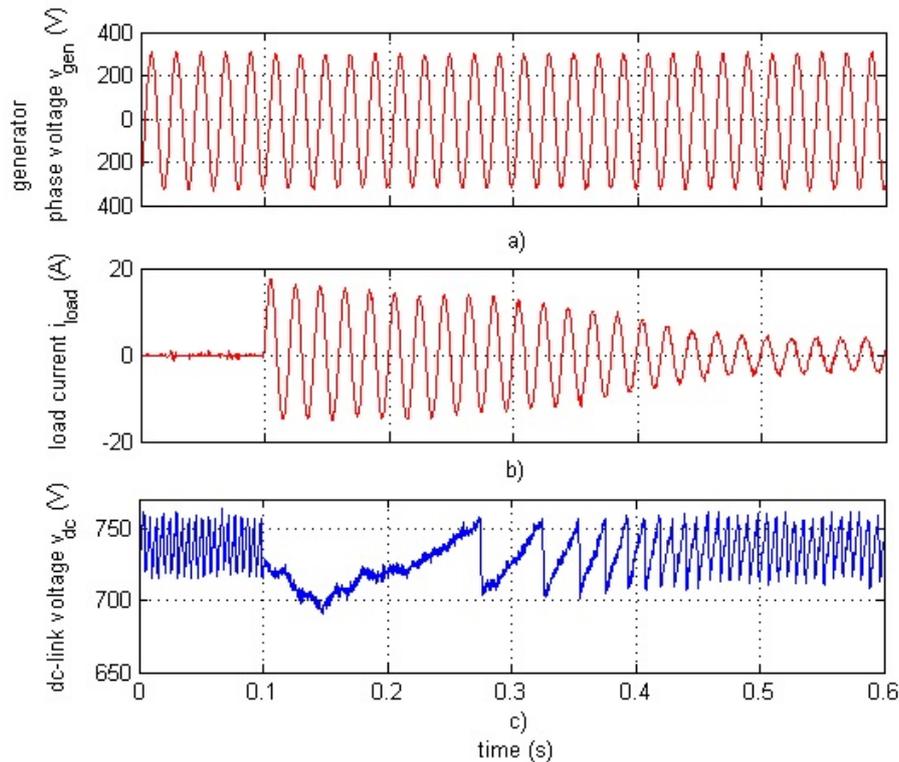


Abbildung 3.9: Verlauf der Systemgrößen bei induktiver Last

Wegen der geringen Anzahl an Systemkomponenten ist der Aufbau relativ einfach und auch kostengünstig, da auf weitere zusätzliche Regelungen wie z. B. für die Turbinendrehzahl verzichtet werden kann. Die Komplexität der Systemstartvorrichtung kann noch reduziert werden, wenn die Unterspannungsgrenze des Umrichters kleiner oder auch parametrierbar ist. Die über den Bremswiderstand abgeführte Leistung kann durch eine Systemerweiterung z. B. einem Wärmespeicher besser verwertet werden, was die Effizienz der Gesamtanlage erhöht.

Mit der Überführung des System in den Praxisbetrieb an der *Adama Science and Technology University* in Äthiopien und durch die Verwendung auf dem Forschungsversuchsträger VECTOR im Netzwerk Flusstrom sind weitere Ergebnisse aus Langzeitversuchen und mögliche Fehlerbetrachtungen zu erwarten.

### Fault-Tolerant Inverter for Power Flow Control in Variable-Speed Four-Wire Permanent-Magnet Generators<sup>3</sup>

A strategy for fault detection and tolerance on the inverter that controls power flow in variable-speed permanent-magnet generators is proposed in this paper. The performance of the proposed strategy is analyzed in two different four-wire topologies. In the first topology, the neutral point of the generator is connected to the middle point of the DC-link capacitor bank, whereas in the second topology, it is connected to a fourth leg of the inverter. The main contribution of this paper resides in the control scheme, which allows a steady operation through a fault occurrence without the need of reconfiguring neither the inverter topology nor the control algorithm.

In this way, transients and the use of extra hardware components are avoided. In addition, a control loop that allows limiting the generator losses at any operation point is presented in order

<sup>3</sup>from G. R. Catuogno, G. O. Garcia and R. Leidhold

to protect the machine. Finally, experimental results, obtained from a laboratory prototype, validate the practical feasibility of the proposed strategy. This research work was a result of the cooperation among the OvGU Magdeburg, Germany, the Universidad Nacional de San Luis, Argentina and the Universidad Nacional de Río Cuarto, Argentina.

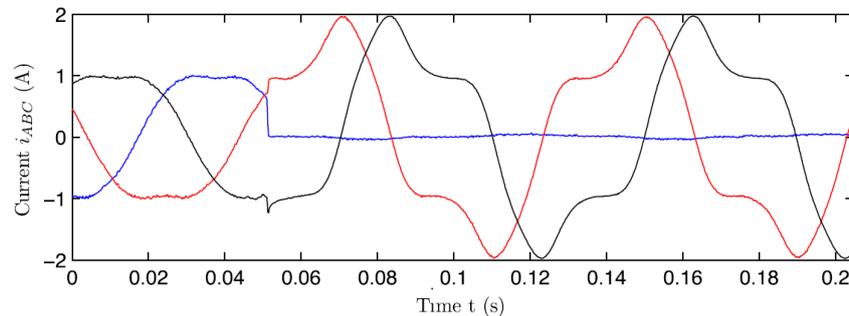


Figure 3.10: Currents  $i_{abc}$  in variables abc

The evolution of variables with the proposed controller during a fault due to two open switches on the same leg is analyzed and shown in Fig. 3.10 and 3.10. The test starts with the inverter with no fault. Then, at  $t = 0.0512$  s, the fault occurs. The evolution of currents for the test carried out is presented in Fig. 3.10. At the instant fault occurs, the current flowing through one of the phase gets null. The increase in the current in the neutral and phases with no fault at fault inception can be observed in the same figure. Figure 3.11 shows the evolution of instantaneous power. It can be concluded from this figure that the total power  $P_T$  is kept constant even when instantaneous power values  $p$  and  $p_0$  evolve showing high fluctuations.

More details can be found in: G. R. Catuogno, G. O. Garcia, and R. Leidhold, „Fault-Tolerant Inverter for Power Flow Control in Variable-Speed Four-Wire Permanent-Magnet Generators,“ IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 62, pp. 6727-6736, 2015.

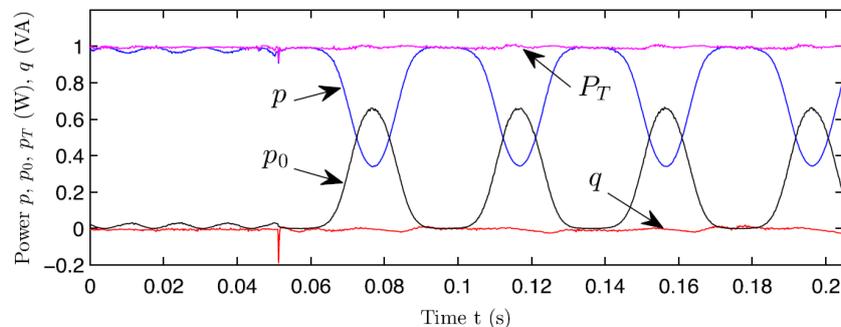


Figure 3.11: Instantaneous power components.  $p$ : non-homopolar power,  $p_0$ : homopolar power,  $P_T$ : total active power,  $q$ : instantaneous reactive power.

### 3.1.3 Promotionen

#### Dr.-Ing. Sebastian Ebersberger: Lagergeberlose Positionsregelung eines permanenterregten Synchronlinearmotors

Gutachter:

- Prof. Dr.-Ing. Bernhard Piepenbreier, Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg
- Prof. Dr.-Ing. Roberto Leidhold, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

verteidigt am 13. Februar 2015 an der Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg

### Dr.-Ing. Dirk Paulus: Beliebige Injektion für permanent erregte Synchronmaschinen

Gutachter:

- Prof. Dr.-Ing. Ralph Kennel, Technische Universität München
- Prof. Dr.-Ing. Roberto Leidhold, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

verteidigt am 02. Juli 2015 an der Technischen Universität München

#### 3.1.4 Veröffentlichungen

##### Zeitschriften- und Konferenzbeiträge

- [1] P. M. D. L. Barrera, G. R. Bossio und R. Leidhold, „Online voltage sensorless high-resistance connection diagnosis in induction motor drives“, *IEEE transactions on industrial electronics : A publication of the IEEE Industrial Electronics Society. - New York, NY : IEEE*, Bd. 62, Nr. 7, S. 4374–4384, 2015. Adresse: <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2014.2385038>.
- [2] G. R. Barrera P. M. and De La Bossio und R. Leidhold, „Online voltage sensorless high-resistance connection diagnosis in induction motor drives“, *IEEE transactions on industrial electronics : A publication of the IEEE Industrial Electronics Society. - New York, NY : IEEE*, Bd. 62, Nr. 7, S. 4374–4384, 2015. Adresse: <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2014.2385038>.
- [3] S. Hieke, M. Stamann und R. Leidhold, „Compensation of production and principle related torque fluctuations of transverse flux machines“, in *Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik : IKMT 2015 ; Beiträge der 10. ETG/GMM-Fachtagung, 14. - 15. September 2015 in Köln. - Berlin : VDE-Verl.* 2015, S. 140–144.
- [4] K. Ibrahim und R. Leidhold, „Variable frequency converter based voltage and frequency regulation of induction generator for stand-alone system application“, in *AFRICON, 2015 : 14- 17 Sept. 2015, Addis Ababa, Ethiopia. - Piscataway, NJ : IEEE.* 2015, S. 5. Adresse: <http://dx.doi.org/10.1109/AFRCON.2015.7331969>.
- [5] —, „Active power delivery capability improvement of self-excited induction generator for remote and rural area applications“, in *AFRICON, 2015 : 14- 17 Sept. 2015, Addis Ababa, Ethiopia. - Piscataway, NJ : IEEE.* 2015, S. 5. Adresse: <http://dx.doi.org/10.1109/AFRCON.2015.7332046>.
- [6] A. Gerlach, H. Rottengruber und R. Leidhold, „Hochdynamische regelung eines verbrennungsmotors zur untersuchung der änderung des kolbenhub- und drehzahlverlaufs“, in *Smart, effizient, mobil : 12. Magdeburger Maschinenbau-Tage ; 30. September und 1. Oktober 2015. - Magdeburg : Univ.* 2015, S. 10.
- [7] G. O. Catuogno G. R. and Garcia und R. Leidhold, „Fault-tolerant inverter for power flow control in variable-speed four-wire permanent-magnet generators“, *IEEE transactions on industrial electronics : A publication of the IEEE Industrial Electronics Society. - New York, NY : IEEE*, Bd. 62, Nr. 11, S. 6727–6736, 2015. Adresse: <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2015.2438771>.
- [8] T. Schallschmidt, K. Ibrahim und R. Leidhold, „Umrichterbasierter Inselnetzbetrieb von Asynchrongeneratoren“, in *Smart, effizient, mobil : 12. Magdeburger Maschinenbau-Tage ; 30. September und 1. Oktober 2015. - Magdeburg : Univ.* 2015, S. 1.

### Dissertationen und Bücher

- [1] R. Kasper, R. Leidhold, A. Lindemann und M. Schünemann, „Elektrische Fahrtriebe“, in *Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs – Basiswissen*, H. Tschöke, Hrsg., Ser. ATZ/MTZ-Fachbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015, S. 35–41, auch als eBook verfügbar, ISBN: 9783658046439. DOI: 10.1007/978-3-658-04644-6.
- [2] —, „Potentiale elektrischer Einzelradantriebe“, in *Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs: Basiswissen. - Wiesbaden : Springer Vieweg*. 2015, S. 42–49. Adresse: [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-04644-6\\_2](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-04644-6_2).
- [3] —, „Elektrische Antriebsmaschinen“, in *Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs: Basiswissen. - Wiesbaden : Springer Vieweg*. 2015, S. 19–49. Adresse: [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-04644-6\\_2](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-04644-6_2).
- [4] A. Kiselev und R. Kuznetsov Alexander and Leidhold, „Multivariable generalized predictive control of a synchronous motor drive used in an electric vehicle“, in *9th International Conference-Workshop Compatibility and Power Electronics (CPE)*. - Piscataway, NJ : IEEE. 2015, S. 566–571. Adresse: <http://dx.doi.org/10.1109/CPE.2015.7231138>.

## 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

#### **Projekt SECVER: Sicherheit und Zuverlässigkeit von Verteilungsnetzen auf dem Weg zu einem Energieversorgungssystem von morgen<sup>4</sup>**

Die Grundidee des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Projektes SECVER ist es, Lasten und Erzeugungsanlagen entsprechend der jeweiligen Situation im Netz zu steuern bzw. regelungstechnisch anzupassen. Voraussetzungen dafür sind ein hochgenaues

---

<sup>4</sup>von M. Sc. Marc Richter

Messsystem, geeignete Algorithmen zur Beurteilung des Netzzustandes sowie zur Bestimmung von Gegenmaßnahmen und eine zuverlässige IKT-Struktur zur Übertragung von Mess- und Steuersignalen im betrachteten Netzbereich (siehe Abb. 3.12).

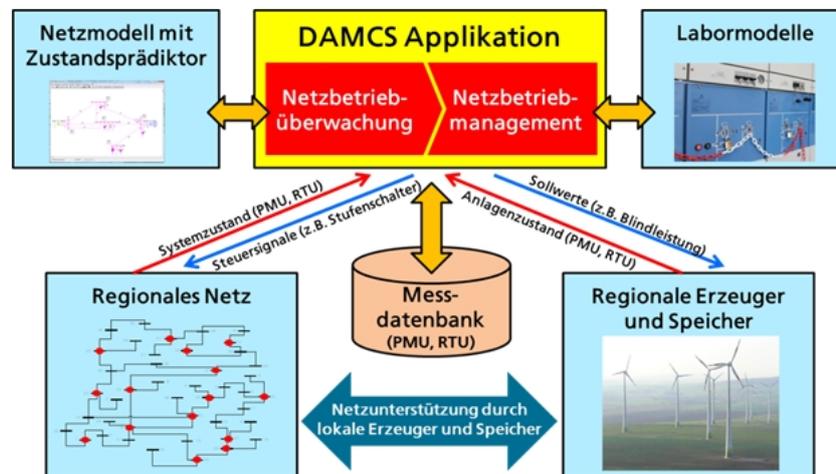


Abbildung 3.12: Struktur des Projektes SECVER

Das geplante Mess- und Steuerungssystem soll dabei parallel zur bestehenden Leitwarte einen Beitrag zu einer sicheren und zuverlässigen Führung von Verteilnetzen mit hohem Anteil regenerativer Erzeuger leisten und Handlungsempfehlungen für Verteilnetzbetreiber zur Vermeidung oder Behebung von kritischen Netzsituation ausstellen. Dazu bedient es sich modernster Technologien. Die synchrone Erfassung des Systemzustandes (Monitoring) geschieht mit Hilfe von hochgenauen Zeigermessgeräten, sogenannten Phasor Measurement Units (PMU). Remote Terminal Units (RTU) ermöglichen anschließend die ferngesteuerte Anpassung (Control) von Wirk- und Blindleistungswerten dezentraler Anlagen zur Optimierung des Energieversorgungssystems. Damit sollen erweiterte Funktionalitäten im Hinblick auf Überwachung, Schutz und Betriebsführung bereitgestellt werden.

Der Lehrstuhl Elektrische Netze und Erneuerbare Energie ist dabei zusammen mit dem Fraunhofer IFF aus Magdeburg sowohl maßgeblich an der pilothaften Implementierung eines solchen Distribution Area Monitoring & Control System (DAMCS) beteiligt, als auch an der in diesem Zusammenhang erforderlichen Entwicklung der benötigten Algorithmen und Software-Lösungen. Die Installationsarbeiten innerhalb des seit Dezember 2013 laufenden Projektes sind im Oktober 2015 abgeschlossen wurden (siehe Abb. 3.13).

Die weiteren Schritte liegen nun in der Auswertung der eingehenden Messwerte und in der praktischen Validierung der entwickelten Algorithmen zur Optimierung des Systems, insbesondere im Hinblick auf Spannungshaltung. Im Mai 2016 soll die Bearbeitung des Projektes abgeschlossen sein.

### 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 Hintergrund der zunehmenden Integration regenerativer Energien, die sich durch eine fluktuierende und nur bedingt vorhersehbare Einspeisung auszeichnen, nehmen Energiespeicher in der

<sup>5</sup> von Dr.-Ing. Natalia Moskalenko



Abbildung 3.13: M. Sc. Przemyslaw Trojan bei PMU-Installationsarbeiten

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 110kV-Verteilnetz um diesen Standort modelliert werden. Einen Überblick über das modellierte Netz gibt Abbildung 3.14. Im Mittelpunkt der Untersuchungen steht derzeit der Einsatz des ADELE-Speichers im Bereich der Netzbetriebsführung. Es zeigt sich, dass der ADELE-Speicher unter der Voraussetzung günstiger Kavernenstandorte dazu in der Lage ist das elektrische Netz effektiv zu entlasten und somit aus technischer Sicht als Konkurrenz zum Einspeisemanagement betrachtet werden kann.

Aufgrund des hohen Kapazitätsbedarfs ist der ADELE-Speicher jedoch keine ökonomisch sinnvolle Alternative zu konventionellen Netzausbaumaßnahmen. Darüber hinaus wird im Rahmen dieses Projektes der Einfluss des ADELE-Speichers auf das elektrische Netz unter der Voraussetzung einer marktorientierten Speicherfahrweise genauer untersucht. Für alle Analysen wird die statische Lastflussberechnung in  $\frac{1}{4}$ -Stunden-Schritten für die Jahre 2014, 2025 und 2035 verwendet.

Im Hinblick auf die Systemregelung und die Systemstabilität werden die dynamischen Eigenschaften der adiabaten Druckluftspeichertechnologie hinsichtlich der Erbringung von Sekundärre-

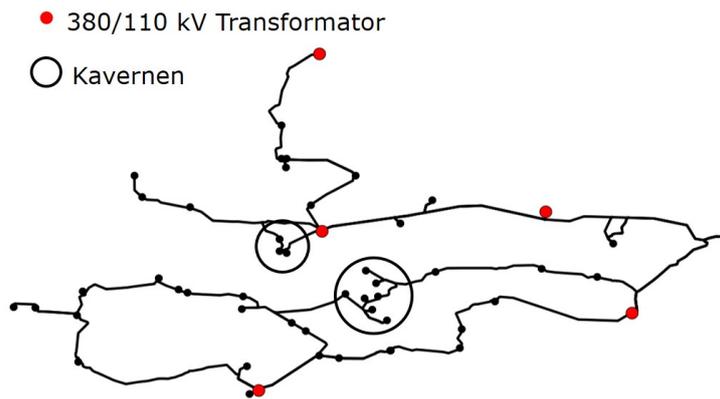


Abbildung 3.14: Struktur des 110 kV-Verteilnetzmodells mit Kavernenstandorten

gelleistung und Minutenreserve untersucht. Zu diesem Zweck ist ein dynamisches Speichermodell entwickelt worden, das in kaskadierter Form und unter Berücksichtigung der stationären und zeitabhängigen Parameter des Speichersystems die Aktivierung und Erbringung von Regelleistung nachbildet. Dieses dynamische Modell ermöglicht darüber hinaus die Analyse der Auswirkungen der Regelleistungserbringung sowohl auf das regionale 110 kV-Verteilnetz als auch auf das überregionale Verbundnetz.

### **Projekt: ESPEN – Potentiale elektrochemischer Speicher in elektrischen Netzen in Konkurrenz zu anderen Technologien und Systemlösungen<sup>6</sup>**

Das Projekt ESPEN – Potentiale elektrochemischer Speicher in elektrischen Netzen in Konkurrenz zu anderen Technologien und Systemlösungen klärt die Frage, welche elektrochemischen Speicher dazu in der Lage sind, einen Beitrag zur Wirtschaftlichkeit, Stabilität und Sicherheit der zukünftigen Stromversorgung (Kraftwerkspark und Netze) im Vergleich zu anderen Technologien und Systemlösungsansätzen zu leisten. Unter diesem Hintergrund besteht das übergeordnete Ziel dieses Projektes darin, einen Leitfaden für die weiteren technischen Entwicklungsschritte zu erstellen und Anpassungen der technischen und regulatorischen Rahmenbedingungen vorzuschlagen. Diese Handlungsempfehlungen sollen die Netz- und Systemintegration von elektrochemischen Energiespeichern erleichtern.

In dem Verbundprojekt umfassen die Aufgaben des Lehrstuhls LENA die Bestimmung der notwendigen Speicherleistung und -kapazität für den netzorientierten Speichereinsatz innerhalb generischer Niederspannungsnetze. Weiterhin wird der notwendige Informationsaustausch zwischen Akteuren der elektrischen Energieversorgung untersucht. Hierzu wurden 3 Szenarien für den Energiespeichereinsatz definiert: marktorientiert, netzdienlich und eigenverbrauchsorientiert. Für alle 3 Anwendungsfälle wurden die beteiligten Akteure definiert sowie Aktionsdiagramme entwickelt, welche die Zusammenhänge zwischen den Akteuren abbilden.

Weiterhin wurden Referenzarchitekturen für jeden Anwendungsfall erstellt. Eine Referenzarchitektur ist ein dreidimensionales Modell, das die fünf miteinander agierenden Schichten (Business, Funktion, Information, Kommunikation und Komponente) mit den beiden Dimensionen der Smart-Grid-Ebene verschmilzt. Diese setzt sich aus Zonen, die die hierarchischen Ebenen der Netzführung darstellen (Prozess, Feld, Betrieb, Unternehmen und Markt) und Domänen, die die gesamte Energieumwandlungskette abbilden (Erzeugung, Übertragung, Verteilung, dezentrale Erzeugung, Energiespeicher und Endverbraucher), zusammen. Die an den zuvor definierten Anwendungsfällen beteiligten Akteure werden jeder Schicht zugeordnet, um mit Hilfe der vollständigen

<sup>6</sup>von M. Sc. Christian Klabunde

Referenzarchitektur die Interaktionen und den Informationsaustausch zwischen den Akteuren analysieren zu können. Die Erstellung einer Referenzarchitektur auf Basis von Anwendungsfällen wird anhand von Abbildung 3.15 noch einmal verdeutlicht.

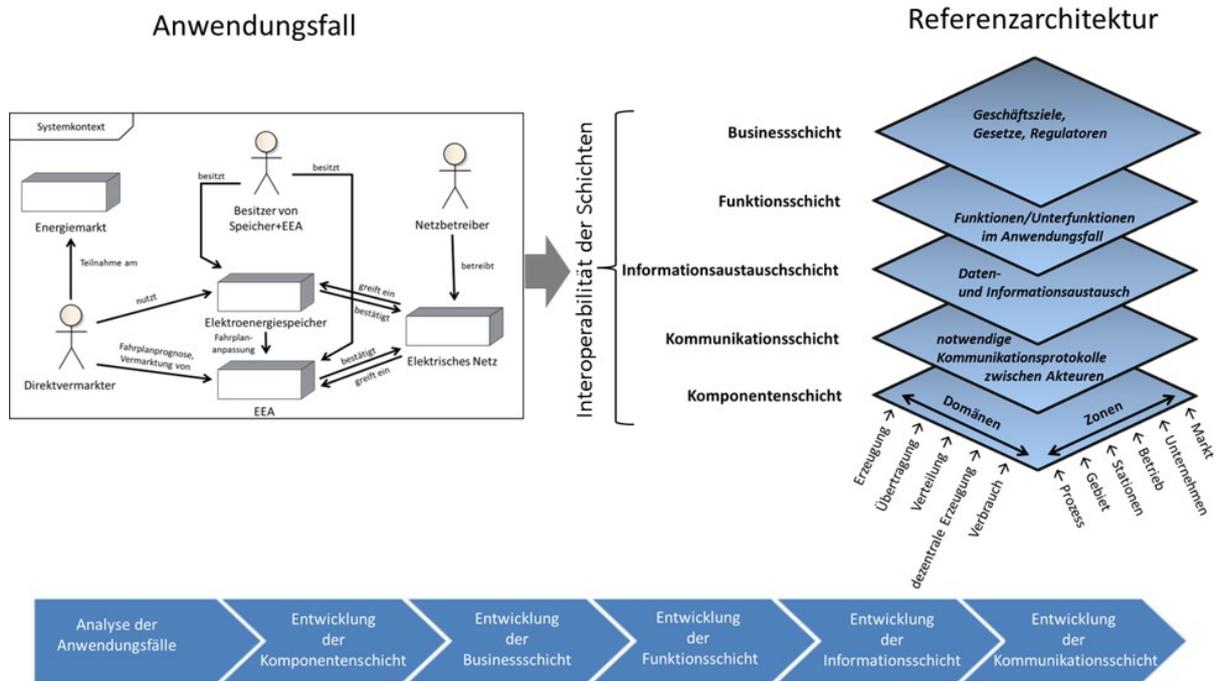


Abbildung 3.15: Systematik zur Erstellung der Referenzarchitekturen aus den definierten Anwendungsfällen

Um eine wirtschaftliche und effiziente Integration von elektrochemischen Energiespeichern in das elektrische Netz zu ermöglichen, wurden die bereits existierenden technischen, politischen und regulatorischen Rahmenbedingungen analysiert sowie Vorschläge zur Adaption dieser Rahmenbedingungen gegeben.

### REStabil – Sachsen-Anhalt: Sicherheit und Stabilität des Betriebes von Energieverteilungsnetzen durch den Einsatz aggregierter dezentraler Netzkomponenten<sup>7</sup>

Mit einer Laufzeit vom 26.03.2014 bis 31.12.2014 ist REStabil ein Verbundprojekt unter Koordination des Fraunhofer IFF Magdeburg mit den Verbundpartnern ABO Wind AG, dem Fraunhofer IFF, der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg und dem Zentrum für Regenerative Energien Sachsen-Anhalt e.V. (ZERE). Als assoziierte Partner sind die Mitteldeutsche Netzgesellschaft Strom mbH und die GETEC AG zu nennen.

Das Projekt REStabil setzte sich zunächst mit der Identifikation der Steuerbarkeit von Anlagen im Gebiet Sachsen-Anhalts auseinander. In diesem Zusammenhang erfolgte eine Bestandsaufnahme, in der nach Anlagentyp und -größe sowie nach Spannungsebene unterteilt die Steuerpotentiale dezentraler EE-Anlagen ermittelt und ausgewertet wurden. Geltende rechtliche und regulatorische Rahmenbedingungen wurden zur Klassifizierung des Steuerungspotentials hinzugezogen und dienten als Basis für die Einordnung.

Ein zweiter Schwerpunkt war die Entwicklung eines geeigneten Steuerungsalgorithmus mit dem Ziel der Spannungsstützung im elektrischen Mittelspannungsnetz. Dies wird mit Hilfe der

<sup>7</sup> von Dipl.-Ing. Michael Wenske

Steuerung von dezentralen Anlagen (z. B. Biogaskraftwerken) erreicht. Der Algorithmus reagiert auf kritische Netzsituationen und berechnet anschließend die notwendigen Maßnahmen bezüglich Anlagensteuerung, um einen stabilen Netzbetrieb wiederherzustellen. Die Funktionsweise der hinterlegten Methodik ist simulativ bestätigt worden.

In einem weiteren Schritt wurden die theoretisch erarbeiteten Algorithmen praktisch erprobt. Dazu wurde zunächst eine geeignete Feldtestumgebung ausgewählt, die es ermöglichte, mittels vorhandener dezentraler Anlagen und entsprechenden Steuerungsmöglichkeiten einen Einfluss auf das 20 kV-Mittelspannungsnetz zu nehmen. In den ausgewählten Anlagen, darunter das Biogaskraftwerk Kemberg, sind zu diesem Zweck Steuerungsmodulare sowie geeignete Kommunikationseinrichtungen installiert worden. Sie dienen der Erfassung von Messwerten und der Umsetzung von Steuerungsbefehlen. Ein zentrales Rechnersystem (REStabil-Leitwarte) dient dabei als Steuerungszentrale. Darin laufen die ankommenden Messdaten (u. a. aus dem Umspannwerk in Radis) zusammen und werden über den Algorithmus ausgewertet. Im Falle einer notwendigen Einspeiseänderung wird das Steuersignal automatisch an die entsprechende/n Anlage/n gesendet und das Spannungsstabilitätsproblem behoben. Abbildung 3.16 zeigt anschaulich die Funktionsweise des REStabil-Steuerungsprinzips.

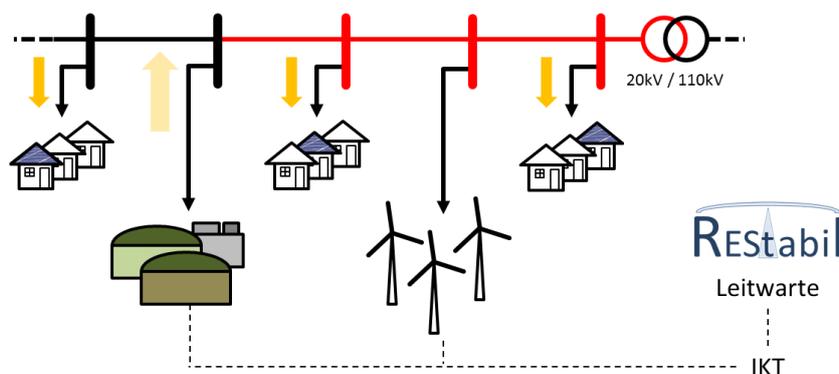


Abbildung 3.16: REStabil-Steuerungsprinzip

Der Einsatz im Feldtestgebiet galt dann der Validierung, sowohl der hinterlegten Algorithmen als auch der installierten Steuerungs- und Kommunikationstechnik. Es konnte nachgewiesen werden, dass die entwickelten Systeme funktionieren und den Netzbetrieb dadurch stabilisieren. Zum Abschluss wurden die Ergebnisse unter verschiedenen Aspekten bewertet.

Die theoretischen und praktischen Ergebnisse des Projektes sind für Netz- und Anlagenbetreiber insbesondere im Mittelspannungsbereich von innovativem Nutzen, da unter der Voraussetzung eines geeigneten und zu entwickelnden Marktmodells, durch die Bereitstellung von Kraftwerkskapazitäten dezentraler Anlagen eine Netzstützung erreicht und damit ein eventuell erforderlicher Netzausbau verhindert werden kann. Die notwendigen Regularien gilt es zukünftig zu definieren.

### Weiterführende Untersuchungen zum automatischen Lastabwurf in der Regelzone 50Hertz Transmission<sup>8</sup>

Im Rahmen des Drittmittelprojekts wurden Systemsicherheitsuntersuchungen im Zeitraum vom 01.04.2015 bis zum 31.03.2015 für die 50Hertz Transmission GmbH durchgeführt. Kernbestandteil der Untersuchung war der sogenannte automatische Lastabwurf für den Fall der kritischen Unterfrequenz als Folge einer Störung im System. Der automatische Lastabwurf ist eine Ultima-Ratio-

<sup>8</sup> von M. Sc. André Richter

Maßnahme zur Eindämmung von Systembilanzstörungen in elektrischen Netzen. Zur Berücksichtigung des hohen Anteils volatiler Erzeuger sind Anpassungen der Frequenzrelaisparameter und derer Installationsorte notwendig, um einen Lastabwurf in der benötigten Größenordnung sicher zu stellen. Daher soll die klassische Methode, bei der die Parametrierung der Relais und die Umsetzung des 5-Stufenplans auf Grundlage der Jahreshöchstlast erfolgt, zukünftig von dem Lastmittelwertansatz abgelöst werden (siehe Abbildung 3.17). In einer durch 50Hertz Transmission in Auftrag gegebenen Studie wurde untersucht, in wie weit die in den bisherigen Stufen abgeschaltete Last, deren Festlegung abhängig von der Methode unterschiedlich berechnet wird, die Netzfrequenz normgerecht stabilisiert.

Darauf aufbauend wurde im Anschlussprojekt „Weiterführende Untersuchungen zum automatischen Lastabwurf in der Regelzone 50Hertz Transmission“ unter Verwendung statischer und dynamischer Berechnungsmethoden untersucht, welcher Referenzwert und welche Abschaltstufe für einen beliebigen Transformator geeignet sind, um eine Rückführung der Systemfrequenz mit möglichst hoher Erfolgswahrscheinlichkeit zu gewährleisten. Mit Hilfe eines Simulink-Modells konnten dabei dynamische Untersuchungen für die Evaluierung der einzelnen Transformatoren durchgeführt sowie entsprechende Handlungsempfehlungen auf Basis der Gesamtergebnisse abgeleitet werden.

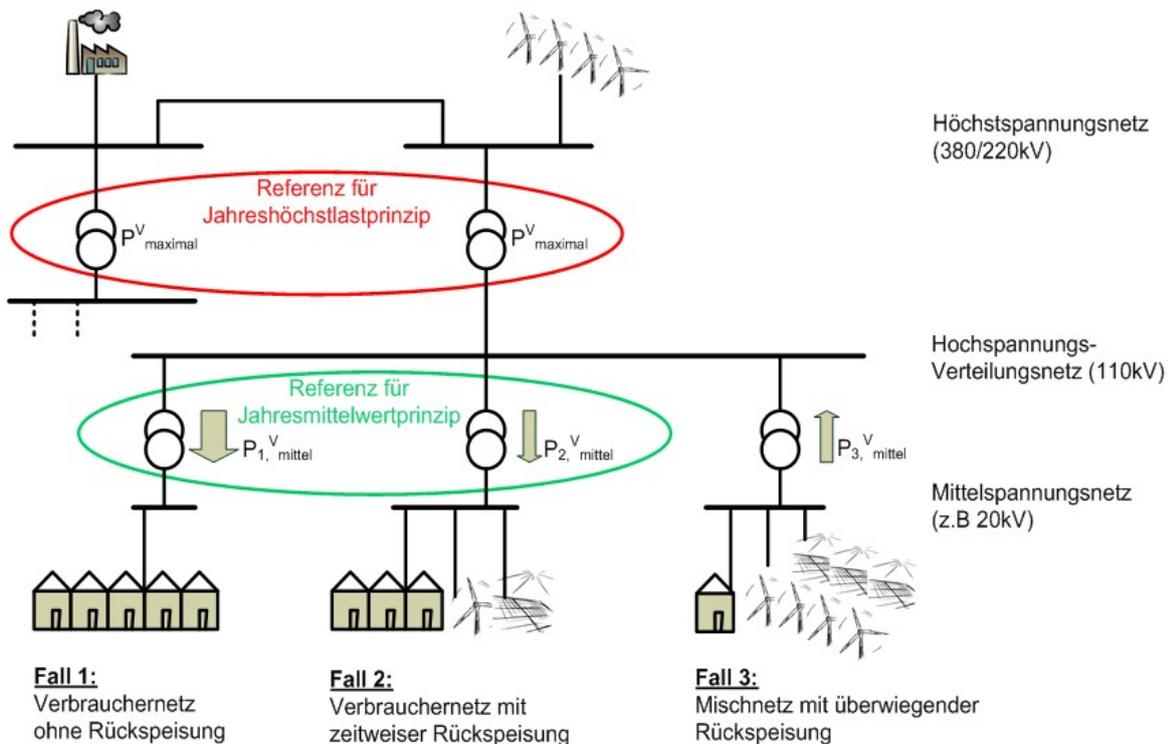


Abbildung 3.17: Bestimmung der Referenznetzlast aus den Jahresmittelwerten entsprechend technischem Hinweis des FNN

### Ausbau herkömmlicher Übertragungsnetzleitwarten zu zukunftssicheren, dynamischen Leitwarten (DynaGridCenter)<sup>9</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,

<sup>9</sup> von M. Sc. Iryna Chychykina

sehr schnell agierenden Netzkomponenten wie HGÜ-Übertragungstrecken (Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung, bzw. HVDC), FACTS (Flexible AC Transmission Systems) 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 hat sich daher als Ziel gesetzt, einen neuartigen dynamischen Netzleitsystemdemonstrator für den zuverlässigen Betrieb von AC-, DC- (z. B. Ultrahochspannung) Transportnetzen zu entwickeln der folgende erweiterte Funktionen beinhalten wird:

- Dynamische Systembeobachtbarkeit inkl. Identifikation und präzise Auswertung der dynamischen Reserven im Netz, AC/DC und Ultrahochspannung
- Prozessgerechte und kontinuierliche Errechnung sowie Durchführung von präventiven und korrektiven Steuerungsmaßnahmen zur Systemstabilisierung unter Einsatz hochpräziser synchroner Messgeräte wie z. B. PMU, RTU sowie unter Berücksichtigung moderner Kommunikationsschnittstellen wie IEC61850 zur Sicherstellung der Prozessabläufe.
- Intelligente Messdatenauswertung / Priorisierung bereits auf Stationslevel unter Einhaltung von Performance und unter Beachtung von Herausforderungen zum Thema IT-Sicherheit (Cybersecurity)
- Vorhersage des dynamischen Netzverhaltens im Havarie- / Fehlerfall (modell- und messdatenbasiert)
- Kontinuierliche, hierarchische Validierung der aktuellen oder zu ändernden Schutz- und Reglereinstellungen in Bezug auf den aktuellen Netzzustand

Eine neue, entsprechend definierte dynamische Netzleitwarte kann sämtliche Vorteile der neuen Netzkomponenten effektiv und optimal im Sinne der Netzstabilität nutzen. Gleichzeitig kann sie die kleiner werdenden Zeitkonstanten durch eine Kombination aus schnellerer zentraler Koordination und Verteilung von bestimmten Aufgaben an die dezentrale Stationsintelligenz kompensieren. Die bekannten Probleme wie fehlende Schwungmasse, höhere Volatilität und auch die Tendenz, dass sich Leistungspendelungen in bestimmten Situationen verstärken, können somit durch gezielte zentralisierte bzw. hierarchisch-priorisierte Maßnahmen minimiert werden.

Projektpartner:

- Siemens AG (SAG)
- Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
- Technische Universität Ilmenau (TUIL)
- Ruhr Universität Bochum (RUB)
- Fraunhofer IFF (IFF)
- Fraunhofer IOSB-AST (AST)

Projektzeitraum: 01.09.2015–01.09.2018

### **REGEEES: Regeneratives Elektrisches Energiesystem – Reg-EE-System – 100 %-Integration erneuerbare Energien in 2030<sup>10</sup>**

Das Projekt „REGEEES“ ist eine durch das BMWi, BMU und BMBF geförderte Initiative mit dem Ziel der Entwicklung optimaler Betriebsführungs- und Regelungsstrategien für eine zuverlässige 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 „REGEEES“ 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“. Hier erfolgt eine Verknüpfung von Aspekten des Energiemarktes mit denen des Übertragungs- und Verteilernetzes, wobei die Netze nur abstrahiert in Form von Ersatzkuppelkapazitäten modelliert werden. Ziel dieses Ansatzes ist die optimale Vermarktung der erneuerbaren Energien im Energiemarkt unter Beachtung der einzuhaltenden Netzrestriktionen. 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 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 werden. In den weiteren Untersuchungen erfolgt eine Analyse und Bewertung der Zuverlässigkeit im Virtuellen Kraftwerk mit Hilfe geeigneter Methoden.

---

<sup>10</sup> von M. Sc. André Richter

### EXIST Gründerstipendium<sup>11</sup>

Ein Team aus der Brennstoffzellengruppe des Lehrstuhls für Elektrische Netze und Erneuerbare Energie hat sich im letzten Jahr mit einer Produktidee für das EXIST-Gründerstipendium erfolgreich beworben. Das Vorhaben wird unter dem Kürzel EZM-Intelligence seit Januar 2015 durchgeführt. Ziel ist die Umsetzung eines Prototyps zur messtechnischen Diagnose und Auswertungen von Brennstoffzellen, Batterien und Elektrolyseuren. EZM-Intelligence soll die Einführung von innovativen Energiesystemen im heutigen Markt unterstützen. Dabei werden vor allem die langjährigen Erfahrungen des Gründerteams im Forschungsbereich der Brennstoffzellentechnik genutzt. Das Tool soll anhand von messtechnischen Untersuchungen Aussagen zur Lebensdauer, Fehlerauswertung und Effizienzanalyse treffen und damit eine optimierte Betriebsführung garantieren.

Das EXIST-Gründerstipendium unterstützt Studierende, Absolventinnen und Absolventen sowie Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus Hochschulen und außeruniversitären Forschungseinrichtungen, die ihre Gründungsidee realisieren und in einen Businessplan umsetzen möchten. Bei den Gründungsvorhaben sollte es sich um innovative technologieorientierte oder wissensbasierte Projekte mit signifikanten Alleinstellungsmerkmalen und guten wirtschaftlichen Erfolgsaussichten handeln. Die Förderung durch das EXIST-Gründerstipendium beinhaltet eine Grundversorgung für bis zu drei Teilnehmer und eine Sachkostenpauschale zur Umsetzungen der Produktidee. Das übergeordnete Ziel soll die wirtschaftliche Verwertung des Diagnosetools EZM-Intelligence in Verbindung mit einer Ausgründung eines Spin-Off-Unternehmens von der Universität sein. Dazu werden zudem gründungsbezogene Coachingmittel bereitgestellt, welche den Jungunternehmern den Einstieg in die Selbstständigkeit erleichtern sollen.

Das EXIST-Gründerstipendium ist ein Förderprogramm des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie und wird durch den Europäischen Sozialfonds kofinanziert.



### Brennstoffzellen-USV: Zuverlässige und effiziente Stromversorgung für Kommunikations- und Mobilitätssysteme<sup>12</sup>

Das Verbundprojekt befasste sich zusammen mit dem Industriepartner, der Elektromotoren und Gerätebau Barleben (EMB) mit der Entwicklung und Analyse einer Unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV) auf Basis einer PEM-Brennstoffzelle. Das Projektziel ist die Analyse der einzelnen Systembestandteile bestehend aus Verfahrenstechnik, Brennstoffzelle, Leistungselektronik, Steuerung und Gehäuse für den Einsatz als USV und die Implementierung sowie Erprobung von anwendungsabhängigen Betriebsstrategien. Die Funktionalität der USV für den Outdoor-Betrieb wurde an einem aufgebauten Funktionsmuster getestet.

Nach der Fertigstellung und Testphase von zwei BZ-USV-Systemen werden aktuell die Systemoptimierung und das Verhalten der Anlage im Außeneinsatz untersucht. Im vierten Quartal wird das System im Außengelände der OvGU aufgestellt und der Betrieb aus Anwendersicht getestet.

---

<sup>11</sup> von M. Sc. Philipp Kühne

<sup>12</sup> von Dr.-Ing. Maik Heuer

Insbesondere interessieren das Betriebsverhalten (Start der Anlage) der Brennstoffzelle und der Batterie bei tiefen Außentemperaturen, das Alterungsverhalten, die Wärmeauskopplung und das Systemverhalten bei großen Temperaturgradienten.



Abbildung 3.18: BZ-USV im LENA Labor. Auf der Anlage steht die Last (Leistung der Strahler 950 W).

Tabelle 3.1: Kenndaten des Brennstoffzellen-USV-Systems

<i>Parameter</i>	<i>Größe</i>
Leistung	1 kV A @ $U_{AC} = 230\text{ V}$ oder 1,3 kW @ $U_{DC} = 48\text{ V}$
Überbrückungsdauer bei Vollast	16 h bei sechs 10-Liter-Flaschen mit 300 bar (53 h bei sechs 50-Liter-Flaschen mit 300 bar)
Brennstoff	Wasserstoff
Umschaltzeit (Netz- auf USV-Betrieb)	<10 m s
Stellfläche/Volumen	0,78 m <sup>2</sup> / 1,12 m <sup>3</sup>
Temperaturbereich	-25 °C bis 40 °C

### Modellprojekt: Magdeburg energieeffiziente Stadt – MD-E4 Maßnahme B2 (Lastmanagement)<sup>13</sup>

Das vom BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) geförderte Projekt hat zu Ziel die Energie effektiver zu nutzen und damit die CO<sub>2</sub>- Emission in den Städten zu senken. Die Stadt Magdeburg hat damals mit anderen Städten den Wettbewerb gewonnen. Das Ministerium will damit einen Beitrag zur zukünftigen Gestaltung der Städte leisten. In der Ausschreibung steht geschrieben: „Mit dem Wettbewerb will das BMBF systemorientierte Aspekte aufgreifen. Es geht um die Erforschung ganzer Energie- bzw. Versorgungssysteme. Es sollen neuartige Konzepte

<sup>13</sup> von Dr.-Ing. Günter Heideck

für eine effizientere Energienutzung in Städten entwickelt, modellhaft umgesetzt und verbreitet werden.“

Das Teilprojekt „Verteilnetzautomatisierung und Lastmanagement“ widmet sich der dezentralen Automatisierung der Niederspannungsverteilnetze zur Unterstützung der Qualität und Effizienz der elektrischen Energieversorgung bei steigendem Anteil an erneuerbaren Energien. Der Lehrstuhl ist an der Maßnahme (B2) mit anderen Partnern beteiligt.

Die Partner sind das Institut für Automation und Kommunikation e.V. (ifak), ein An Institut der Universität, und die städtischen Werke Magdeburg (SWM). Durch die zunehmende Zahl der dezentralen Erzeuger im Netz wird die Einhaltung relevanter Parameter im örtlichen Netz schwieriger. Die Maßnahme B2 beinhaltet nicht nur die konzeptionelle Erarbeitung von Lösungen. Es werden auch zwei Beispiele realisiert. Dabei ist die gewohnte Qualität und Stabilität der elektrischen Netze der Stadt gesichert.

Im Rahmen des Teilprojektes wurden Netzüberwachungsfunktionen in IEC 61131-3 entwickelt, um Lastflussberechnungen, Netzzustandsschätzung (State Estimation) und Schätzung der Momentan-Einspeisung von Photovoltaikanlagen direkt auf der SPS realisieren zu können. Die Maßnahme läuft planmäßig, wobei die ersten Phasen abgeschlossen sind. Die darauf folgenden Phasen sind bereits in Vorbereitung bzw. Bearbeitung. Einige Studenten der Universität konnten für die Unterstützung der Arbeiten gewonnen werden. Ein ehemaliger Student des Lehrstuhls wurde beim Partner angestellt und arbeitet in dem Konsortium mit.

Im Teilprojekt wurde gezeigt und in den Ergebnissen nachgewiesen, dass durch den Einsatz von dezentraler Automatisierungstechnik in den unteren Spannungsebenen des Verteilnetzes eine verbesserte Integration von erneuerbaren Energien erreicht werden kann und somit die Stabilität und Qualität der elektrischen Energieversorgung unterstützt wird. Es soll aber auch nicht verschwiegen werden, dass es einige Schwierigkeiten besonders in der Realisierungsphase gab. Eigentumsverhältnisse und eine fehlende Normung erschwerten die Arbeiten.

Besonders die ETG Task Force „Schutz- und Automatisierungstechnik in aktiven Energie-Verteilungsnetzen“ des VDE bemühte sich die Probleme zu entschärfen.

#### **IRSES-ELECON: Internationale Vernetzung unterstützt die Smart Grid Entwicklung<sup>14</sup>**

Eine zeitnahe und erfolgreiche Konzeptionierung und Umsetzung eines Smart Grids, das eine intelligente Vernetzung aller Akteure im elektrischen Versorgungsnetz durch innovative Kommunikationstechnologien bedeutet, erfordert eine starke Zusammenarbeit der weltweiten Kompetenzen und die Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses. Innerhalb des EU-Projektes IRSES-ELECON wird speziell die Zusammenarbeit junger, europäischer und brasilianischer Wissenschaftlicher gefördert.

Im Vordergrund der Untersuchungen stehen eine Potentialanalyse und Umsetzungskriterien für ein aktives Lastmanagement und die Identifikation der nichttechnischen Verluste. Weiterhin wird eine innovative Kommunikationsinfrastruktur mit angepassten dezentralen Modellen thematisiert, da sie eine wichtige Voraussetzung für die technische Realisierung des Smart Grids darstellen. Das ELECON-Projekt hat im Einzelnen folgende Ziele:

- Konsolidierung eines internationalen Netzwerks von wissenschaftlichen Einrichtungen zwischen der EU und Brasilien,
- Nutzung von modernen Methoden und innovative Techniken zur Analyse des Stromverbrauchs und die Förderung der Energieeffizienz,

---

<sup>14</sup>von Dr.-Ing. Ines Hauer

- Erwerb und Austausch von wissenschaftlichem Know-how zwischen der EU und Brasilien,
- Durchführung von Benchmark-Studien mit realen Daten,
- Etablierung einer starken Basis für zukünftige, langfristige Kooperationen.

Auch im dritten Projektjahr haben wieder zahlreiche Austausche zwischen den sieben Partneruniversitäten stattgefunden. Von Seiten der OvGU sind Frau Iryna Chychykina 6 Wochen und Herr Tankred Roth 12 Wochen an die UFSC (Universidade Federal de Santa Catarina) in Florianopolis gereist. Tobias Wintsche und Frau Dr. Natalia Moskalenko haben die UNSEP (Universidade Estadual Paulista) in Guaratingueta besucht.

Des Weiteren konnten an der OvGU Gäste aus allen vier brasilianischen Partneruniversitäten begrüßt werden, darunter drei Professoren und sechs Doktoranden.

Für den diesjährigen Projektworkshop sind die Kollegen und Gäste zusammen nach Grenoble in Frankreich gereist, um sich über den aktuellen inhaltlichen Stand und Fortschritt des Projekt auszutauschen.

### 3.2.3 Promotionen

#### **Dr.-Ing. Paul A. Bernstein: Modellgestützte optimale Betriebsführung von PEM-Brennstoffzellen für autonome Anlagen**

Gutachter:

- Prof. Zbigniew Styczynski, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
- Prof. Dirk Uwe Sauer, RWTH Aachen

verteidigt am 08.01.2015 an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Die Betriebsführung von PEM-Brennstoffzellen hat neben den konstruktiven Faktoren einen starken Einfluss auf die Alterungsmechanismen. Die Arbeit legt dar, weshalb gerade der Wasserhaushalt bei vier von sechs Komponenten eine zentrale Rolle bei der Lebensdauer einnimmt. In dieser Arbeit wurden daher zwei Modelle entwickelt, welche die Überwachung des Wasserhaushalts ohne unzuverlässige Hochfeuchtemessung in der Brennstoffzelle ermöglichen. Beide Modelle basieren auf der Methodik der unscharfen Mengen.

Unter anderem wurden Messungen der Stromdichteverteilung über der Brennstoffzellenfläche unter Variation ausgewählter Parameter auf ein gemeinsames charakteristisches Verhalten hin untersucht. Ein solches Verhalten bei unausgeglichenem Wasserhaushalt konnte nachgewiesen werden. Die gefundene Charakteristik wurde in ein Modell umgesetzt, welches die Stromdichtemesswerte an fünf definierten Punkten auswertet und damit den inneren Zustand des Wasserhaushalts schätzt. Dies liefert eine wichtige Größe, die für eine Regelung des Wasserhaushalts notwendig ist.

Die vorgestellten Methoden leisten somit einen wissenschaftlichen Beitrag zur Betriebsführung von PEM-Brennstoffzellen. Durch die damit, während des Betriebs mögliche Optimierung des Wasserhaushalts kann die Leistungsfähigkeit und Lebensdauer von Brennstoffzellen verbessert werden. Durch zusätzliche Experimente in Klimaschränken mit einer größeren Anzahl an Messsystemen unterschiedlicher Leistungsklassen könnten die Fuzzy-Modelle weiter verbessert werden und zur Entwicklung einer vollautomatischen Regelung des Wasserhaushalts von PEM-Brennstoffzellen herangezogen werden.

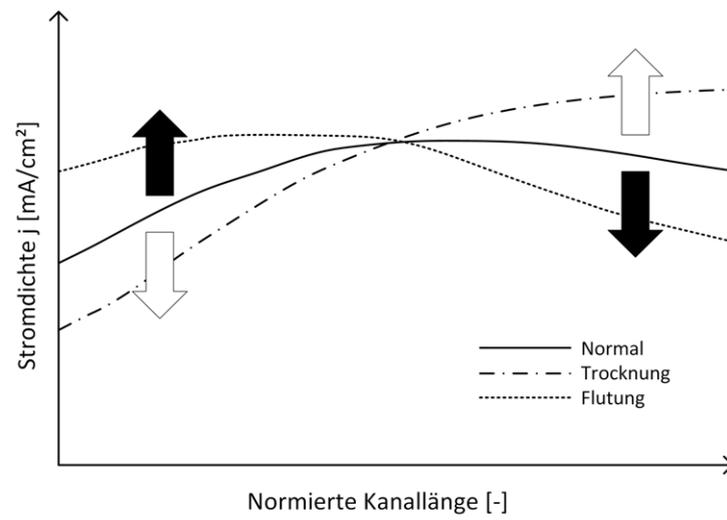


Abbildung 3.19: Einfluss des Feuchtehaushalts auf die lokale Stromdichte entlang der Gaskanäle einer PEM-Brennstoffzelle



Abbildung 3.20: Gratulation an Paul A. Bernstein am Otto-von-Guericke-Denkmal

**Dr.-Ing. Steffen Rabe: Betrieb einer Zweipunkt-Offshore-HGÜ-Verbindung -  
Modelluntersuchungen -**

Gutachter:

- Prof. Zbigniew Styczynski, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
- Prof. Krzysztof Rudion, Universität Stuttgart
- Prof. Jutta Hanson, Technische Universität Darmstadt

verteidigt am 27. März 2015 an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (siehe Abbildung 3.21)



Abbildung 3.21: Gratulation an Herrn Dr. Rabe am Otto-von-Guericke-Denkmal in Magdeburg

Ausgehend vom aktuellen Ausbaustand der Offshore-Energiesysteme und der hierbei zum Einsatz kommenden Anschluss- und Übertragungstechnologien ist in der Dissertation mit dem Titel „Betrieb einer Zweipunkt-Offshore-HGÜ-Verbindung. – Modelluntersuchungen –“ ein ganzheitlicher Ansatz vorgestellt, eine Zweipunkt-Offshore-Anbindung – auf Basis der Technologie der spannungszwischenkreisbasierten Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (VSC-HGÜ) – auf der Modellebene abzubilden. Im Vordergrund steht die Nachbildung der genannten Übertragungsanordnung als hardwaretechnischer Labormodellaufbau, der durch eine identisch konfigurierte Softwaresimulation zur Validierung von Messergebnissen begleitet wird. Motivation ist der realitätsnahe Test von HGÜ-Betriebsstrategien und die Schaffung eines Technologieträgers u. a. zum Test neuartiger Messkonzepte.

Dazu werden im ersten Teil der Arbeit zunächst notwendige Grundlagen zu Anforderungen an den Systembetrieb von HGÜ-Anlagen, zum Thema Netzstabilität und zu Modellierungsmethoden bereitgestellt. Der Schwerpunkt der Arbeit liegt im zweiten und dritten Teil in der dort vorgestellten Untersuchung des HGÜ-Labormodellaufbaus. Die hierfür entwickelte Methodik (vgl. Abbildung 3.22) sieht vor, reale Betriebseigenschaften von Hauptkomponenten einer Zweipunkt-VSC-HGÜ-Strecke nach einer Systemreduzierung und -skalierung separat auf der Modellebene abzubilden und dies im Einklang mit labormodellspezifischen Anforderungen und damit verbundenen Modellierungsgrenzen auszuführen.

Anschließend erfolgt eine Zusammenfügung zu einem HGÜ-Gesamtmodellsystem, welches im Sinne von allgemein gültigen und übertragbaren Ergebnisaussagen, später auch auf kontinentale HGÜ-Strecken, bewusst keine unmittelbare reale Referenzanlage besitzt. Die Einzelbetriebsmittel

werden im Rahmen des Modellierungsprozesses als Hauptfunktionsblöcke zusammengefasst und untergliedern sich u. a. in die Komponenten AC-Netznachbildung, VSC-Stromrichter und DC-Kabelstrecke. Innerhalb der Entwicklung der zuvor benannten Hauptkomponenten steht die, ausschließlich aus konstruktiven Detailinformationen realisierte Modellnachbildung eines HGÜ-Kabels im Fokus.

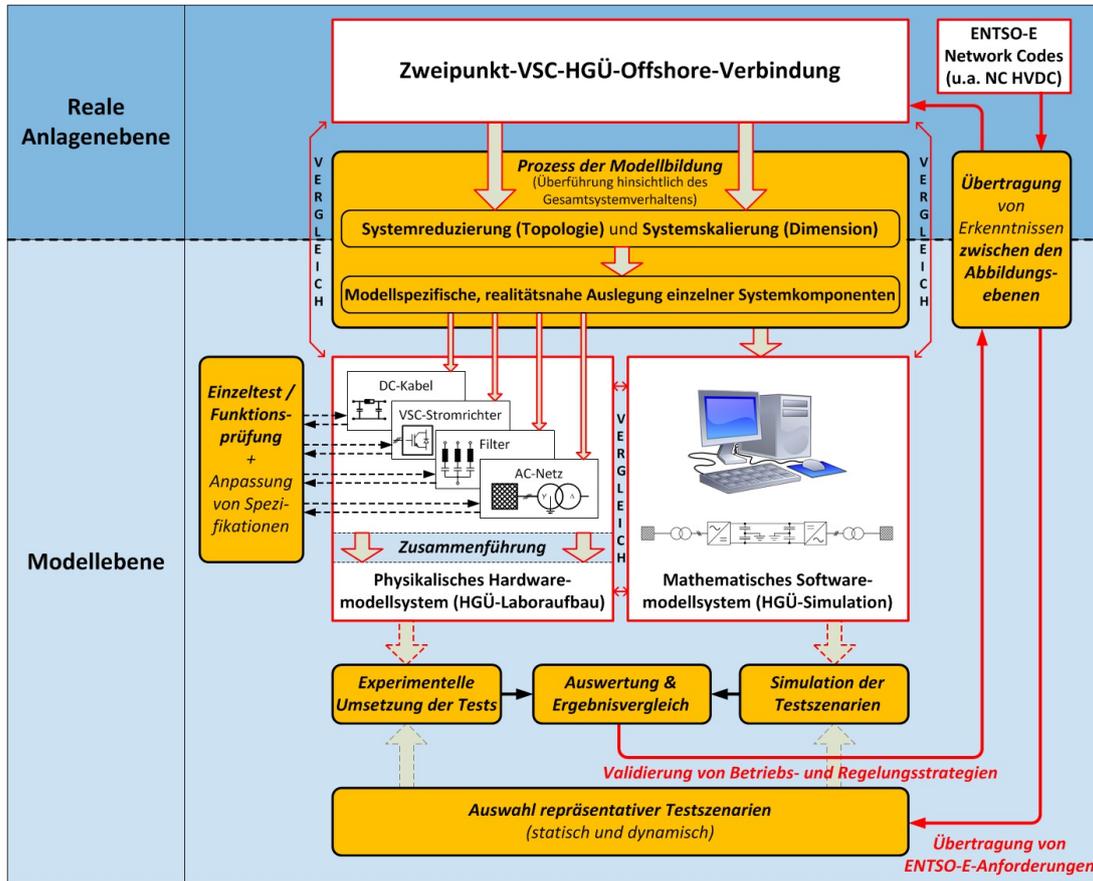


Abbildung 3.22: Gesamtmodellierungsmethodik und Algorithmus der Untersuchungen

Die Funktionsfähigkeit der angewandten Modellierungsmethodik wird nachgewiesen, indem die im dritten Teil der Arbeit beschriebenen repräsentativen Testszenarien, welche betriebliche Grenzsituationen darstellen, durchgeführt und dabei vorgegebene Betriebsanforderungen an reale HGÜ-Anlagen zugrunde gelegt werden. Die relevanten regulatorischen Rahmenbedingungen werden hierfür aus vorhandenen bzw. in der finalen Entwurfsphase befindlichen Network Codes der ENTSO-E bezogen. Insgesamt werden Testszenarien zur Wirkleistungs-Frequenz- ( $P(f)$ -), Blindleistungs-Spannungs- ( $Q(U)$ -) sowie Fault Ride Through- (FRT-) Charakteristik zur Untersuchung herangezogen, wobei der erstgenannte Test als ausführlich behandelte Fallstudie zur Vorstellung der wissenschaftlichen Gesamtvorgehensweise hervorgehoben wird. Intention aller durchgeführten Tests ist der Nachweis der besonderen Eignung der VSC-HGÜ zur AC-Netzstützung um damit – mit der weiteren Zunahme derartiger Anlagen zur Integration von Offshore-Windenergie – einen elementaren Beitrag zur zukünftigen Netzstabilität eines Gesamtsystemverbunds zu leisten.

Die Gesamtergebnisse und deren Bewertung zeigen letztendlich eine Eignung der entwickelten Modellierungsmethode und des gewählten Skalierungsfaktors, da mittels der reduzierten HGÜ-Systemabbildung einer Zweipunkt-Verbindung – unter weitgehender Beibehaltung individueller Charakteristiken der Einzelbetriebsmittel – die an reale Anlagen gestellten betrieblichen Anforderungen eingehalten werden können. Somit sind eine Validierung und Optimierung von

Betriebsstrategien auf der Modellebene sowie eine anschließende Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die reale Systemebene grundsätzlich möglich.

### **Dr.-Ing. Bartłomiej Arendarski: Reliability Assessment of Smart Grids**

Gutachter:

- Prof. Zbigniew Styczynski, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
- Prof. Dirk Westermann, Technische Universität Ilmenau
- Dr. Przemyslaw Komarnicki, Fraunhofer-IFF Magdeburg

verteidigt am 16. Juni 2015 an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (siehe Abbildung 3.23)



Abbildung 3.23: Gratulation an Herrn Dr. Arendarski am Otto-von-Guericke-Denkmal

Der Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) für die Energiesystemüberwachung, -steuerung und -schutz wird signifikant in Netzen mit hohem Anteil an regenerativer Erzeugung sein und damit den Weg vom konventionellen Netz hin zum Smart Grid ermöglichen. Allerdings erhöht diese zusätzliche IKT die Komplexität eines solchen integrierten Systems und erfordert dadurch neue Methoden für die Planung und die optimale Integration moderner Kommunikationssysteme für den Einsatz in Stromnetzen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Bewertungsansatz für die Zuverlässigkeit des Smart Grid unter der Annahme (Thesis) untersucht, dass die Zuverlässigkeit des Smart Grid im Vergleich zu konventionellen Lösungen beibehalten werden kann. In der Arbeit sind zunächst die Grundlagen des Zuverlässigkeitsproblems mit den wichtigsten Parametern, Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktionen, Berechnungs- und Bewertungsmethoden sowie die Zuverlässigkeitsindizes beschrieben. Ergebnisse von umfangreichen Studien von Kommunikationsanforderungen, Funktionen und Anwendungen in modernen Stromnetzen sind zusammenfassend dargestellt. Weiterhin ist ein Überblick über die Kommunikationsstandards und -protokolle, verfügbaren Technologien und Datenübertragungsverfahren sowie zukünftige Trends in der Entwicklung gegeben.

Kern der Arbeit bilden die zwei in der Dissertation präsentierten Methodiken zur Zuverlässigkeitsbewertung. Die erste basiert auf der Modellierung von Abhängigkeiten gekoppelter Infrastrukturen

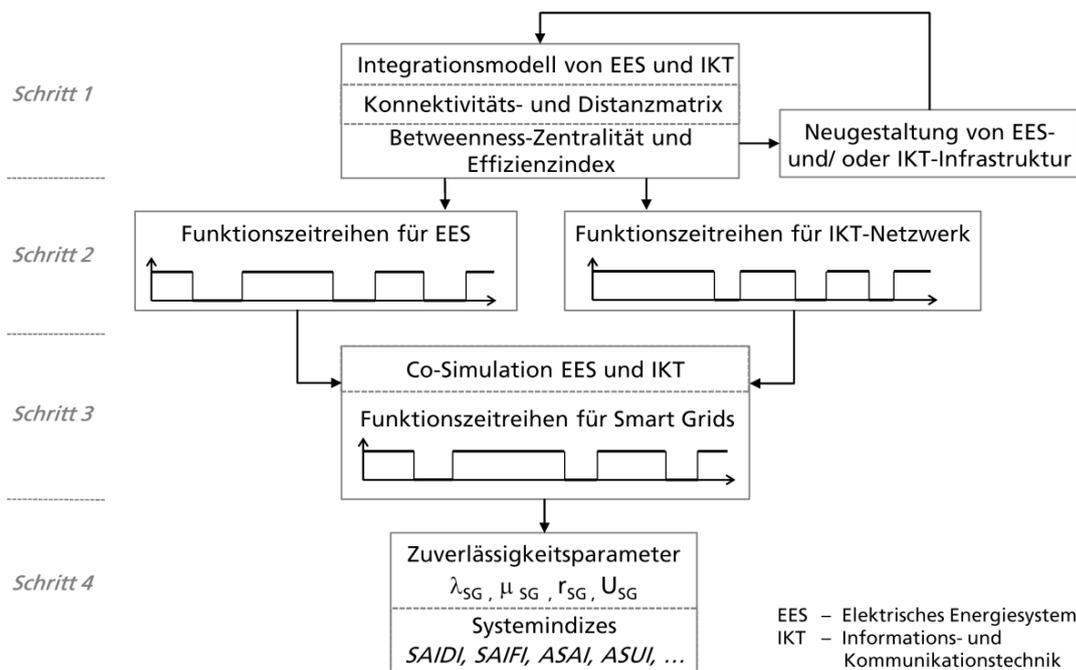


Abbildung 3.24: Vier-Schritt-Algorithmus für die Smart-Grid-Zuverlässigkeitsberechnung

und die zweite auf der Monte-Carlo-Simulationstechnik. Zusammen bilden diese einen Vier-Schritt-Algorithmus (siehe Abbildung 3.24). Zum Einem (Schritt 1) werden die topologischen Beziehungen der kombinierten (gekoppelten) Systeme mit Verbindungsmatrizen modelliert. Mit dem Einsatz der Effizienzanalyse werden die kritischsten Knoten identifiziert, die für eine optimale Gestaltung des Kommunikationsnetzwerkes für die Stromsystemanwendungen verwendet werden können. Zum anderem (Schritte zwei bis vier) liefert ein Simulationsalgorithmus die Verteilungen und Durchschnittswerte der Zuverlässigkeitskenngrößen für das Smart Grid.

Dies ermöglicht die Untersuchung des Einflusses koexistierender IKT-Infrastrukturen auf die Zuverlässigkeit des Stromnetzes und damit insgesamt auf das Smart Grid. Die Effektivität der Algorithmen wurde anhand der Berechnungen für zwei Testsysteme gezeigt. Das 9-Knoten-System dient der Illustrierung der Modellierungsmethodik. Die Analyse eines 110 kV-Verteilsystems der regionalen Verteilnetzbetreiber bietet zahlreiche Ergebnisse, einschließlich relevanter Zuverlässigkeitsindizes und ihrer Verteilungen, die im Einzelfall detailliert diskutiert werden. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass durch eine systematische Planung der IKT und der Netzstrukturen solche Konfigurationen von Smart Grids erlangt werden können, die sich durch eine zu den herkömmlichen Netzen vergleichbare Zuverlässigkeit auszeichnen.

### Dr.-Ing. Rafal Lubiatowski: Leistungsdifferentialschutz für eingeführte Stromrichter

Gutachter:

- Prof. Gerhard Herold, FAU Nürnberg-Erlangen
- Prof. Zbigniew Styczynski, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

verteidigt am 23.07.2015 an der Friedrich-Alexander Universität Nürnberg-Erlangen

**Dr.-Ing. Jörg Dickert: Synthese von Zeitreihen elektrischer Lasten basierend auf technischen und sozialen Kennzahlen: Grundlage für Planung, Betrieb und Simulation von aktiven Verteilungsnetzen**

Gutachter:

- Prof. Peter Schegner, Technische Universität Dresden
- Prof. Zbigniew Styczynski, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

verteidigt am 27.11.2015 an der Technischen Universität Dresden

### 3.2.4 Veröffentlichungen

#### Zeitschriften- und Konferenzbeiträge

- [1] I. Hauer, M. Wolter, M. Stötzer, M. Richter und Z. A. Styczynski, „A probabilistic load shedding concept considering highly volatile local generation“, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Bd. 67, S. 478–487, 2015. DOI: 10.1016/j.ijepes.2014.12.028.
- [2] M. Stötzer, I. Hauer, M. Richter und Z. A. Styczynski, „Potential of demand side integration to maximize use of renewable energy sources in Germany“, *Applied Energy*, Bd. 146, S. 344–352, 2015. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.02.015.
- [3] I. Chychykina, „Automatic integration of a dynamic security assessment system into a power grid“, in *Proc. of Power and Energy Student Summit (PESS)*, Dortmund, Germany, 2015 Jan 13-14, Kap. Chychykina I. DOI: 10.17877/DE290R-7261.
- [4] C. Klabunde, N. Moskalenko und C. Röhrig, „Potentialermittlung von Energiespeichern zur Stützung des elektrischen Verteilnetzbetriebes“, in *Proc. of Power and Energy Student Summit (PESS)*, IEEE, Dortmund, Germany, 2015 Jan 13-14, S. 1–6. DOI: 10.17877/DE290R-7741.
- [5] A. Richter und I. Hauer, „Lastabwurfkonzept auf Basis von Jahresmittelwerten“, in *Proc. of Power and Energy Student Summit (PESS)*, Dortmund, Germany, Jan. 2015 Jan 13-14. DOI: 10.17877/DE290R-7681.
- [6] I. Chychykina, Z. A. Styczynski, C. O. Heyde und R. Krebs, „Vermeidung von Instabilitäten in den Stromnetzen durch Online Dynamic Security Assessment“, in *Proc. of Dresdener Kreis 2015*, Hannover, Germany, 2015 Mar 25-26.
- [7] M. Wenske und P. Kühne, „Entwicklung und Validierung eines Brennstoffzellen USV-Systems“, in *Proc. of Dresdener Kreis 2015*, Hannover, Germany, 2015 Mar 25-26.
- [8] I. Bielchev, M. Richter, M. Banka, P. Trojan, Z. A. Styczynski, A. Naumann und P. Komarnicki, „Dynamic distribution grid management through the coordination of decentralized power units“, in *Proc. of 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, IEEE, Denver, CO, USA, 2015 Jul 26-30. DOI: 10.1109/PESGM.2015.7286124.
- [9] C. Klabunde, N. Moskalenko, P. Lombardi, P. Komarnicki und Z. A. Styczynski, „Optimal onshore wind power integration supported by local energy storages“, in *Proc. of 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, IEEE, Denver, CO, USA, 2015 Jul 26-30. DOI: 10.1109/PESGM.2015.7286082.
- [10] I. Chychykina, M. Wolter, Z. A. Styczynski, C. O. Heyde und R. Krebs, „Online dynamic security assessment system for power system monitoring and control“, in *CRIS, Sankt Petersburg, Russia*, St. Petersburg, Russia, Juni 2015, Kap. L3, S. 7–15, ISBN: 9785939081306.

- [11] A. Richter, I. Hauer, Z. A. Styczynski und M. Wolter, „Investigation of a new average value based load shedding concept to secure critical infrastructures in case of emergency“, in *Proc. of 6th International CRIS Conference*, CRIS, St. Petersburg, Russia, 2015 Jun 25-27, ISBN: 9785939081306.
- [12] T. Sokolnikova, K. Suslov, N. Moskalenko, C. Klabunde und P. Komarnicki, „Modeling and tasks of dispersed energy storage for secure and optimal operation in distribution system“, in *CRIS, Sankt Petersburg, Russia*, St.-Petersburg, Russia, Juni 2015, S. 152–160, ISBN: 9785939081306.
- [13] I. Chychykina, Z. A. Styczynski, C. O. Heyde und R. Krebs, „Power system instability prevention and remedial measures with online dynamic security assessment“, in *Proc. of 2015 IEEE PowerTech*, IEEE, Eindhoven, Netherlands, 2015 Jun 29 - Jul 2. DOI: 10.1109/PTC.2015.7232303.
- [14] C. Klabunde, N. Moskalenko, Z. A. Styczynski, P. Lombardi und P. Komarnicki, „Use of energy storage systems in low voltage networks with high photovoltaic system penetration“, in *Proc. of 2015 IEEE PowerTech*, IEEE, Eindhoven, Netherlands, 2015 Jun 29 - Jul 2. DOI: 10.1109/PTC.2015.7232489.
- [15] I. Chychykina, I. Hauer und J. Rolim, „State of the art of current demand response experiences“, in *Proc. of 3rd ELECON Workshop, Grenoble, France*, Grenoble, France, 2015 Nov 17-18.
- [16] K. Haensch, A. Bartłomiej, A. Naumann, P. Komarnicki, C. Brunner und Z. A. Styczynski, „Impact of large storage system on distribution grid operation“, in *Proc. of XVIII Seminarium Energotestu Automatyka w elektroenergetyce*, Zawiercie, Poland, Zawiercie, Poland, 2015 Apr 22-24.
- [17] K. Halicka, P. Lombardi und Z. A. Styczynski, „Future-oriented analysis of battery technologies“, in *Proc. of IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, IEEE, Seville, Italy, 2015 Mar 17-19, S. 1019–1024. DOI: 10.1109/ICIT.2015.7125231.
- [18] C. Marnay, P. Lombardi, C. Spyros, A. Chad, I. Reza, J. Geza und M. Pierluigi, „Microgrid evolution roadmap engineering, economics, and experience“, in *Proc. of 2015 International Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies (EDST), CIGRE SC C6 Colloquium*, CIGRE, Vienna, Austria, 2015 Sep 8-11.
- [19] N. Moskalenko, E. Köhler, P. Komarnicki und Z. A. Styczynski, „Reliable operation of energy storage units in the power grid – an analysis of existing requirements“, in *Proc. of SmartER Europe Conference*, IEEE, Essen, Germany, 2015 Feb 15.
- [20] A. Richter, I. Hauer, Z. A. Styczynski und M. Wolter, „Transformer suitability for a successful load shedding in the TSO control area“, in *Proc. of ETG-Congress 2015*, ETG, Bonn, Germany, 2015 Nov 17-18.

#### Dissertationen und Bücher

- [1] B. Arendarski, „Reliability assessment of smart grids“, Diss., Otto-von-Guericke-University, Faculty of Electrical Engineering and Information Technology, Magdeburg, Germany, 2015.
- [2] P. A. Bernstein, „Modellgestützte optimale Betriebsführung von PEM-Brennstoffzellen für autonome Anlagen“, Diss., Otto-von-Guericke-University, Faculty of Electrical Engineering and Information Technology, Magdeburg, Germany, 2015.
- [3] S. Rabe, „Betrieb einer Zweipunkt-Offshore-HGÜ-Verbindung. -Modelluntersuchungen-“, Diss., Otto-von-Guericke-University, Faculty of Electrical Engineering and Information Technology, Magdeburg, Germany, 2015.

### 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 Netzqualität und Power Quality leitet sich aus dem verstärkten Einsatz von leistungselektronischen Betriebsmitteln in elektrischen Versorgungsnetzen ab, da diese Rückwirkungen im elektrischen Energieversorgungsnetz bedingen. Diese Entwicklung erfordert gesteigerte Beachtung der Spannungsqualität im Netz. Im Rahmen des Forschungsschwerpunktes werden Modelle zur Vorhersage des Verhaltens der harmonischen Ströme erarbeitet und verifiziert.

### 3.3.2 Forschungsprojekte

#### Directivity of an Electrically Large EUT with Attached Wires<sup>15</sup>

This session investigates the influence of wires attached to an electrically large EUT on the estimates for the directivity. A rectangular slotted metallic enclosure was considered as an EUT. For different cable configurations (Fig. 3.25) the simulated current distribution and the maximum directivity  $D_{\max}$  were determined in the frequency range from 1 GHz to 6 GHz by a numerical simulation technique. The simulation results reveal that  $D_{\max}$  for different cable configurations with the same length shows similar tendency and minor difference, see Fig. 3.26.

In general, the directivities of the three configurations with wires running outside the enclosure show similar tendency and only minor difference. The directivity is starting from 11 dBi and reaches up to a maximum value of 17.5 dBi with increasing oscillations. At some frequencies a shift of the resonant frequencies in Fig. 3.26 can be observed. However, the resonances occur almost at the same frequencies.

The radiation pattern of an electrically large EUT becomes irregular at high frequencies. It becomes difficult to measure the maximum field strength on an open-area test-site (OATS) or in an anechoic chamber. The mode-stirred chamber (MSC) as an alternative test site could simplify the measurement procedure and reduce the measurement time. Thus, the directivity of the EUT can be used in order to convert the measured radiated power into a comparable maximum field strength of a standard emission measurements.

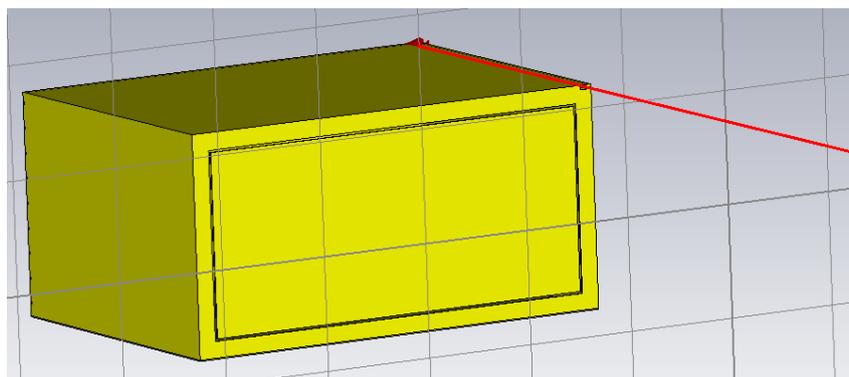


Figure 3.25: Simulated model of the enclosure with an attached wire traveling through a small hole on the top right corner of the front plane.

#### Projekt EREBAQ: Einfluss regenerativer Einspeisung und energieeffizienter Betriebsmittel auf Spannungsqualität und elektromagnetische Verträglichkeit<sup>16</sup>

Die Zahl der Betriebsmittel, die sich ungünstig auf die Spannungsqualität auswirken, steigt stetig. Ebenso wächst die Forderung nach mehr Energieeffizienz bei gleichbleibender oder gar verbesserter Versorgungszuverlässigkeit. Die derzeitige Entwicklung von zentralisierter Energieversorgung hin zu Smart Grids erfordert neue Ansätze. Die Vorhersage der zu erwartenden Effekte verlangt mathematische Modelle, die in der Lage sind, die Wechselwirkungen zwischen den Betriebsmitteln widerzuspiegeln. So können bei fortschreitender Änderung der Zusammensetzung des elektrischen Versorgungssystems mögliche Gefährdungen für die Spannungsqualität und die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) erkannt und durch Simulation Gegenmaßnahmen kosteneffizient auf

<sup>15</sup> von M. Sc. Xiaowei Wang

<sup>16</sup> von M. Sc. Anke Fröbel

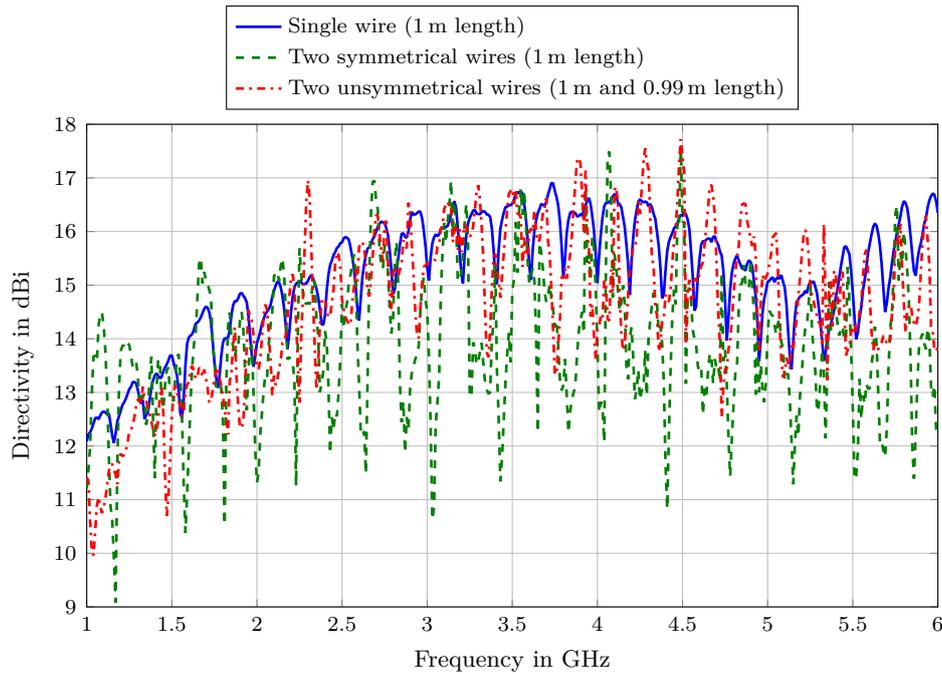


Figure 3.26: Simulated directivity against the frequency for 3 wire configurations.

ihre Wirksamkeit hin untersucht werden. Reproduzierbare Messungen bilden die Basis für die Entwicklung geeigneter Modelle.

Das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderte Vorhaben umfasst die Konzeption, Anschaffung, Installation und Inbetriebnahme eines Versuchsstandes bestehend aus einem hochleistungsfähigen Netzsimulator, einem PV-Simulator, verschiedenen elektronischen Lasten und adäquatem Messequipment. Das System wird 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.

Projektzeitraum: 01.09.2015 bis 28.02.2017

Gefördert durch:



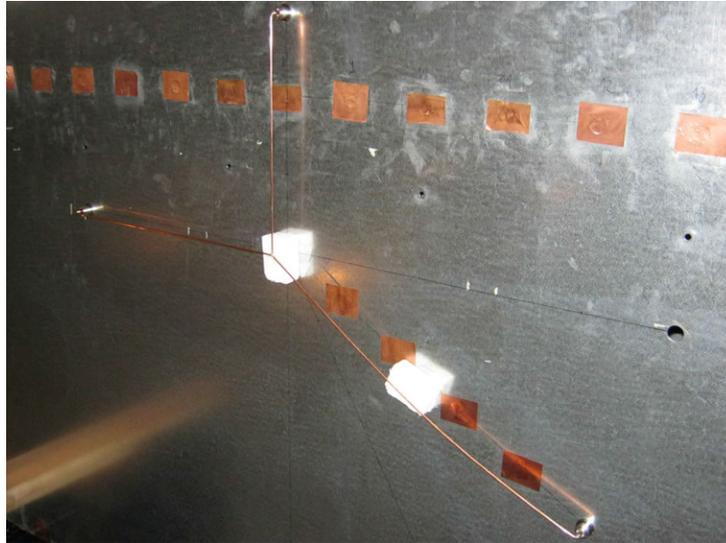
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

### Experimentelle Untersuchung der Einkopplung statistischer elektromagnetischer Felder in Leitungsnetzwerke<sup>17</sup>

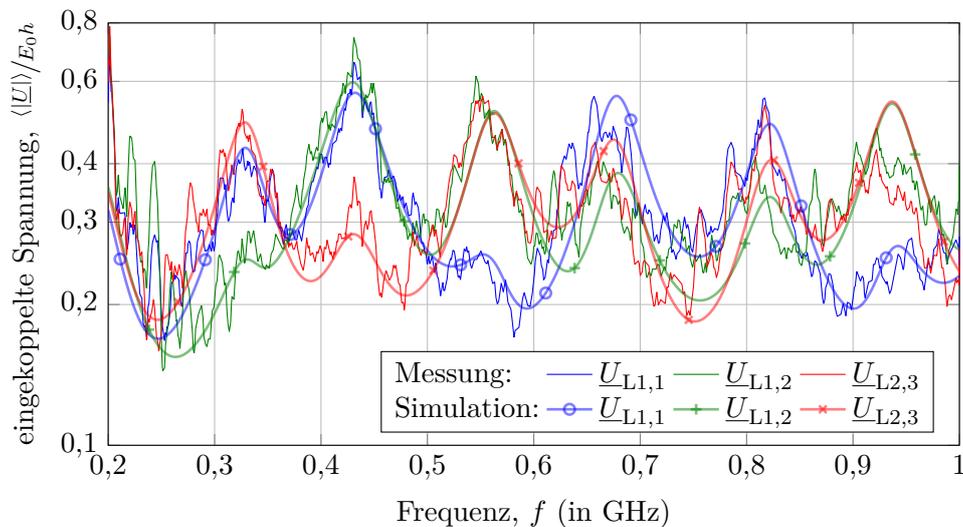
In diesem Forschungsprojekt wurde die Einkopplung statistischer elektromagnetischer Felder in ein Leitungsnetzwerk aus Einfachleitungen über einer leitfähigen Ebene untersucht. Ein

<sup>17</sup> von M. Sc. Johanna Kasper

Vorteil der Untersuchung eines Netzwerks aus Einfachleitungen ist die Möglichkeit, auf ein Symmetrierglied zwischen der untersuchten Leitung und dem Messgerät zu verzichten. Ein numerisches Simulationsmodell ist bereits vorhanden und kann damit messtechnisch validiert werden. Die numerische Lösung basiert auf der Leitungstheorie in Form der BLT-Gleichung (nach Baum, Liu und Tesche).



(a) Draufsicht auf das untersuchte Netzwerk aus Einfachleitungen über der Masseebene in der Basiskonfiguration



(b) Mittlerer Betrag der Spannung an den drei Leitungsenden

Abbildung 3.27: Messung der Einkopplung von statistischen Feldern in ein Netzwerk aus Einfachleitungen über einer perfekt leitfähigen Ebene

Für die Einkoppelmessung wurde ein Viertornetzwerkanalysator genutzt, da er sich gegenüber einem Oszilloskop durch einen höheren Dynamik- und Frequenzbereich auszeichnet. Die gemessenen Streuparameter wurden anschließend in die eingekoppelte Spannung in Bezug auf die anregende elektrische Feldstärke umgerechnet. Die dafür nötige Güte konnte aus der Kopplung zweier Antennen bestimmt werden.

Das untersuchte Netzwerk aus drei Leitungen, die in einem zentralen Knoten miteinander verbunden sind, ist in Abbildung 3.27a dargestellt. Die eingekoppelte Spannung am Ende der Leitungen wurde für verschiedene Rührerstellungen in Abhängigkeit von der Frequenz gemessen

und statistisch ausgewertet. Dabei wurden verschiedene Konfigurationen des Netzwerks (unterschiedliche Länge und Ausrichtung der dritten Leitung, Variation des Abschlusses der zweiten und dritten Leitung in Form von Kurzschluss und Leerlauf) untersucht. Der mittlere Betrag der eingekoppelten Spannung an den drei Leitungsenden des Netzwerks ist in Abbildung 3.27 dargestellt.

Erstmals wurde die Einkopplung statistischer Felder in ein Leitungsnetzwerk aus Einfachleitungen über einer leitfähigen Ebene durch Messungen in einer Modenverwirbelungskammer experimentell untersucht. Die Messergebnisse wiesen eine gute Übereinstimmung mit den Simulationsergebnissen auf. Die Ergebnisse bestätigen damit ein vorhandenes Simulationsmodell auf Basis der klassischen Leitungstheorie. Geplante Untersuchungen umfassen die Einkopplung in Netzwerke aus Doppel- und Mehrfachleitungen.

### Verteilte Kapazitäten bei Empfangsspulen für die Magnetresonanztomographie<sup>18</sup>

Empfangsspulen sind wichtige Bestandteile eines jeden Magnetresonanztomographen – ohne sie ist eine Bildgebung nicht möglich. Maßgeblich für die Qualität dieser ist die Sensitivität der Spulenelemente. Diese ist optimal, wenn eine quasistatische Stromverteilung vorherrscht d. h. Stromvariationen über dem Umfang minimal sind. Von dieser Verteilung kann jedoch nur ausgegangen werden, wenn  $b \cdot k \ll 1$  gilt, wobei  $b$  der Spulradius und  $k$  die Wellenzahl ist. Um die Stromverteilung zu linearisieren, werden verteilte Kapazitäten eingesetzt. Obwohl es sich dabei um eine gut etablierte Methode handelt, existiert keine Methodik, um die Kondensatoren entsprechend zu dimensionieren.

Um dies zu erreichen, wurden die Vierpolparameter gewählt und eine Methode entwickelt, um die Leiterschleife darin zu beschreiben (siehe Abb. 3.28). Mittels Analyse der Randbedingungen konnte daraus eine Dimensionierungsgleichung abgeleitet werden, die die Stromverteilung auf der Leiterschleife linearisiert. Dies führt zu einer Symmetrierung der Feldverteilung und zu verbesserten Empfangseigenschaften (siehe Abb. 3.29).

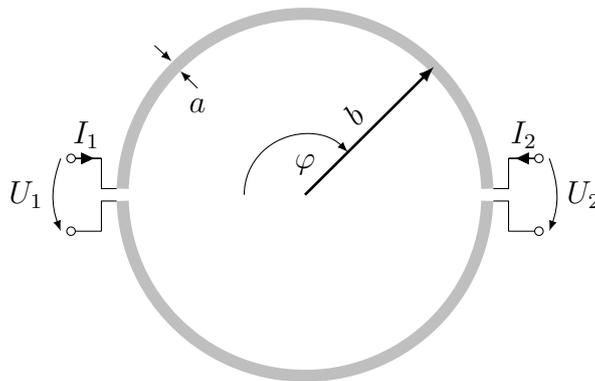


Abbildung 3.28: Leiterschleife mit zwei Anschlüssen in der Vierpoldarstellung

### Elektromagnetische Feldsimulation einer Ablationsnadel in der MR-Bildgebung<sup>19</sup>

Die Radiofrequenzablation (RFA) dient der Zerstörung von Tumorgewebe im menschlichen Körper mithilfe von elektrischen Strömungsfeldern. Die simultane Visualisierung der Strompfade der RFA ermöglicht im MRT eine bessere Kontrolle des Ablationsvorganges. Mit dem Simulationsprogramm

<sup>18</sup> von M. Sc. Enrico Pannicke

<sup>19</sup> von M. Sc. Enrico Pannicke

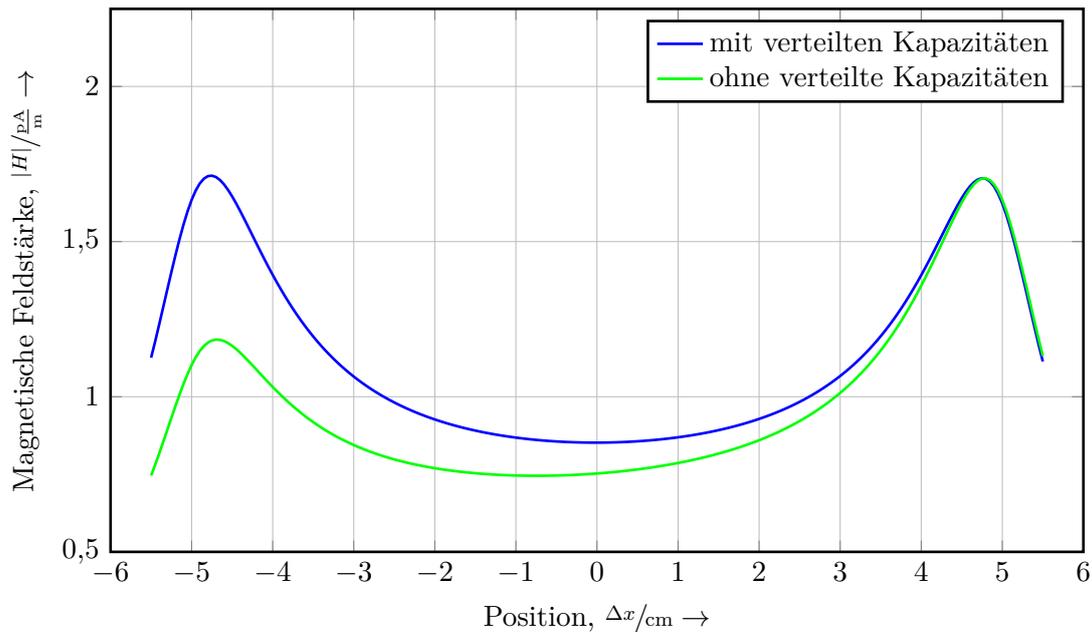


Abbildung 3.29: Symmetrierung der Feldverteilung durch Einsatz verteilter Kapazitäten

OpenEMS wurden die Stromverläufe, sowie die entstehenden Magnetfelder verschiedener RFA-Nadeln unter 3 T-MR-Bedingungen untersucht. Ziel war es den sogenannten „Helligkeitsansatz“ zu evaluieren. Die von der Stromverteilung erzeugten Magnetfelder könnten in der Bildgebung genutzt werden, Areale mit hoher Stromdichte hell hervorzuheben. Grundvoraussetzung dafür ist aber eine genügend hohe Korrelation zwischen Strom- und Feldverteilung. Als Ablationsanordnung wurden eine monopolare Elektrode, eine Bipolarnadel und verschiedene Anordnungen von bipolaren Multielektrodensystemen erprobt. Außerdem wurden Ablationen mit einer 3 T-Larmorfrequenz von 127 MHz und einer typischen RFA-Frequenz von 460 kHz für eine monopolare Ablationsnadel miteinander verglichen.

Der Stromverlauf bei 127 MHz war wesentlich inhomogener als bei 460 kHz (siehe Abb. 3.30). Das für die Bildgebung nutzbare Magnetfeld des bipolaren Multielektrodensystems konnte das Ablationsvolumen zu einem großen Teil umschließen, wird aber deutlich von dem konzentrierten Strom in den Zuleitungen dominiert (siehe Abb. 3.31). Der Einfluss der Stromdichte im Gewebe ist wesentlich geringer, da sich dieser Strom im Körper verteilt. Der „Helligkeitsansatz“ ist daher ungeeignet zur Überwachung der Stromverläufe im Körper und es müssen komplexere Verfahren gewählt werden, um die Stromverteilung aus den gemessenen Feldern zu rekonstruieren.

### Reduktion von Elektromagnetischen Störungen in Niederspannungsnetzen<sup>20</sup>

Der Einfluss von Filtern für Niederspannungsnetze in Gebäudeinstallationen ist untersucht worden. Bei einigen Gebäuden hatten die eingebauten Filter nicht den gewünschten Effekt gehabt. Ziel des durchgeführten Projektes war den Einfluss von existierenden Filtern auf realistische Gebäudeinstallationen durch Simulation nachzubilden. Im ersten Schritt wurde je ein Ersatzschaltbild für ein Y- und X-Kondensatoren sowie Leitungsfiler entworfen. Mit Hilfe eines Impedanzanalyser wurde die frequenzabhängige Impedanz existierender Filter und daraus die Werte der einzelnen Elemente der Ersatzschaltbilder bestimmt. Um die Simulationsmodelle für weitere reale Filter generieren zu können, wurde eine Vorschrift zur Bestimmung der Ersatzelemente aus der Impedanzmessung entwickelt.

<sup>20</sup>von M. Sc. Matthias Hirte

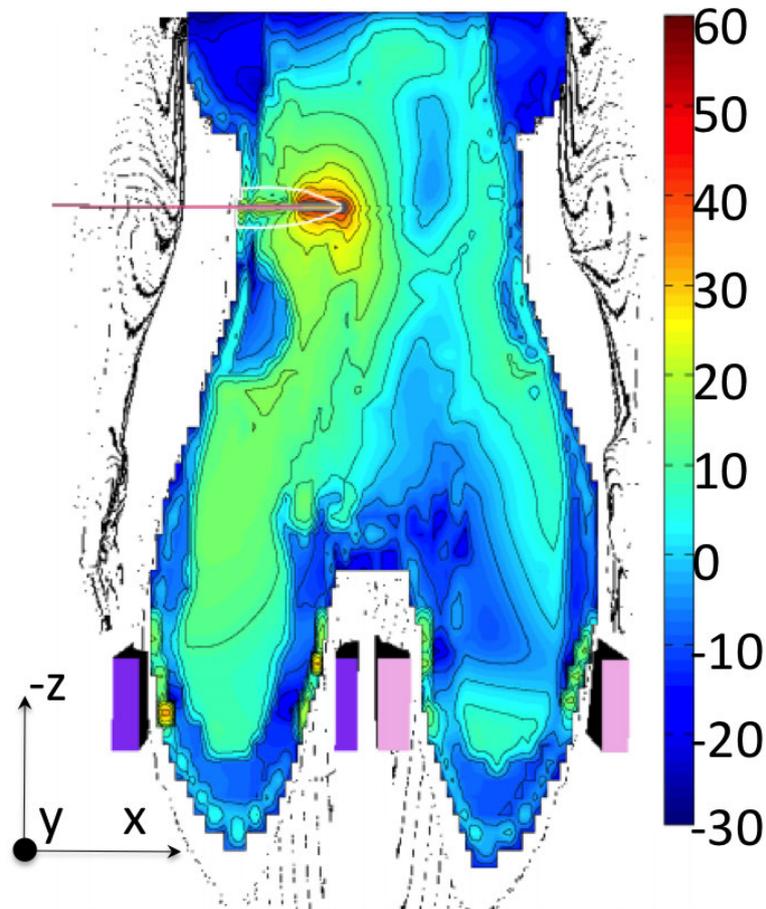


Abbildung 3.30: Stromverteilung im menschlichen Körper für eine monopolare Ablation bei einer Frequenz von  $f = 127 \text{ MHz}$

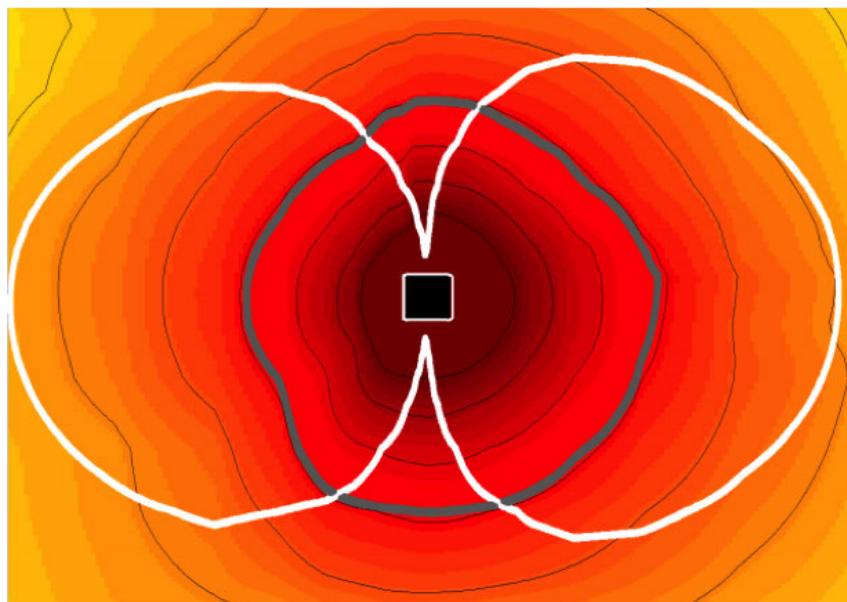


Abbildung 3.31: Stromverteilung um die Ablationsnadel bei einer Frequenz von  $f = 127 \text{ MHz}$  mit Ablationsvolumen (grau) und durch Magnetfeld bestimmten „Helligkeitsbereich“ (weiß)

Außerdem wurden Simulationsmodelle für verschiedene Kabel, die typischerweise in Gebäudeinstallationen verwendet werden generiert. Anschließend wurde eine einfache Topologie, bestehend aus mehreren Kabeln und Filtern, simuliert und vermessen, um die gewonnenen Modelle validieren zu können. Anschließend wurden der Einfluss verschiedener Störimpulse (Surge, Burst, HF-Störungen) auf Niederspannungsnetzen in Gebäuden mit Hilfe von Simulationen untersucht. In Abbildung 3.32 ist ein Simulationsmodell für einen Leitungsfilter dargestellt.

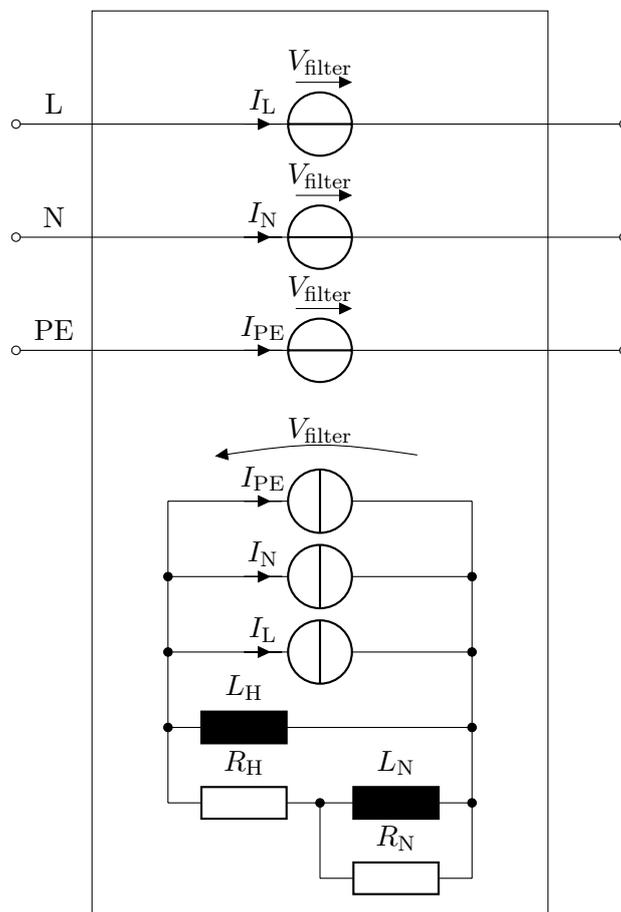


Abbildung 3.32: Simulationsmodell für ein Leitungsfilter

### Streuung an Hohlraumresonatoren mit kleinen Aperturen und nicht linearer Beladung<sup>21</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 Abb. 3.33). Zur Lösung der auftretenden Integralgleichungen wird ein Verfahren zur analytischen Regularisierung

<sup>21</sup> von Dipl.-Phys. Jörg Petzold

der Greenschen Funktionen genutzt, um die klassische Theorie der Aperturkopplung nach Bethe zu verallgemeinern. Die so im Frequenzbereich bestimmten linearen Systemeigenschaften können im Anschluss nach einem Verfahren nach einer Transformation in den Zeitbereich auch auf nichtlineare Lasten verallgemeinert werden. Ein Beispiel für die Berechnung des Stromes durch die Leiterschleife ist in der Abbildung 3.34 dargestellt.

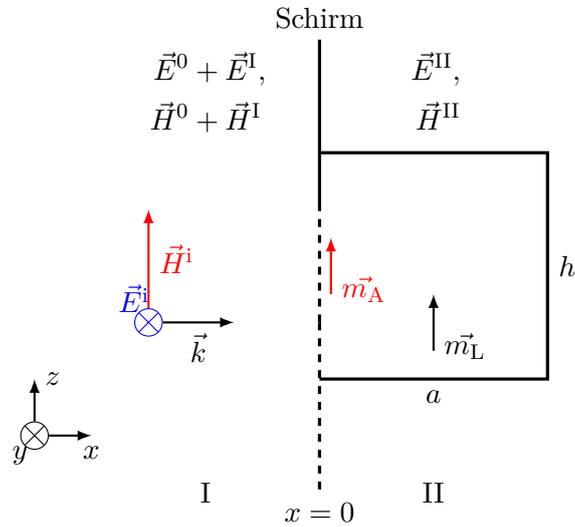


Abbildung 3.33: Schematische Darstellung der untersuchten Konfiguration

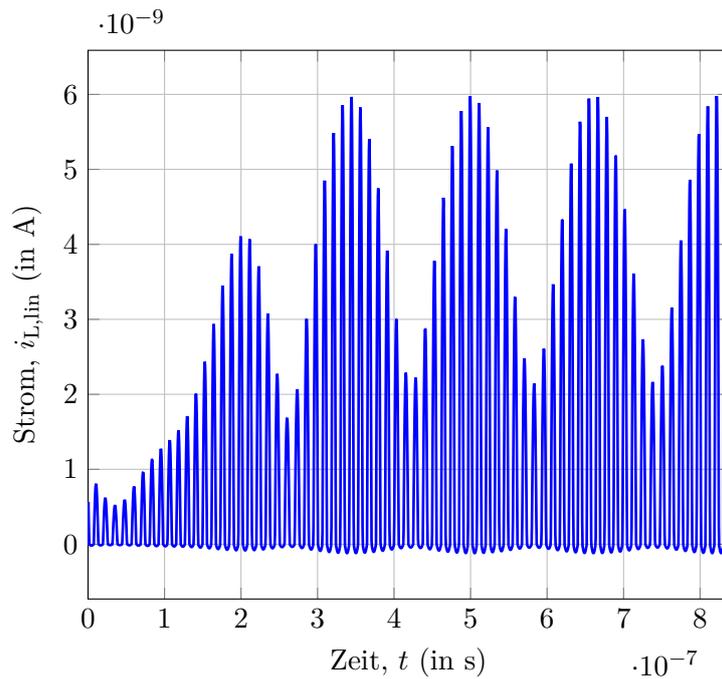


Abbildung 3.34: Strom durch Leiterschleife im Resonator unter nichtlinearer Last

### Comparison of the SEM Poles Calculated from Experiments, Numerical Methods, and Analytical Calculations from Dr. rer. nat. Sergey Tkachenko

In this research project, the high-frequency interaction between fields and different wire objects or thin wiring systems has been analyzed. In the high frequency range, the transmission line approximation is often wrong. Exact numerical methods offer better results, but are only valid for

the specific case. So, advanced analytical methods are needed, the singularity expansion method (SEM) introduced by Baum is one of such methods. It describes the coupling and radiation of objects and can also be used to identify certain objects. It can also be used to calculate results in time domain.

During the project three different analytical methods have been developed:

1. a method based on the transmission line super theory by Haase and Nitsch,
2. a method based on modal parameters, and
3. a method based on the asymptotic approximation.

Theoretical results have been calculated for different thin wire systems. Validation measurements have been done with lumped excitation over a conducting ground plane and with distributed field excitation in a GTEM cell. The comparison shows a reasonable agreement, as shown in Fig. 3.35 for a short-circuited semi circle.

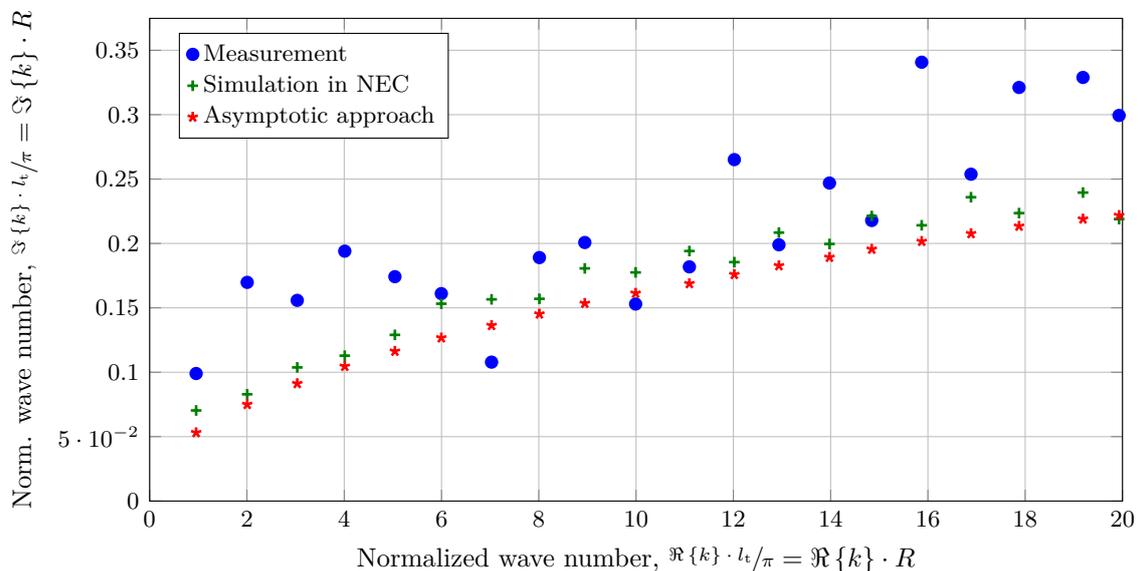


Figure 3.35: Comparison of the SEM poles for the short-circuited semi circle with lumped excitation calculated by different methods. The radius of the circle is denoted with  $R$ , the total length of the wire with  $l_t$ .

### Zeitbereichssimulation des nieder- und hochfrequenten Verhaltens von Asynchronmaschinen in SPICE<sup>22</sup>

Das Ziel dieses Forschungsprojekts ist die modell-basierte Beschreibung von Asynchronmaschinen durch ein allgemeines Ersatzschaltbild, das in einem Netzwerksimulator wie SPICE benutzt werden kann. Das Modell beinhaltet das dynamische Verhalten des Motors inklusive möglicher mechanischer Belastungen sowie den hochfrequenten Einfluss der Wicklungen an den Anschlussklemmen. Die Parametrierung wurde untersucht und einige vergleichende Messungen mit einem realen Motor wurden durchgeführt und diskutiert. Dazu zählen das Hochfahren des Motors (siehe Abbildung 3.36) oder das Ändern der mechanischen Last. Die entwickelte Methode erlaubt die Simulation des gesamten Antriebsstrang eines Elektro- oder Hybridfahrzeugs, bestehend aus

<sup>22</sup>von Dr.-Ing. Mathias Magdowski, M. Sc. Martin Krüger und M. Sc. Xiaowei Wang

einer Traktionsbatterie, einem Umrichter und dem Elektromotor inklusive der elektromagnetischen Störphänomene, wie z. B. der transienten Schaltflanken der Statorströme. Die entwickelte Methode soll in Zukunft auf eine Synchronmaschine übertragen werden.

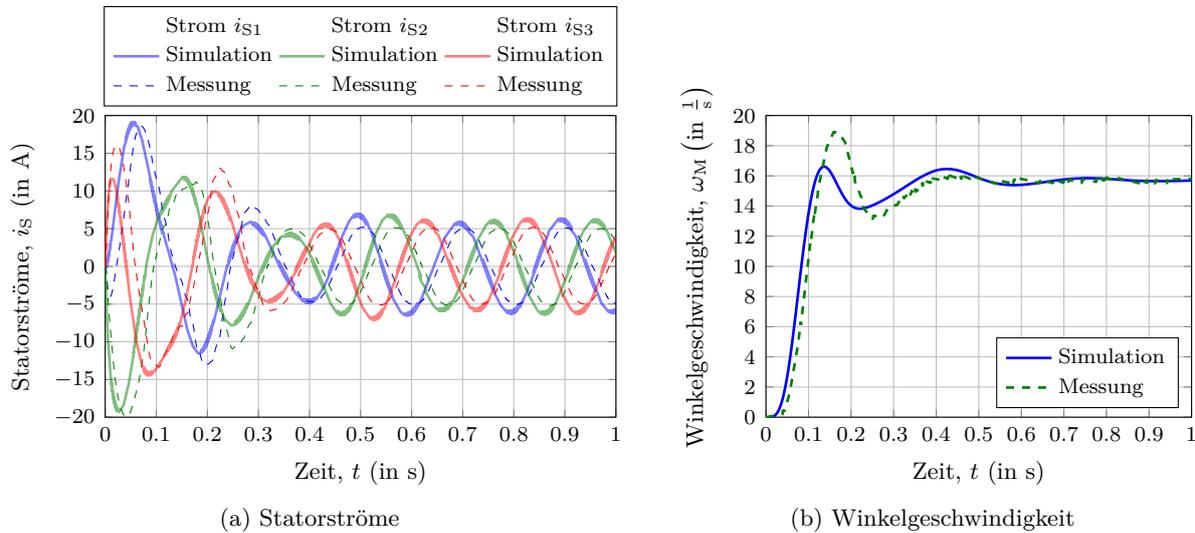


Abbildung 3.36: Vergleich der gemessenen und simulierten Statorströme und der Winkelgeschwindigkeit des Rotors beim Hochfahren des Motors

### Numerische Simulation der Einkopplung von statistischen Feldern in Leitungsnetzwerke<sup>23</sup>

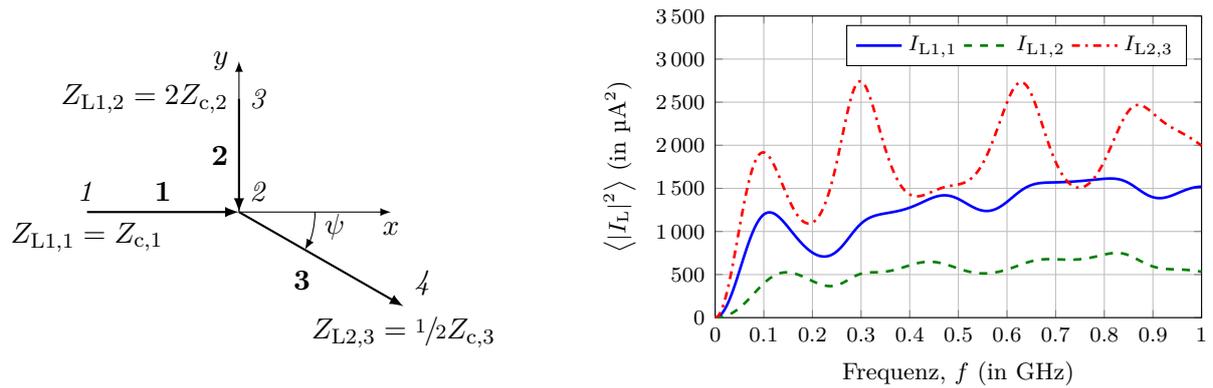
Basierend auf der klassischen Leitungstheorie wurde in diesem Forschungsprojekt eine geschlossene Lösung für den Strom an den Enden einer beliebig ausgerichteten Einfachleitung über einer perfekt leitfähigen Masseebene hergeleitet. Die Anregung ist dabei eine ebene Welle. Das Ergebnis wurde dann in Form einer BLT-Gleichung (nach Baum, Liu und Tesche) auf Leitungsnetzwerke aus Einfachleitungen über einer leitfähigen Masseebene erweitert. Eine Validierung erfolgte mit einem Vergleich mit Simulationsergebnissen der Momentenmethode. Mit einem Ansatz ebener Wellen zur Darstellung von statistischen Feldern kann auch die statistische Einkopplung untersucht werden. Verschiedene Konfigurationen eines beispielhaften Netzwerks (siehe Abbildung 3.37a) wurden analysiert. Dabei wurde jeweils das mittlere Betragsquadrat des Stromes  $I_L$  an den Leitungsenden berechnet und diskutiert (siehe Abbildung 3.37b). Ein weiteres Ziel ist die Erweiterung der Theorie auf Netzwerke aus Doppel- und Mehrfachleitungen.

### Effiziente analytische Berechnung der Einkopplung von ebenen Wellen in gleichförmige Leitungen mit beliebigen Abschlusswiderständen im Zeitbereich<sup>24</sup>

Im Forschungsprojekt wurde ein effizientes Berechnungsschema für die transiente Einkopplung ebener Wellen in gleichförmige Leitungen entwickelt. Die Methode basiert auf geschlossenen Gleichungen, die in Form einer endlichen Summe ausgewertet werden. Die Methode ist sowohl für Einfachleitungen über einer leitfähigen Ebene als auch für Doppelleitungen im Freiraum anwendbar. Die Leitungen können dabei mit beliebigen Abschlusswiderständen abgeschlossen werden. Die einfallende ebene Welle kann durch jede Zeitfunktion beschrieben werden, deren Stammfunktion existiert. Im Vergleich mit einer Berechnung im Frequenzbereich (siehe Abbildung 3.38) und anschließender inverser Fouriertransformation ist die entwickelte Methode viel schneller, numerisch exakter und sehr einfach verständlich.

<sup>23</sup> von Dr.-Ing. Mathias Magdowski

<sup>24</sup> von Dr.-Ing. Mathias Magdowski



- (a) Draufsicht auf das beispielhaft untersuchte Netzwerk aus Einfachleitungen über der  $x$ - $y$ -Ebene. Die Leitungen sind mit fettgedruckten Zahlen, die Knoten mit kursiven Zahlen beschriftet. Die Abschlusswiderstände sind als Vielfache der charakteristischen Impedanz der Leitungen angegeben.
- (b) Mittleres Betragsquadrat des Stromes an den Leitungsenden für Leitungslängen von 40 cm, 30 cm und 50 cm, Leitungsradii von 0,6 mm, 0,5 mm und 0,4 mm und eine kammer-spezifische Konstante von  $E_0 = 1 \frac{\text{V}}{\text{m}}$ . Der erste Index bezeichnet das Leitungsende, der zweite die Leitung. Für die angepasste Leitung 1 sind fast keine Leitungsresonanzen sichtbar, dafür aber für die fehlangepasste Leitung 3.

Abbildung 3.37: Numerische Simulation der Einkopplung von statistischen Feldern in ein Netzwerk aus Einfachleitungen über einer perfekt leitfähigen Ebene

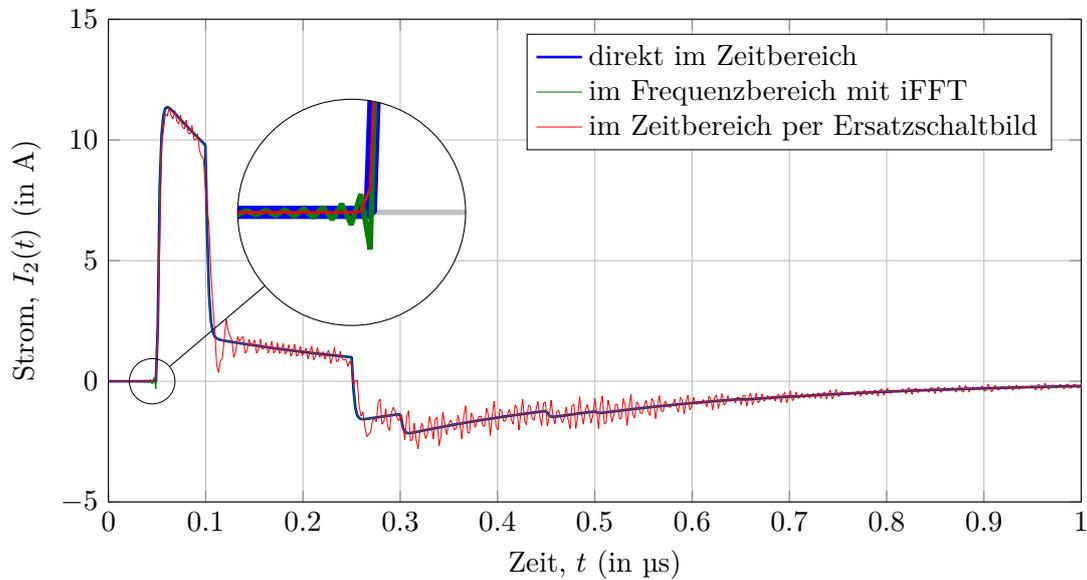


Abbildung 3.38: Laststrom am Ende einer Doppelleitung, berechnet mit verschiedenen Methoden. Die Doppelleitung ist  $l = 30$  m lang. Die Drähte sind  $s = 20$  cm voneinander entfernt und haben einen Durchmesser von  $d_0 = 3$  mm. Die Leitung ist an beiden Enden mit der Hälfte der charakteristischen Impedanz fehlangepasst abgeschlossen. Die Anregung erfolgt durch einen doppelt-exponentiellen Puls, dessen Welle die Leitung schräg von oben trifft. Die Lösung per schneller inverser Fouriertransformation (iFFT) zeigt einige akusale Artefakte (siehe Vergrößerung). Die Lösung mit einem diskreten Ersatzschaltbild der Leitung zeigt sehr viel numerisches Rauschen. Die direkte Lösung im Zeitbereich ist dagegen sehr exakt.

### 3.3.3 Promotionen

#### **Dr.-Ing. Xiaofeng Pan: Numerisches EMV-Simulationsverfahren zur Berechnung der Störaussendung elektrischer Antriebssysteme in Hybridfahrzeugen**

Gutachter:

- Prof. Ralf Vick, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
- Prof. Achim Enders, Technische Universität Braunschweig

verteidigt am 25. November 2015 an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (siehe Abbildung 3.39)

Der elektrische Antriebsstrang in Hybrid- und Elektrofahrzeugen erhöht aufgrund hoher elektrischer Leistungen und der integrierten Leistungsschalter die Risiken der elektromagnetischen Störaussendung im Vergleich zu konventionellen 12 V-Fahrzeugkomponenten deutlich.

In der vorliegenden Arbeit wird ein allgemeines Berechnungsverfahren unter Verwendung numerischer Methoden zur Simulation der leitungsgebundenen und abgestrahlten Störungen des elektrischen Antriebssystems vorgestellt. Hierzu wurden hochfrequenztaugliche EMV-Ersatzschaltbilder der Hochvoltkomponenten im elektrischen Antriebssystem erstellt. Dies beinhaltet den Frequenzrichter (Störquelle), die Hochvoltleitungen (Koppelpfade), die Hochvoltbatterie (Systemversorgung), die elektrische Maschine (Systemlast) und die Steckverbindungen der Hochvoltleitungen. Diese Komponentenmodelle wurden mittels Messungen der bereits in der Automobilindustrie eingesetzten Bauteile verifiziert.

Basierend auf den vorhandenen Komponentenmodellen erfolgt die anschließende Systemberechnung der leitungsgebundenen Störungen im Zeitbereich und dann durch die FFT (Fast Fourier Transformation) die Transformation in den Frequenzbereich. Die Genauigkeit der Systemberechnung wurde sowohl durch Messungen am Prüfstand, als auch mittels Fahrzeugmessungen bestätigt.

In der Arbeit wurde der Einfluss der abgestrahlten Störungen auf eine typische Störsenke im Fahrzeug untersucht. Dazu wurden die komplexen Scheibenantennenstrukturen im Fahrzeug modelliert. Weiterhin wurde der Einfluss des Antennenverstärkers in der Berechnung mit berücksichtigt. Die leitungsgebundenen Störungen auf Kabeln und die dadurch verursachten abgestrahlten elektromagnetischen Störungen wurden in dieser Arbeit mithilfe der Systemtheorie verkoppelt. Die gesamte Berechnung der im Rundfunkbereich ankommenden Störungen an den Antennen wurde schließlich durch Fahrzeugmessungen validiert.

Die vorliegende Arbeit untersucht auf der Komponenten-, System- und Gesamtfahrzeugebene die Entstehung, die Ausbreitung sowie die Einkopplung der elektromagnetischen Störungen aus dem elektrischen Antriebsstrang. Sie ermöglicht die frühzeitige EMV-Analyse des Fahrzeugdesigns mittels numerischer Berechnungen und hilft die Kosten- und Zeitaufwände in der Fahrzeugentwicklung zu reduzieren.

### 3.3.4 Veröffentlichungen

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

- [1] A. Fröbel und R. Vick, „Performance analysis for non-linear load modelling with frequency coupling admittance matrices“, in *23rd International Conference on Electricity Distribution (CIRED)*, Lyon, Frankreich, Juni 2015.



Abbildung 3.39: Gratulation an Xiaofeng Pan am Otto-von-Guericke-Denkmal

- [2] J. Petzold, E. Pannicke, S. Tkachenko und R. Vick, „External scattering by rectangular cavities with small apertures“, in *Proceedings of the Joint IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and EMC Europe*, IEEE Catalog Number: CFP15EMC-USB, Dresden, Aug. 2015, S. 68–73, ISBN: 9781479966158.
- [3] X. Wang und R. Vick, „Determination of radiated emissions of an electrically large EUT: Simulation and experiment“, in *Proceedings of the Joint IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and EMC Europe*, IEEE Catalog Number: CFP15EMC-USB, Dresden, Aug. 2015, S. 295–299, ISBN: 9781479966158.
- [4] B. Willmann, T. Rinkleff, M. Obholz und R. Vick, „Automotive industry’s EMC requirements for voltage ripple in the high-voltage system of electrical vehicles“, in *Proceedings of the Joint IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and EMC Europe*, IEEE Catalog Number: CFP15EMC-USB, Dresden, Aug. 2015, S. 673–678, ISBN: 9781479966158.
- [5] M. Krüger, M. Magdowski, R. Vick, T. Schallschmidt und T. Rinkleff, „Transient simulation of the low-frequency and high-frequency behavior of asynchronous machines in SPICE“, in *Proceedings of the Joint IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and EMC Europe*, IEEE Catalog Number: CFP15EMC-USB, Dresden, Aug. 2015, S. 679–684, ISBN: 9781479966158.
- [6] L. Middelstädt, A. Lindemann, M. Al-Hamid und R. Vick, „Influence of parasitic elements on radiated emissions of a boost converter“, in *Proceedings of the Joint IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and EMC Europe*, IEEE Catalog Number: CFP15EMC-USB, Best Student Paper Award Finalist, Dresden, Aug. 2015, S. 755–760, ISBN: 9781479966158.
- [7] F. Ossevorth, H. G. Krauthäuser und J. Nitsch, „Network analysis of full wave multi-conductor transmission lines“, in *Proceedings of the Joint IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and EMC Europe*, IEEE Catalog Number: CFP15EMC-USB, Dresden, Aug. 2015, S. 801–805, ISBN: 9781479966158.
- [8] R. Rambousky, J. Nitsch und S. Tkachenko, „Application of generalized reflection and transmission coefficients to inhomogeneous conductors at high frequencies“, in *Proceedings of the Joint IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and EMC*

- Europe, IEEE Catalog Number: CFP15EMC-USB, Dresden, Aug. 2015, S. 806–811, ISBN: 9781479966158.
- [9] F. Middelstädt, S. Tkachenko, R. Vick und R. Rambousky, „Analytic approximation of natural frequencies of bent wire structures above ground“, in *Proceedings of the Joint IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and EMC Europe*, IEEE Catalog Number: CFP15EMC-USB, Dresden, Aug. 2015, S. 812–817, ISBN: 9781479966158.
- [10] M. Magdowski und R. Vick, „Numerical simulation of the stochastic electromagnetic field coupling to transmission line networks“, in *Proceedings of the Joint IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and EMC Europe*, IEEE Catalog Number: CFP15EMC-USB, Dresden, Aug. 2015, S. 818–823, ISBN: 9781479966158.
- [11] —, „Efficient analytical calculation of the plane wave coupling to uniform transmission lines with arbitrary load resistances in time domain“, in *Proceedings of the Joint IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and EMC Europe*, IEEE Catalog Number: CFP15EMC-USB, Dresden, Aug. 2015, S. 975–980, ISBN: 9781479966158.
- [12] M. Al-Hamid, R. Vick, M. Krüger und P. Wollmann, „Limitations of a stripline for immunity tests on road vehicle components“, in *Proceedings of the Joint IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and EMC Europe*, IEEE Catalog Number: CFP15EMC-USB, Dresden, Aug. 2015, S. 1232–1237, ISBN: 9781479966158.
- [13] X. Wang und R. Vick, „Directivity and effective radius of an electrically large EUT with attached wires“, in *Proceedings of the Joint IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and EMC Europe*, IEEE Catalog Number: CFP15EMC-USB, Dresden, Aug. 2015, S. 1467–1472, ISBN: 9781479966158.
- [14] M. Krüger, M. Magdowski, X. Wang, R. Vick, T. Schallschmidt und T. Rinkleff, „Transiente Simulation des nieder- und hochfrequenten Verhaltens von Asynchronmaschinen in SPICE“, in *12. Magdeburger Maschinenbau-Tage*, Beitrag A2-2, Magdeburg, Sep. 2015, S. 9, ISBN: 9783944722269.
- [15] J. Petzold, S. Tkachenko und R. Vick, „Energy conserving coupling through small apertures in an infinite perfect conducting screen“, *Advances in Radio Science*, Bd. 13, S. 227–232, 2015. DOI: 10.5194/ars-13-227-2015. Adresse: <http://www.adv-radio-sci.net/13/227/2015/>.
- [16] E. Pannicke, M. Kaiser, G. Rose und R. Vick, „Preliminary results on the simulation of susceptibility artifacts by usage of open-source software only“, *Magnetic Resonance Materials in Physics, Biology and Medicine*, Bd. 28, Nr. 1, S. 419–519, 2015, ISSN: 0968-5243. DOI: 10.1007/s10334-015-0490-7.
- [17] E. Pannicke, T. Gerlach, R. Vick, M. Grundmann und G. Rose, „Elektromagnetische Feldsimulation einer Radiofrequenzablation“, in *IGIC 2015 : 2. Image-Guided Interventions Conference*, Mannheim, Nov. 2015, S. 17–18.

#### Dissertationen und Bücher

- [1] M. Magdowski und R. Vick, „Elektromagnetische Verträglichkeit“, in *Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs – Basiswissen*, H. Tschöke, Hrsg., Ser. ATZ/MTZ-Fachbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015, S. 123–132, auch als eBook verfügbar, ISBN: 9783658046439. DOI: 10.1007/978-3-658-04644-6.

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

- [1] M. Magdowski, „Wozu braucht man eine 4 m × 6 m × 8 m große Mikrowelle?“, in *Science Slam*, Schauspiel Leipzig: HALternativ e. V., Feb. 2015.
- [2] R. Vick, „Theoretische und physikalische Grundlagen der EMV“, in *Internationale Fachmesse für Elektromagnetische Verträglichkeit*, Landesmesse bzw. Internationales Congresscenter Stuttgart (ICS), März 2015.
- [3] M. Magdowski, H. G. Krauthäuser und C. Stipp, „Die Modenverwirbelungskammer als alternative EMV-Messumgebung“, in *Internationale Fachmesse für Elektromagnetische Verträglichkeit*, Landesmesse bzw. Internationales Congresscenter Stuttgart (ICS), März 2015.
- [4] M. Magdowski, „Wozu braucht man eine 4 m × 6 m × 8 m große Mikrowelle?“, in *Science Slam*, Freylinghausen-Saal, Frankesche Stiftungen, Halle: HALternativ e. V., Apr. 2015.
- [5] X. Wang, „Ersatzschaltbilder typischer Asynchronmaschinen für die EMV-Simulation von elektrifizierten Fahrzeugen“, in *Forschungsseminar Automotive*, Institut für Kompetenz in Automobilität (IKAM), Magdeburg, Apr. 2015.
- [6] M. Magdowski und R. Vick, „Efficient simulation of the stochastic electromagnetic field coupling into transmission line structures using the method of moments“, in *Workshop 2 – Modeling of EMC Problems Using CONCEPT-II*, C. Schuster und H.-D. Brüns, Hrsg., Joint IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility und EMC Europe, Dresden, Aug. 2015.
- [7] M. Magdowski, „Wozu braucht man eine 4 m × 6 m × 8 m große Mikrowelle?“, in *Science Slam*, Freylinghausen-Saal, Frankesche Stiftungen, Halle: HALternativ e. V., Okt. 2015.
- [8] —, „Wozu braucht man eine 4 m × 6 m × 8 m große Mikrowelle?“, in *Leipziger Science Slam, Vorentscheid Ost der Deutschen Meisterschaft, Werk 2*: <http://www.science-slam.com/>, Okt. 2015.
- [9] —, „Knackpunkt Elementarmathematik – Ohne Vorkurse geht nichts mehr“, in *Mathematik in den MINT-Studiengängen im norddeutschen Raum – Herausforderungen und Lösungsansätze am Übergang von der Schule zur Hochschule*, Evangelische Akademie Loccum: Schaede, Stephan, Nov. 2015.

## 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 2015 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

#### **Thermal Impedance Spectroscopy for Non-Destructive Evaluation of Power Cycling<sup>25</sup>**

Due to energy transition, e. g. the „Energiewende“ in Germany, and the aim to reduce CO<sub>2</sub> emissions the amount of power electronics in field of renewable and distributed generation increases. This means, that new power generation sources in the grid require a considerable increase of applied power electronic components, e. g. converters for doubly fed induction machines of wind

---

<sup>25</sup> von Dipl.-Ing. Folkhart Grieger

turbines or for photovoltaic applications. In the face of changing load depending on environmental exposures, e. g. wind strength or sunshine, temperature swings lead to thermo mechanical stress within the layer interfaces of the installed power modules. The thermo mechanical stress evokes accelerated aging of those electronic devices.

On the one hand, high reliability in the electric power distribution grid is required. On the other hand, it is intended to avoid an over dimensioning of the components in the grid taking into consideration the costs. Therefore, research regarding characteristics of critical power electronic components gets a high priority to ensure long operation time and to prevent over dimensioning. Testing and evaluating the reliability of power semiconductors in terms of active strain is done by active power cycling. With active power cycling conduction losses during turned-on load current are used to heat up the Device Under Test (DUT).

In off-state, the DUT is cooling down. The temperature swing is a function of the applied load current. Since the device is heated by its own thermal losses, the power cycling is called active. This process will be done periodically until the component reaches the end of life. A non-destructive method is used to investigate the thermal path of power semiconductor devices in order to detect changes or failure in the thermal interfaces during the power cycling. The aim of this research is to evaluate reliability of power modules depending on application strain.

For the experimental investigations a test rig was set up using a real-time system to control the process of active power cycling. To measure voltages with high time resolution a fast FPGA is used. The measured analogue voltages are first digitized by ADC cards and then valuated by the FPGA. The FPGA was combined with the real-time system. Hence, the rig is used to measure the transient thermal impedance paths e. g. chip to case  $Z_{th,jc}$  and chip to heatsink  $Z_{th,jh}$ .

Measuring the thermal impedance  $Z_{th}$  is done by measuring the transient die temperature drop from steady state temperature during load current on-state mode (high temperature) to steady state temperature during load current off-state mode when only a measuring current is flowing (low temperature).

The transient die temperature is measured indirectly using forward voltage of the power semiconductor during load current off-state. Also the temperatures from case  $T_c$  and heatsink  $T_h$  are measured during cooling down after steady state temperature conditions in heating phase.

Knowing the assembly of a power semiconductor it is possible to describe each layer  $i$  of the component with a thermal capacity  $C_{th,i}$  and a thermal resistance  $R_{th,i}$ . In Figure 3.40 two equivalent circuit diagrams are presented, which model the thermal impedance.

The equivalent circuit in Figure 3.40a is the physical Cauer network which represents the physical structure of the component designed with aforementioned thermal elements. Hence, each network node represents one junction between layers of the real device. The second thermal equivalent circuit in Figure 3.40b is the mathematical Foster network which is used to calculate the virtual junction temperature  $T_{vj}$ . This model has no physical representation of the real component but models its behavior.

During active power cycling a steady swing of virtual junction temperature  $\Delta T_{vj}$  will occur depending on the load current  $I_L$  and the cooling power of test assembly. The heat injected in the chip due to conduction losses yields a temperature gradient from chip to heatsink which is plausible when considering the physical circuit in Figure 3.40a.

This means different intrusion of heat into the component during power cycling depending on the nominal load current and duration of heating up. The combination of higher cycle times and smaller load currents leads to further thermal intrusion in the component and therefore more stress to the layer interfaces compared to short cycle times combined with high load currents, which instead primarily stress the bond wires. The end-of-life is defined as the increment of the

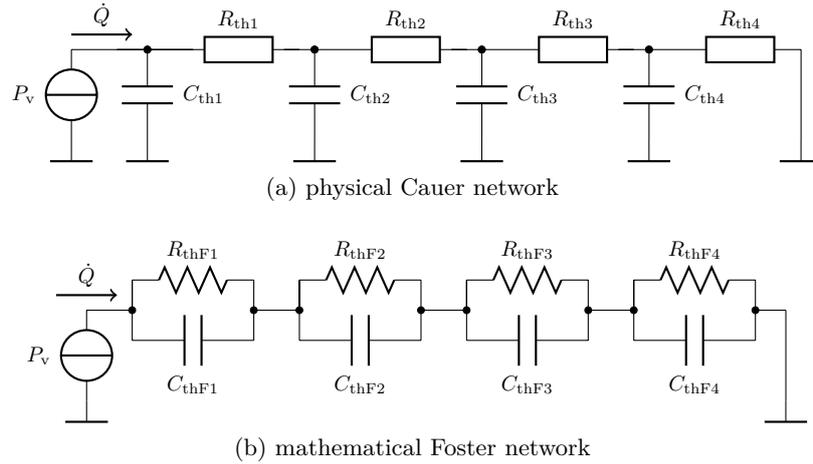


Figure 3.40: Thermal equivalent circuits to describe thermal impedance  $Z_{th}$

thermal resistance  $R_{th}$  or the saturation voltage  $U_{ce,sat}$  by 5 % to 20 % compared to the initial values at the start of the power cycling test.

From Figure 3.40 it can be concluded that changing one element in the thermal chain leads to different junction temperatures, which can be caused by die detach from metallisation or a growing crack in the ceramic. Observing the thermal impedance during power cycling tests promises a possibility to detect failure in thermal path pointing out the layer where the failure occurs. The challenge is to get knowledge of the physical network which maps the interfaces of the semiconductor module under test. That means, the question is how to evaluate a structure function to describe a physical network of the structure displayed in Figure 3.40a. This structure function can be retrieved using a weight function for deconvolution of the gradient of the measured thermal impedance to calculate a spectrum  $r_{th}(\tau)$ .

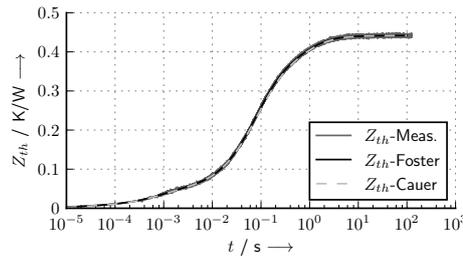
The drawback of this method is use of the derivation of thermal impedance, which is based on noisy measurement. Alternatively, an iterative solving algorithm is used. The advantage of this method is that no information due to any curve fitting is lost.

By setting up power semiconductors in standard configuration and connection technology for a standard power cycling test the approach of using an iterative algorithm is validated. Before the power cycling setup is started the thermal impedance of the unstressed module is measured. Figure 3.41a displays the results. As a first step the Foster network is evaluated using the iterative algorithm. For this a time-constant vector is defined which corresponds to the range of the measured time vector of thermal impedance and is divided logarithmically. The resulting spectrum  $r_{th}(\tau)$  in Figure 3.41b was calculated before the first power cycles. This spectrum contains 100 chain elements representing the Foster network. The corresponding Cauer network is calculated using a network transformation algorithm. The step response of both circuits is calculated for validation. In comparison to measured thermal impedance the results of the step responses for both equivalent circuits is equal as to be seen in Figure 3.41a.

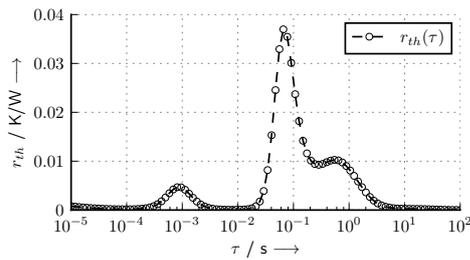
The Cauer network is used to calculate cumulated structure function which physically characterizes the measured thermal impedance path (see Figure 3.41c). The typical plateaus in the cumulated structure function (e. g. between  $\rho = 0.01 \frac{K}{W}$  to  $0.04 \frac{K}{W}$  or between  $\rho = 0.06 \frac{K}{W}$  to  $0.28 \frac{K}{W}$ ) describe the different layers and the differences of the plateaus on the  $y$ -axis returns the thermal capacity of the single layer. The derivation of the cumulated structure function is plotted as the differential structure function (see Figure 3.41c). Here, the local maxima describe the physical layer and their difference on  $x$ -axis returns the thermal resistances of the single layer within

the thermal path. That means moving on  $x$ -axis from left to right equals moving from chip to heatsink.

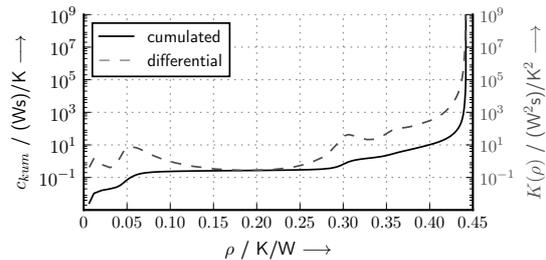
To illustrate the detection of failures the thermal impedance is periodically measured during test allowing to record changes in the thermal path. This can be shown not only in increasing thermal impedance curve but also in the differential function. If for example a failure in the metallisation and ceramic interface is growing the corresponding local maxima in the differential structure function will move right on the  $x$ -axis of Figure 3.41c. The local maxima right of the first moving maximum will also shift. That means that failure detection in thermal resistance becomes possible during power cycling. Also the layer in which failure occurs can be identified. To indicate the possibility of the failure location a failure separation is possible, too.



(a) Comparison of measured (Meas.) and calculated (Foster and Cauer) thermal impedance  $Z_{th,jh}$  from chip to heatsink



(b) Quasi continuous spectrum  $r_{th}(\tau)$  of thermal path from chip to heatsink



(c) Cumulated and differential structure functions calculated from Cauer network for a measured power semiconductor

To ensure a long life cycle and to prevent over dimensioning it is necessary to know the limits of the technology which is used. The presented method of thermal impedance spectroscopy is used to investigate the reliability of power semiconductor modules taking into account the active strain. In opposite to destructive methods, the presented method makes it possible to observe the progressive growth of failures during the active power cycling. It is also possible to determine the order in which the failures occur. Thus, the method returns the weakest point of the configuration which allows a specific optimization of the module. The results shown here illustrate that application of this method is useful in power electronic systems e. g. for distributed generation.

### Lastwechselfestigkeit von Leistungshalbleiterbauelementen mit geklebten Chips<sup>26</sup>

Die Aufbau- und Verbindungstechnik wird kontinuierlich weiterentwickelt. Eine Möglichkeit ist der hier vorgestellte Ansatz, die Lotschicht zur Kontaktierung der Chips (Dioden, IGBTs, MOSFETs) auf der Metallisierung durch den Einsatz von leitfähigen Klebstoffen zu ersetzen. Im Bereich

<sup>26</sup>von Dipl.-Ing. Folkhart Grieger und M. Sc. Lars Middelstädt

der Elektronik sind Klebstoffe mit elektrischer Leitfähigkeit bereits weit verbreitet. Das Kleben stellt einen beherrschbaren Prozess mit hoher Zuverlässigkeit und geringer Komplexität dar. Für die Untersuchung der Lastwechselfähigkeit von Verbindungen zwischen Chip und Metallisierung mit leitfähigem Kleber und standardmäßig gelöteten Chips in Abhängigkeit von der aktiven Belastung sind Module in ansonsten identischer Aufbau- und Verbindungstechnik als Testmuster (Devices Under Test — DUTs) aufgebaut worden.

Die DUTs sind als asymmetrische Halbbrücke aus Diode und IGBT umgesetzt, Abbildung 3.41. Die Verschaltung als asymmetrische Halbbrücke hat den Vorteil, dass die Chips unabhängig von der Funktion des jeweils anderen für Lastwechsel verwendet werden können. Die IGBT- und Diodenchips sind für 600 V Sperrspannung und 150 A Dauerstrom spezifiziert. Die elektrischen Pfade sind mit Alu-Bonds (300  $\mu\text{m}$ ) realisiert. Das Package besitzt keine Bodenplatte.

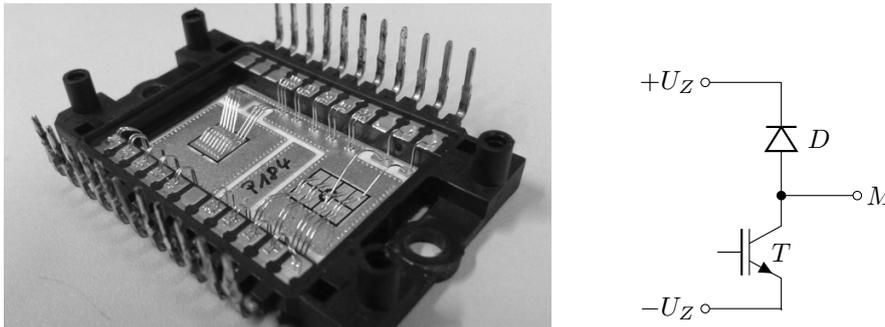


Abbildung 3.41: Aufbau und elektrische Konfiguration der Testmuster (DUT) für die Untersuchung der Lastwechselfestigkeit von Modulen mit leitfähigen Klebstoffen

Für die experimentellen Untersuchungen wird eine Testplattform verwendet, welche mit einem Echtzeitsystem (RTOS) für die Prozesssteuerung der aktiven Lastwechsel ausgestattet ist. Mittels eines FPGA werden die Spannungen an den DUT mit hoher zeitlicher Auflösung gemessen. Die Temperaturen des Kühlkörpers werden mit Thermoelementen gemessen, welche geometrisch unterhalb der Chips anzuordnen sind. Hierfür kommen Adapter zum Einsatz, auf welche die DUT aufgespannt und in welche die Thermoelemente eingelassen werden. Für die Lastwechsel werden die DUT in Serie verschaltet.

Die folgenden Betrachtungen für die Durchführung der Lastwechsel erfolgen für die in Tabelle 3.2 ausgewählten DUT. Die Parameter in Tabelle 3.3 werden als Zielparameter angesetzt, um die Lastwechsel mit den aufgespannten Dioden durchzuführen.

Tabelle 3.2: Technologien ausgewählter Testmuster (DUT)

Modul	Kontakt	Oberfläche	Metallisierung	Chip
L03	Lot		Cu	Diode
P82	Kleber 1		Cu	Diode
P88	Kleber 1		NiAu	Diode
P194	Kleber 2		NiAu	Diode

Tabelle 3.3: Parameter für die Durchführung der Lastwechsel

Parameter	$I_L$	$t_{\text{on}}$	$t_{\text{off}}$	$\vartheta_{\text{vj,min}}$	$\vartheta_{\text{vj,max}}$	$\Delta T_{\text{vj}}$
Wert	75 A	7 s	23 s	50 °C	130 °C	80 K

Als Größen zur Überwachung der Alterung der Module werden während der Lastwechsel die Durchlassspannung  $u_{\text{DF}}$  während der Einschaltphase und der thermische Widerstand  $R_{\text{th,jh}}$  vom

Chip zum Kühlkörper zum Abschaltzeitpunkt gemessen. In Abbildung 3.42a sind die gemessenen Verläufe der Durchlassspannungen für die Kombinationen in Tabelle 3.2 und die Parameter in Tabelle 3.3 dargestellt.

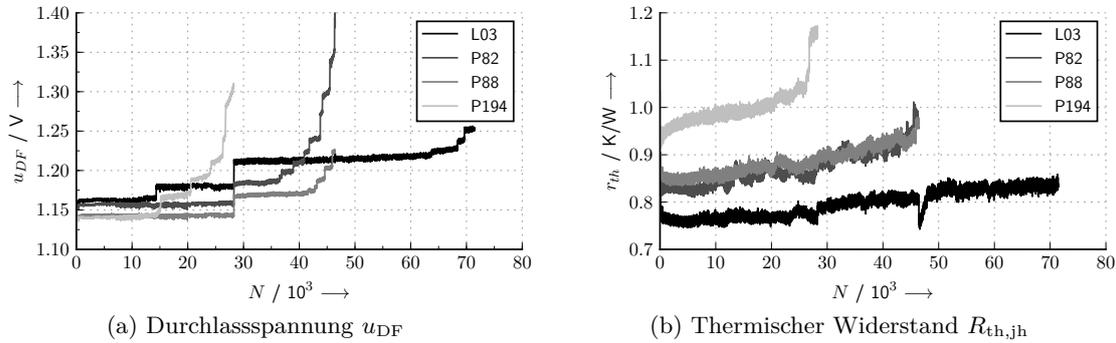


Abbildung 3.42: Überwachte Größen ausgewählter DUT während der Lastwechsel

Der Unterschied in den Durchlassspannungen ( $< 0,025 V$ ) zwischen gelöteten und geklebten Modulen zu Beginn der Lastwechsel ist vernachlässigbar. Bei ca. 28 000 Zyklen erfolgte aus technischen Gründen ein Wechsel des Stromrichters, weshalb hier in Folge eines leicht veränderten Laststroms  $I_L$  ein Sprung in den Durchlassspannungen zu erkennen ist. Die weiteren Sprünge in den Durchlassspannungen sind charakteristische Anzeichen für Bonddrahtabhebungen, bei denen sich der Widerstand im elektrischen Pfad sprunghaft ändert. Bei allen Modulen erfolgt eine Beschleunigung des Anstiegs der Durchlassspannung zum Lebensdauerende durch Sprünge in zeitlich kürzeren Abständen. Um eine Verschlechterung im thermischen Pfad zu detektieren, sind die thermischen Widerstände während der Lastwechsel bestimmt worden, dargestellt in Abbildung 3.42b.

Die thermischen Widerstände  $R_{th,jh}$  vom Chip zum Kühlkörper der unterschiedlichen Verbindungstechnologien unterscheiden sich bereits zu Beginn der Lastwechsel. Das Modul P194 weist mit  $0,95 \frac{K}{W}$  den schlechtesten Wert auf. Das gelötete Modul L03 hat den geringsten thermischen Widerstand mit  $0,78 \frac{K}{W}$ . Die beiden Module P82 und P88 unterscheiden sich im Aufbau nur durch die Oberfläche der Metallisierung (Tabelle 3.2) und haben einen vergleichbaren Startwert mit  $0,85 \frac{K}{W}$ . Die Sprünge der Durchlassspannungen sind in den Verläufen der thermischen Widerstände nicht zu finden. Dies bestätigt die Annahme der Bonddrahtabhebung. Dennoch steigt der thermische Widerstand aller Module leicht an im Verlauf der Lastwechsel. Bei den Modulen P194, P82 und P88 kommt es zu einem starken Anstieg des thermischen Widerstandes zum Ende der Lebensdauer. Durch Abheben mehrerer Bonddrähte ist zum einen die Wärmeabfuhr an die Kontaktschienen nicht mehr gegeben. Andererseits steigt die Verlustleistung durch den erhöhten elektrischen Widerstand, resultierend in einer erhöhten Chiptemperatur.

Aus den Lastwechseln ist die Tendenz zu erkennen, dass die Module mit gelöteten Verbindungen eine höhere Lastwechselfähigkeit gegenüber den Modulen mit geklebten Chips besitzen. Auch zwischen den einzelnen Klebstoffen ist ein Unterschied zu erkennen. So erreichen die Module mit Kleber 1 deutlich mehr Lastzyklen als das Modul mit Kleber 2. Ein Grund hierfür könnte der thermische Widerstand  $R_{th,jh}$  sein, welcher bei gleichem Laststrom  $I_L$ , gleicher Kühlkörpertemperatur  $T_h$  sowie nahezu gleicher Spannung  $u_{DF}$  zu einer höheren Sperrschichttemperatur  $T_{vj}$  und damit zu einer höher Belastung der Bonddrähte führt.

### Thermal Impedance: Computing the Necessary Number of Parameters for Rapid and Accurate Temperature Calculations<sup>27</sup>

An efficient method for rapid calculation of the temperature by means of the thermal impedance using the system control theory for model reduction is presented. The method reduces the total RC elements in a Foster or Cauer network such that sufficient accuracy and minimal number of RC elements are achieved simultaneously. Consequently the calculation time of junction temperature is reduced to a minimum. The method delivers a very good approximation and fast calculation of the junction temperature in comparison to the full characterization of the semiconductor's thermal system. Furthermore the method can be applied for use in both 1D- and 3D-temperature field calculations and therefore avoiding time consuming finite element simulations.

The thermal impedance is measured by state of the art procedures. Once the self-impedance or transimpedance have been measured, the calculations are made based on the following statement: The temperature increase of a semiconductor can be described by the convolution integral of the dissipated power and the derivative of the thermal impedance in the time domain as illustrated in Figure 3.43.

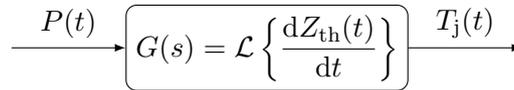


Figure 3.43: Thermal system

Therefore the transfer function results in:

$$G(s, n) = \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{1 + s \cdot \tau_i} \quad (3.1)$$

However in order to reduce the number of  $RC$  elements  $n$  to a minimum with acceptable accuracy the state space representation of the transfer function is favorable. Once all parameters have been extracted from the transfer function and inserted into the state space model the observability  $W_o$  and controllability  $W_c$  matrices can be evaluated.

By calculating the square roots from the eigenvalues of the product of both the observability and controllability  $W_{co} = W_c \cdot W_o$  matrices we obtain the Hankel Singular Values (HSV). These values specify the state energy of the system. The state value related to less state energy according to the Hankel Singular Values can be eliminated without modifying the system behaviour drastically. The resulting reduced state space model is then converted back to the transfer function formulation using Eq. (3.1).

For comparison power losses at a converter frequency of 10 kHz were fed into the models using the Cauer network representation, see Figure 3.44. The observed offset of the thermal impedance at  $n = 20$  with respect to  $n = 5$  is due to the lower number of samples at the moment of extraction from the plot given in the datasheet. Despite the deviation in Figure 3.45 the algorithm demonstrates high accuracy of the reduced system improving the computation time due to the lower number of state variables.

<sup>27</sup> von Dipl.-Ing. Jimmy Alexander Butrón Ccoa

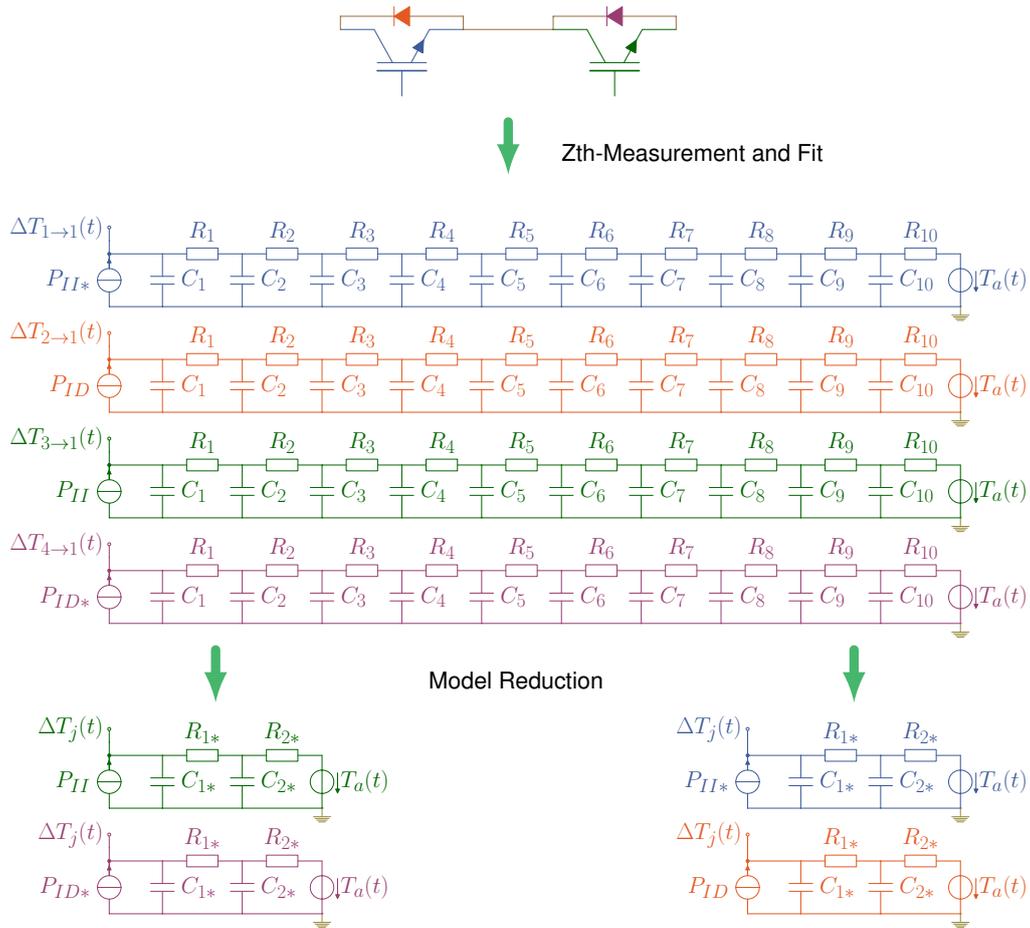


Figure 3.44: Stages of semiconductor thermal modeling with  $n = 10$  number of states for the self-impedance and transimpedances each. 1: Silicon, 2: Solder, 3: DCB, 4: Ceramic, 5: DCB, 6: System Solder, 7: Baseplate (Copper) 8: Thermal Interface Material (TIM), 9: Alluminium Alloy, 10: Heatsink.

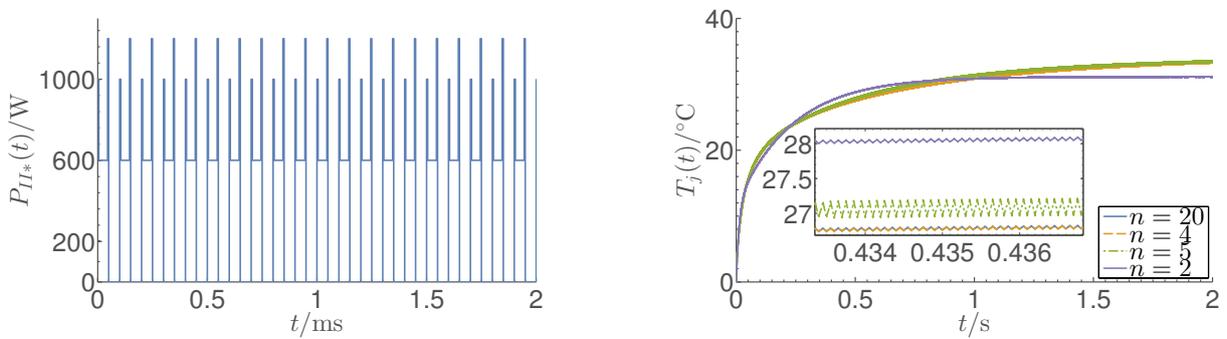


Figure 3.45: Temperature evolution at 10 kHz switching frequency and corresponding power losses

### Messung der Sperrschichttemperatur im Betrieb eines Antriebswechselrichters<sup>28</sup>

Antriebswechselrichter können beispielsweise in Fahrzeuganwendungen ausgeprägten Last- und Temperaturwechseln ausgesetzt sein, die für die Lebensdauer bestimmend sind. Eine Überwachung der Sperrschichttemperatur  $T_j$  der Leistungshalbleiter im Betrieb ist daher essentiell. Da jedoch eine direkte Messung von  $T_j$  im Allgemeinen nicht möglich ist, bedient man sich diverser indirekter Messverfahren, um auf Grundlage der jeweils erfassten Hilfsgrößen möglichst genau die Sperrschichttemperatur zu bestimmen. In diesem Beitrag wird die Integration einer Messschaltung in ein für elektromobile Anwendungen geeignetes Wechselrichtersystem beschrieben, um für jeden Leistungshalbleiterschalter des Wechselrichtermoduls die entsprechende Sperrschichttemperatur im Betrieb zu messen.

Bisherige Untersuchungen haben gezeigt, dass der temperatursensitive elektrische Parameter (TSEP) Schwellspannung  $V_{th}$  eines Leistungshalbleiterschalters für die indirekte Messung seiner Sperrschichttemperatur geeignet ist. Die Schwellspannung weist dabei eine nahezu lineare Temperaturabhängigkeit  $V_{th}(T_j)$  auf. Des Weiteren verhält sich dieser TSEP im getakteten Betrieb unabhängig von den übrigen physikalischen Prozessgrößen (Zwischenkreisspannung, Laststrom, ...) eines Umrichtersystems.

Die Messschaltung zur Erfassung der Schwellspannung sowie die Schaltung für eine BUS-basierten Übertragung der Messwerte werden additiv mit den entsprechenden Treibern der Leistungshalbleiterschalter verbunden. Innerhalb eines CAN-Knotens erfolgt daraufhin die Speisung beider Schaltkreise über die jeweilige Treiberversorgungsspannung. Die nachfolgende Abbildung stellt die Integration von 6 CAN-Knoten eines im dreiphasigen Zweipunkt-Umrichter umgesetzten Messsystems dar, mit dem die Sperrschichttemperatur jedes Leistungshalbleiterschalters im Antriebswechselrichter von der zentralen Ansteuereinheit abgefragt und ausgewertet werden kann.

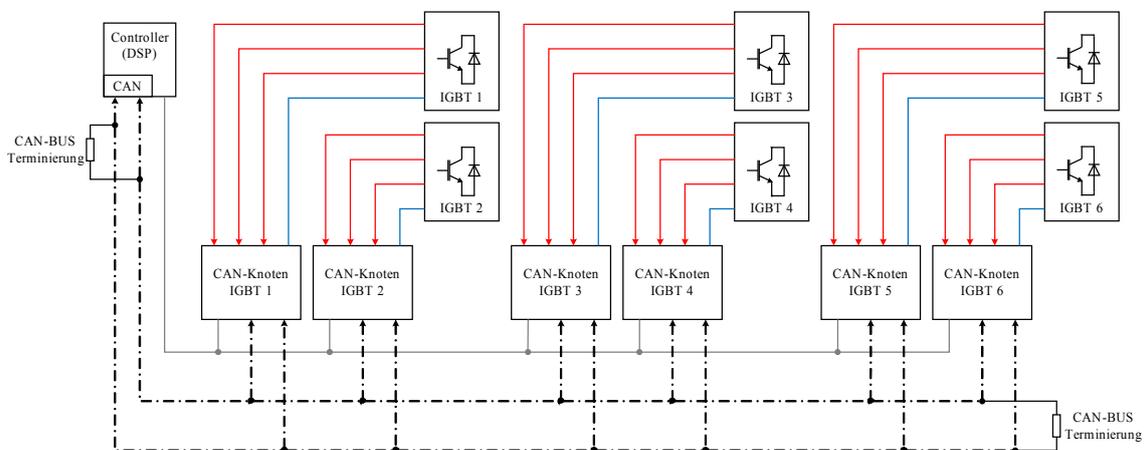


Abbildung 3.46: CAN-BUS-Struktur für die zentrale Erfassung der Sperrschichttemperaturen

### Einfluss parasitärer Elemente auf die gestrahlte Störaussendung eines Hochsetzstellers<sup>29</sup>

**Einleitung** Im Projekt wurde der Einfluss parasitärer Kapazitäten und Induktivitäten von diskreten, schnellschaltenden Leistungshalbleitern eines Hochsetzstellers auf dessen EMV-Charakteristik im hohen MHz-Bereich untersucht. Es ist bekannt, dass das Schaltverhalten von

<sup>28</sup> von Dipl.-Ing. Bastian Strauß

<sup>29</sup> von M. Sc. Lars Mittelstädt

Leistungshalbleitern als Quelle von EMV-Störaussendung definiert werden kann. Durch schnell-schaltende Leistungshalbleiter kommt es zum Ende des Ein- bzw. Ausschaltvorgangs häufig zu Oszillationen, die die EMV-Charakteristik zusätzlich erheblich beeinflussen können und sich direkt im Spektrum widerspiegeln, wie in Abb. 3.47 schematisch gezeigt. Durch die Analyse und Optimierung der transienten Schaltvorgänge im Zeitbereich ist eine gleichzeitige Optimierung der EMV ohne aufwändige Messungen im Fernfeld möglich. Zudem erlaubt diese Methode ein detaillierteres Verständnis der Entstehung und somit die Reduzierung der Oszillationen.

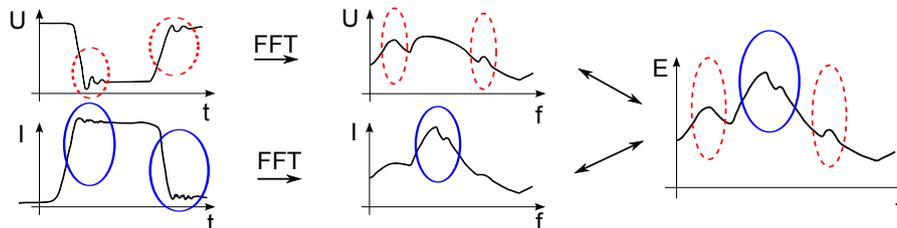


Abbildung 3.47: Schematische Korrelation zwischen Schaltverhalten im Zeitbereich und Fernfeldcharakteristik im Frequenzbereich

**Ergebnisse** Auf Grundlage dieser Methode wurde im Speziellen der Einfluss der parasitären Elemente der Leistungshalbleiter auf kritische Oszillationen in einem Hochsetzsteller untersucht. Es hat sich gezeigt, dass für eine Modellierung der Oszillationsfrequenz ein charakteristischer Schwingkreis aus Diode, MOSFET und Pufferkondensator aufgestellt werden kann. Hierbei wurde zwischen dem Ein- und dem Ausschalten unterschieden. Während des Einschaltens des MOSFETs kann dieser durch seine parasitäre Anschlussinduktivitäten und die ausgeschaltete Diode durch deren Sperrschichtkapazität beschrieben werden. Ist der MOSFET ausgeschaltet, leitet die Diode. Entsprechend verhält sich die Diode induktiv und der MOSFET kapazitiv. Die Gehäuse- und Anschlussinduktivitäten des MOSFET beeinflussen die Resonanzfrequenz demnach nur während des Einschaltens und zeigen keinen Einfluss auf die Ausschaltoszillation. Der Einfluss der MOSFET-Kapazitäten auf die Resonanzfrequenz wurde mittels externer Kondensatoren untersucht, welche direkt an die Gehäusepins des MOSFET gelötet wurden. Die Resonanzfrequenz wurde lediglich beim Ausschalten durch die Drain-Source-Kapazität beeinflusst.

Der Einfluss der parasitären Elemente auf die Oszillationsamplitude ist jedoch differenzierter zu betrachten. Vor allem die Gaterückwirkung der Source-Induktivität sowie die Gate-Drain-Kapazität bestimmen beim Einschalten die Oszillationsamplitude entscheidend. Durch das Hinzufügen von Kondensatoren bzw. durch das Variieren von Induktivitäten im Kommutierungskreis wird die Schaltgeschwindigkeit ebenfalls manipuliert, was wiederum die Oszillationsanregung verändert. Um den Einfluss der Flankensteilheit auf die Oszillationsamplitude zu minimieren, wurden unterschiedliche Konfigurationen aus Gate-Widerstand beim Ein- und Ausschalten, Gate-Source-Kapazität, Gate-Drain-Kapazität und Drain-Source-Kapazität gefunden, welche gleiche Schaltgeschwindigkeiten hervorrufen (siehe Tabelle 3.4).

Tabelle 3.4: Konfigurationen zur Untersuchung des Einflusses der Gatebeschaltung auf die EMV-Charakteristik im Fernfeld

Konfiguration	$C_{ds,ext}$	$C_{gs,ext}$	$C_{gd,ext}$	$R_{g,on}$	$R_{g,off}$
Config 1	0 pF	0 pF	0 pF	10 $\Omega$	10 $\Omega$
Config 2	0 pF	147 pF	20 pF	3,8 $\Omega$	4,8 $\Omega$
Config 3	57 pF	97 pF	0 pF	8,8 $\Omega$	8,3 $\Omega$

In Abb. 3.48 sind die Einschaltoszillationen für die 3 unterschiedlichen Konfigurationen abgebildet. Zu erkennen ist, dass gleiche Schaltgeschwindigkeiten zu unterschiedlichen Oszillationsamplituden führen können. Vor allem Konfiguration 2 führt zu einer erheblichen Reduzierung der Oszillation und damit zu einem verbesserten EMV-Verhalten. Abbildung 3.49 zeigt das Spektrum des untersuchten Hochsetzstellers im Fernfeld für die untersuchten Konfigurationen.

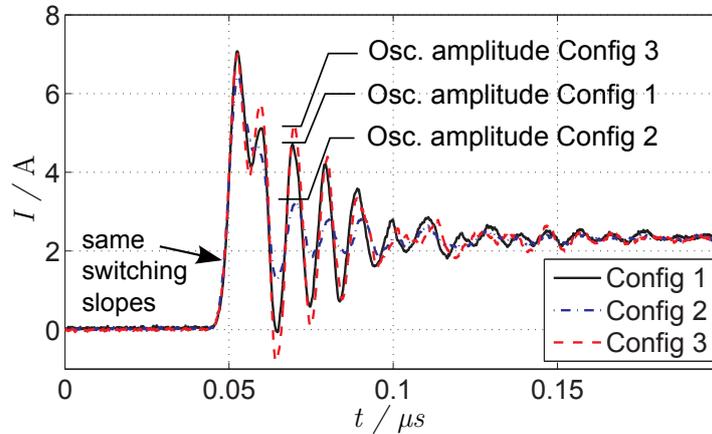


Abbildung 3.48: Oszillationsamplituden für unterschiedliche Gate-Beschaltungen bei gleicher Schaltgeschwindigkeit

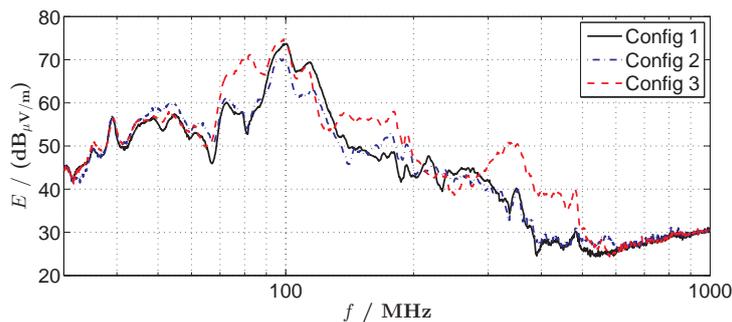


Abbildung 3.49: Ergebnisse der Fernfeldmessung der untersuchten Schaltung für unterschiedliche Gatekonfigurationen

Die Oszillationsfrequenz aus Abb. 3.48 liegt zwischen 100 MHz und 110 MHz. In Abb. 3.49 kann man für diesen Frequenzbereich eine deutliche Veränderung der Amplitude um fast zu 10 dB erkennen, was auf die stärker gedämpfte Oszillationsamplitude der Konfiguration 2 zurückzuführen ist. Die Störaussendung der Schaltung konnte entsprechend durch eine geeignete Gatebeschaltung reduziert werden, ohne die Schaltgeschwindigkeit zu reduzieren.

**Zusammenfassung** Es wurde gezeigt, dass die elektromagnetische Abstrahlcharakteristik eines Hochsetzstellers mit schnellschaltenden Halbleitern stark von den schaltbedingten Oszillationen beeinflusst wird. Entsprechend wurde eine Methode zur EMV-Optimierung genutzt, welche das Schaltverhalten im Zeitbereich untersucht und optimiert. Im Speziellen wurde der Einfluss der halbleiterbedingten parasitären Elemente auf die Oszillationen untersucht. Die Halbleiterkapazitäten beeinflussen die Resonanzfrequenzen lediglich, während der Halbleiter ausgeschaltet ist. Entgegengesetzt beeinflussen die Gehäuse- und Anschlussinduktivitäten die Resonanzfrequenzen lediglich, wenn sich der Halbleiter im eingeschalteten Zustand befindet.

Es ist möglich, durch geschickte Wahl der MOSFET-Kapazitäten und Gatewiderstände bei gleicher Schaltgeschwindigkeit kleinere Oszillationsamplituden zu erzeugen als mit ungünstigeren

Konfigurationen. Die Schaltgeschwindigkeit ist entsprechend nicht alleiniger Einflussfaktor auf die Oszillationsamplituden und eine EMV-Optimierung ist ohne eine Schaltverlustzunahme möglich.

### Einfluss der Lastkabelkonfiguration auf das Schaltverhalten von IGBTs<sup>30</sup>

Die negativen Einflüsse langer Kabel zwischen Umrichter und Elektromotor auf den Motor wurden in der Vergangenheit bereits untersucht und in der Literatur beschrieben. Die Effekte dieser Kabel auf die Schaltverluste blieben jedoch meist unbeachtet. Sie führen zu stark unterschiedlichen Schaltverluste im Vergleich zwischen Datenblattangaben und dem realen Aufbau.

Diese Arbeit konzentriert sich auf die Auswertung der Schaltenergien in einem dreiphasigen Umrichter als Funktion der Kabellänge. Hierbei werden die Ergebnisse eines vieradrigen, geschirmten Kabels mit den Ergebnissen ungeschirmter Einzelleitungen verglichen. Kritische Koppelpfade parasitärer Ströme werden definiert und analysiert.

Erste Messergebnisse zeigen, dass vor allem die große Kapazität zwischen dem Kabelschirm und der stromführenden Phase zu erhöhten Einschaltströmen führt. Die Ausschaltströme und somit die Ausschaltenergie wird hingegen reduziert. In der Summe kommt es jedoch zu einer erhöhten Gesamtschaltenergie für lange geschirmte Kabel. Tabelle 3.5 stellt die Schaltenergien in Abhängigkeit von der Kabellänge zusammen.

Tabelle 3.5: Schaltenergien in Abhängigkeit von der Länge des Kabels bei  $V_{cc} = 600\text{ V}$ ,  $I_c = 8\text{ A}$  und  $T_j = 25\text{ °C}$

Länge	$E_{on}/\text{mJ}$	$E_{off}/\text{mJ}$	$E_{all}/\text{mJ}$
2 m	0.82	0.38	1.20
5 m	0.94	0.37	1.31
10 m	1.06	0.34	1.40
23 m	1.26	0.28	1.54
50 m	1.38	0.22	1.60

Abbildung 3.50 zeigt schematisch den verwendeten Versuchsaufbau. Die blauen Pfeile markieren den Entladestrom der Schirm-Phase-Kapazität und die roten Pfeile den Aufladestrom der Phase-Phase-Kapazität. Die rote, blaue und grüne Linie kennzeichnet die Potentiale DC+, DC- und das wechselnde Potential der U-Phase.

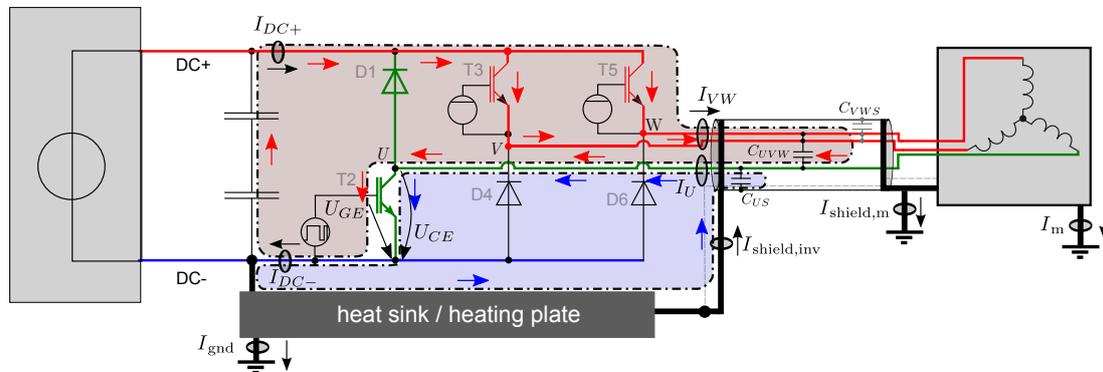


Abbildung 3.50: Parasitäre Koppelstrompfade während des Einschaltens von T2

<sup>30</sup> von M. Sc. Lars Middelstädt

Weiterführende Untersuchungen werden bereits beobachtete, kabelbedingte Effekte in Strom und Spannung genauer analysieren und beschreiben, um mögliche kritische Kabellängen in Abhängigkeit des Arbeitspunktes genauer zu definieren.

### Comparison of EMI behavior in inverter and buck-converter operation of power modules by considering the diode reverse recovery effects<sup>31</sup>

In the conducted EMI measurements, different to a three-phase inverter operating mode, the power modules are usually operated in a buck-converter mode to provide a simplified testing construction. However, such simplification has certain disadvantages. Measurement results show that although using the same measurement conditions (e. g. DC-link voltage, load current (RMS value), switching frequency . . . ), the measured EMI of a buck-converter operation are lower than the EMI of an inverter operation. The reasons for this deviation shall be investigated. The changing  $dv/dt$  at the middle point of a half-bridge ( $U_{AC}$ ) against GND is normally considered as a critical interference source of the common-mode EMI in power modules.

The measurement results indicate that there are two types of rising as well as falling edges at this point. The mechanisms of producing the edges with different slopes are explained as follows: The edge with the low  $dv/dt$  (blue) is produced by the normal free-wheeling process of the diode (Fig. 3.51 (left)), while the edge with the high  $dv/dt$  (red) comes due to the DRR (Diode Reverse Recovery effect) process (Fig. 3.51 (right)). In Fig. 3.51(right), when the HS (high side) switch is off, the LS (low side) diode is conducting the load current (status 1).

If the HS switch receives a gate signal and turns on again, the DRR of the LS diode occurs for a short while (status 2) and the load current commutates to the HS switch to flow continuously (status 3). During this transition from status 1 to 3, a steep edge is built up between the middle point of the bridge and the ground. The edge turns to be gentler, if the current commutates to the diode turning off the HS IGBT, which is illustrated in Fig. 3.51 (left). In status 6, the LS switch is driven by the gate signal and turns off. The load current is forced to flow through the HS diode of the same bridge (status 4) and causes a free-wheeling process. A relatively gentle edge of  $U_{AC}$ , compared with the situation in Fig. 3.51 (right), is built up thereby.

From the EMI point of view, these two types of edges are classified as critical (with high  $dv/dt$ ) and uncritical (with low  $dv/dt$ ). The buck-converter operation always includes one critical edge and one uncritical edge to build up a whole pulse in each switching period. The measurement results confirm that the  $dv/dt$  of the edge is not constant when the load current changes its value. Fig. 3.52 shows that the average  $dv/dt$  of the rising edge in  $U_{AC}$  under the DRR effects decreases when the load current of the system increases. On the other hand, the falling edge becomes more and more critical under high current. These changing slopes lead to different EMI spectrums (Fig. 3.52 right). The rising as well as falling edges dominate different frequency areas under different load currents. Therefore it is not possible to estimate the EMI worst-case if the load current remains unchanged.

The load current in buck-converter operation is almost constant. In contrast, as summarized in Fig. 3.53, the load current of inverter operation has sinusoidal shape: In areas 1 and 3, the turn-on edge dominates because of DRR and then leads to worse EMI performance in high frequency area; in area 2, the turn-off edge dominates because of high  $di/dt$  and then leads to higher spectrum in middle frequency area. It can be concluded that the EMI worst-case in inverter operation may differ from EMI in buck-converter operation with fixed current.

---

<sup>31</sup>von M. Sc. Yu Liu

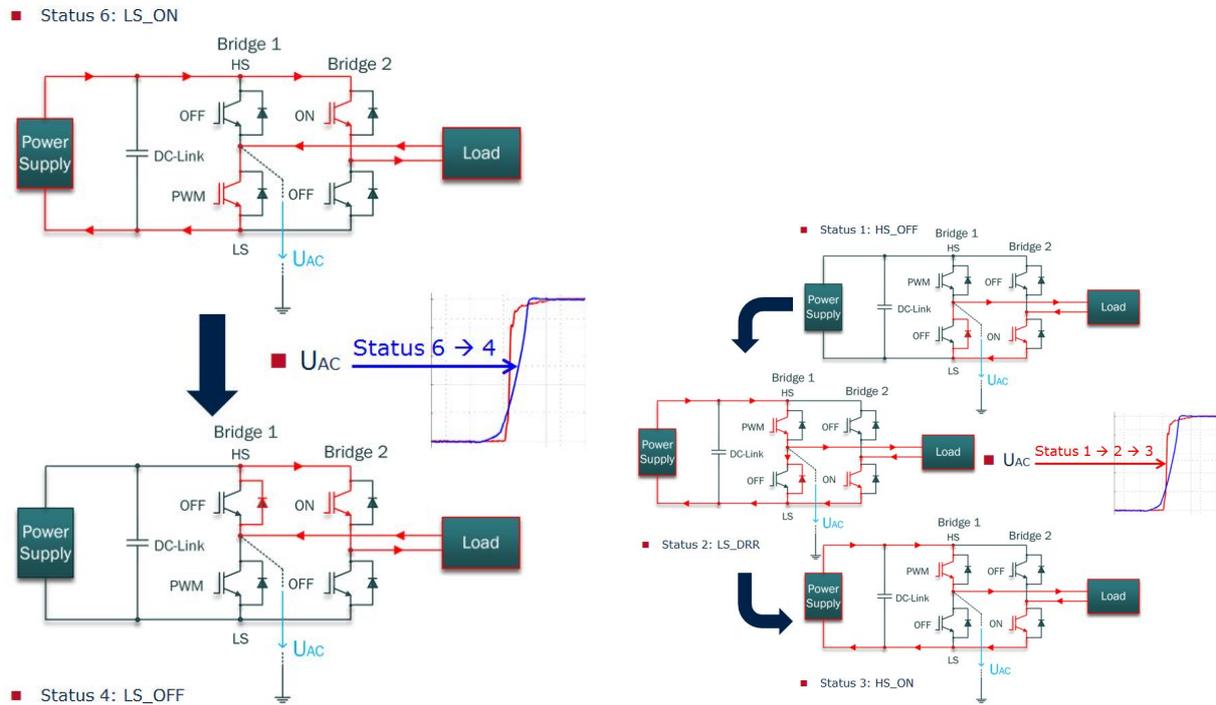


Figure 3.51: Mechanism of producing rising edge without DRR (left), Mechanism of producing rising edge with DRR (right)

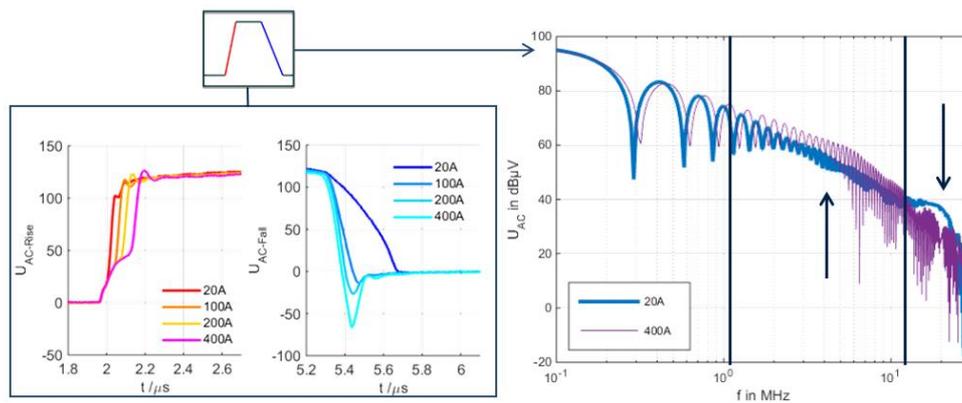


Figure 3.52: Artificial voltage pulses which are built up from measured rising and falling edges by different load current (left) and their FF-transformed spectrums (right)

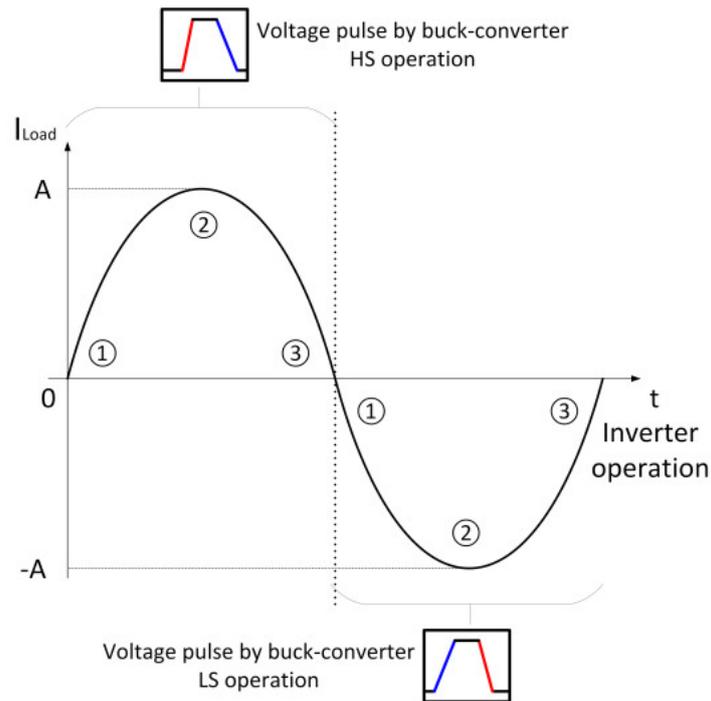


Figure 3.53: Dividing time areas by comparing the load current of inverter (sinusoidal) and the load currents of buck-converter (constant)

### Coordinated Control of VSC-HVDC Connected Offshore Windfarms for Enhanced Ability of Providing Synthetic Inertia<sup>32</sup>

In recent years, there is an ongoing growth in installations of offshore wind farms (OWFs) to meet renewable energy targets. About 8045 MW of offshore wind capacity was connected to the grid in Europe in 2014. For optimal integration of the offshore wind energy, voltage source converter based high voltage direct current transmission (VSC-HVDC) is regarded as a promising technology and a number of VSC-HVDC connected OWFs have been already commissioned in recent years. However, increasing installations of these power converter based OWFs may lead to a decline of power system inertia, since the kinetic energy of OWFs is decoupled by the power electronic converters in the OWF and in the VSC-HVDC system.

Take the system shown in Fig. 3.54 as an example, the onshore system will undergo a frequency dynamic when the switchable load  $L_2$  is suddenly removed. Since the frequency dynamic is mainly dominated by the system inertia before the primary control acts, larger power system inertia is helpful to stabilize the frequency and increase the opportunity for control systems to act when a sudden power imbalance occurs. However, system inertia may reduce owing to the large penetration of OWFs.

To increase the system inertia with the support of the VSC-HVDC system, the Inertia Emulation Control (INEC) controller has been proposed. As shown in the green dashed box in Fig. 3.54, the INEC controller will use the stored energy in the DC-link capacitors to provide fast change of active power while a frequency deviation is detected, which will result in variation of DC-link voltage. Consequently, only part of capacitor energy could be used for the purpose of synthetic inertia to keep the DC-link voltage within the normal range, so the provided synthetic inertia may be not satisfactory.

<sup>32</sup>von M. Sc Xudan Liu

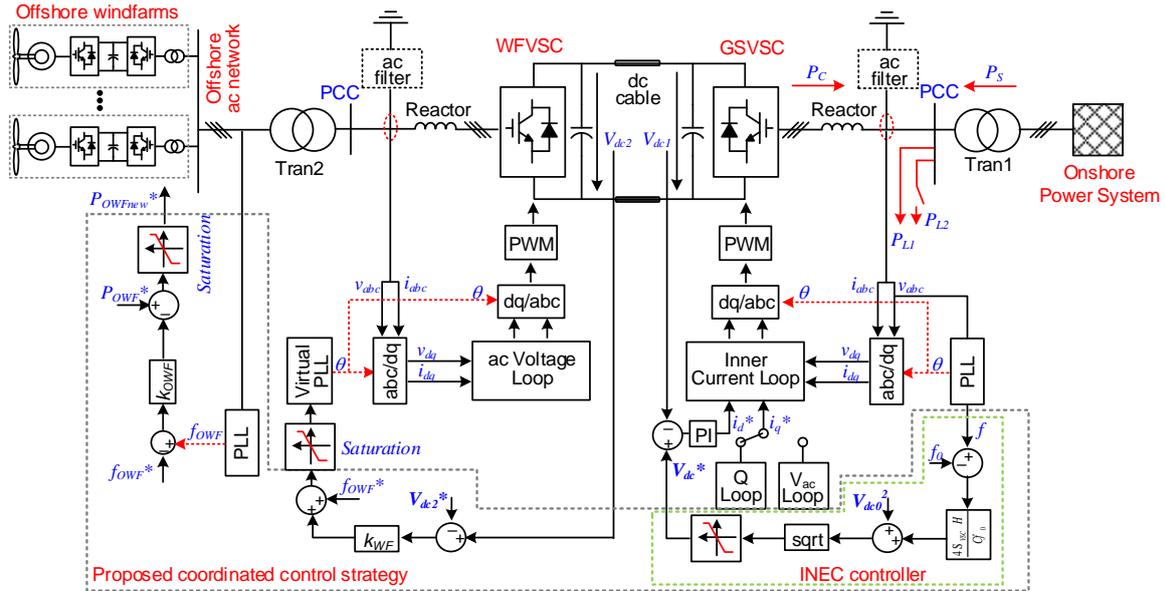


Figure 3.54: System outline and proposed coordinated control strategy

For increasing the synthetic inertia provided by the INEC controller, a coordinated control strategy for VSC-HVDC connected OWF is proposed, as shown in the black dashed box in Fig. 3.54. The OWF is used here to supply the fast active power change needed by the INEC controller, so the increase of the DC-link capacitors' volume could be avoided while larger synthetic inertia can be obtained. However, the OWF can not act to the frequency deviation of the onshore power system directly since it is decoupled from the onshore power system by the VSC-HVDC link.

Given that the DC-link voltage will change when the INEC controller is activated, it can be used to transfer the information of frequency dynamics to the offshore side by changing certain parameter of the offshore ac network, such as the frequency, the voltage and so on. In the study, a frequency droop is introduced in the WFVSC in response to the deviation of DC-link voltage. Accordingly, the frequency of the offshore ac network is modulated by the DC-link voltage deviation and reflects the onshore system frequency dynamic as a result. Similarly, the frequency deviation of the offshore ac network is used to modify the power or torque reference signal of the wind turbines.

With this signal chain built by the proposed coordinated control strategy, the frequency dynamic of the onshore power system can be transferred to the OWF. Therefore, the fast active power change needed by the INEC control can then be compensated by the OWF, which lead to the possibility to provide higher synthetic inertia while keeping the normal volume of the DC-link capacitors.

To verify the validity of the proposed strategy, simulation model of a three-terminal VSC-HVDC with two connected OWFs has been built within Matlab/Simulink, as shown in Fig. 3.56. An aggregated single-unit model has been applied to represent each OWF in the simulation, as the main studied objective is the interaction between the OWFs and the power system. To accelerate the simulation, the phasor model of power converter is used, in which only the fundamental frequency is considered. In the simulation model, the proposed coordinated control strategy was implemented in WFVSC2 and OWF2, while the conventional control strategy was applied in WFVSC1 and OWF1 as a comparison. A switchable load was disconnected from the onshore power system when  $t = 5$  s to create the frequency dynamics.

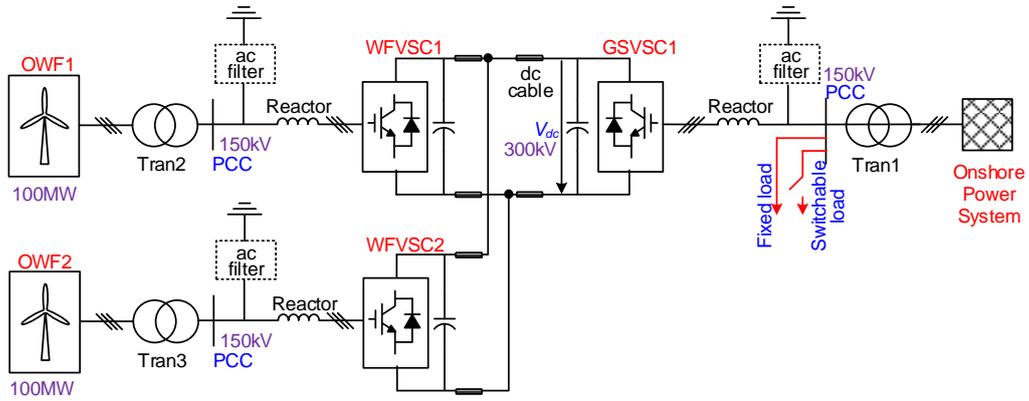


Figure 3.55: Simulated three-terminal VSC-HVDC connected OWFs

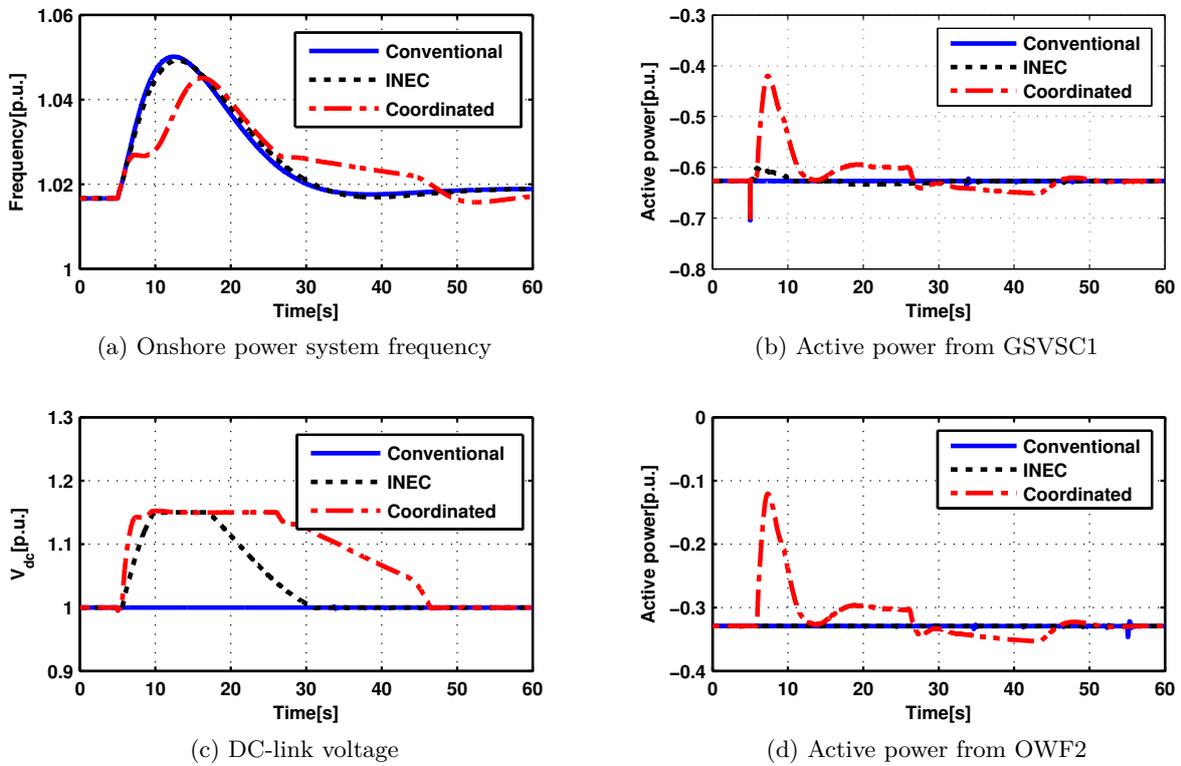


Figure 3.56: Simulation results with different strategies

Figure 3.56 shows the simulation results with different control strategies. When the switchable load is disconnected, the system frequency will increase rapidly with the conventional control as shown in Fig. 3.56a. It can be seen from Fig. 3.56b and 3.56c that the INEC control could reduce the injected active power by storing the energy in the DC-link capacitors. However, the changed active power is limited even when 1 mF DC-link capacitors are used. This is due to the limited stored energy in the DC-link capacitors. Moreover, to keep the stable operation of the system, the maximum permitted DC-link voltage deviation is limited to 15 % in the simulation, as shown in Fig. 3.56c. When the coordinated strategy is introduced, the OWF2 changes the active power out rapidly as shown in Fig. 3.56d. Thus, the change rate of the onshore system frequency could be limited effectively with 100  $\mu$ F DC-link capacitors. Consequently, the proposed coordinated control strategy can provide larger synthetic inertia with smaller volume of DC-link capacitors.

In conclusion, the proposed strategy could contribute more synthetic inertia with the support of OWFs and increase the possibility of the system to survive from large system frequency dynamic. The simulation results show that the proposed coordinated control strategy can provide larger synthetic inertia with smaller volume of DC-link capacitors.

### Entwicklung eines Mehrpunkt-Wechselrichters als Labormuster<sup>33</sup>

Durch den Einsatz leistungselektronischer Stellglieder mit geeigneten Regel- und Steuerverfahren können die Betriebskosten eines intelligenten Elektroantriebssystems reduziert werden. Hierzu trägt dessen reduzierter Energieverbrauch und mithin verbesserte Energieeffizienz maßgeblich bei.

Für den exemplarischen Aufbau eines dreiphasigen Dreipunkt-Umrichters in 3L-NPC-Topologie wurden drei IGBT-Module vom Typ F3L50R06 des Herstellers Infineon verwendet, die jeweils einen Brückenweig beinhalten. Mit einer speziell entwickelten Leiterplatte ist es möglich, einen sehr kompakten Aufbau zu realisieren, Abb. 3.57. Die Transistoren werden von einer zentralen, mikrorechnerbasierten Steuerung mittels modulierter Steuersignale geschaltet. Eine entsprechende Signalanpassung und Potenzialtrennung erfolgt dabei über die Treiberschaltungen.



Abbildung 3.57: Laboraufbau des dreiphasigen Mehrpunktumrichters

Die in Abb. 3.58 gezeigten Ergebnisse dokumentieren exemplarisch die Funktionsweise des Dreipunkt-Umrichters im Zusammenhang mit dem verwendeten Elektroantriebsstrang.

<sup>33</sup> von Dr.-Ing. Wolfgang Fischer und Dipl.-Ing. Bastian Strauß

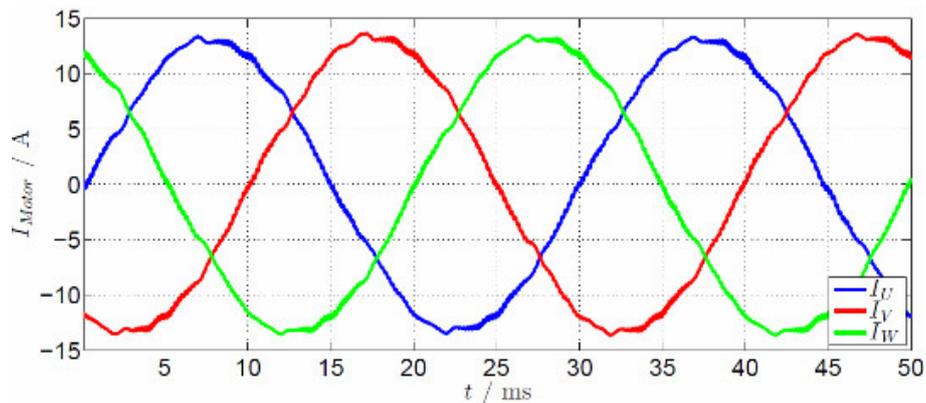


Abbildung 3.58: Gemessene Ausgangsströme des dreiphasigen Mehrpunktumrichters im Antriebssystem

### 3.4.3 Promotionen

#### **Dr.-Ing. Eva Katharina Beer: Antriebsumrichter mit Quasi-Impedanz-Zwischenkreis und Gleichspannungseinspeisung**

Gutachter:

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

verteidigt am 23. Januar 2015 an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

#### **Nicolae-Cristian Sintamarean, PhD: Reliability Oriented Circuit Design for Power Electronics Applications**

Supervisor:

- Prof. Frede Blaabjerg, Aalborg Universitet (DK)

Assessment Committee:

- Prof. Dezső Séra, Aalborg Universitet (DK)
- Prof. Maryam Saeedifard, Georgia Institute of Technology (USA)
- Prof. Dr.-Ing. Andreas Lindemann, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

verteidigt am 19. Juni 2015 an der Universität Aalborg (DK)

#### **Dr.-Ing. Erika Hauk: Investigation of a Predictive Loss Balancing Method for Three-Level Active Neutral Point Clamped Voltage Source Converter**

Gutachter:

- Prof. Dr.-Ing. Steffen Bernet, Technische Universität Dresden
- Prof. Dr.-Ing. Andreas Lindemann, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

verteidigt am 09. Juli 2015 an der Technischen Universität Dresden

### 3.4.4 Veröffentlichungen

#### Zeitschriften- und Konferenzbeiträge

- [1] L. Middelstädt und A. Lindemann, „Methodology for optimizing radiated EMI characteristics of power electronic circuits“, in *PCIM Europe 2015; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management; Proceedings of*, Mai 2015, S. 1–7.
- [2] B. Strauß und A. Lindemann, „Indirect measurement of junction temperature for condition monitoring of power semiconductor devices during operation“, in *PCIM 2015 Europe*, Nürnberg, Mai 2015.
- [3] J. B. Ccoa, G. Mitic und A. Lindemann, „Thermal impedance: Computing the necessary number of parameters for rapid and feasible temperature calculations“, in *PCIM Conference*, Nürnberg, Mai 2015.
- [4] X. Liu und A. Lindemann, „Coordinated control of VSC-HVDC connected offshore wind-farms for enhanced ability of providing synthetic inertia“, in *Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 2015 IEEE 6th International Symposium on*, IEEE, Aachen, Juni 2015, S. 1–6. DOI: 10.1109/PEDG.2015.7223081.
- [5] F. Grieger und A. Lindemann, „Thermal impedance spectroscopy for non-destructive evaluation of power cycling“, in *Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 2015 IEEE 6th International Symposium on*, IEEE, Aachen, Juni 2015, S. 173–178. DOI: 10.1109/PEDG.2015.7223021.
- [6] A. Lindemann, „Potential of wide bandgap semiconductors in power electronic applications“, in *Bodo's Power Systems, Nr. 06/2015*, Laboe: A Media, Juni 2015.
- [7] ———, „Von Halbleitern in der elektrischen Energietechnik – Bericht aus dem Fachbereich Q1 ‚Leistungselektronik und Systemintegration‘ der ETG“, in *Mitgliederinformation der Energietechnischen Gesellschaft im VDE (ETG)*, Frankfurt (M.), 2015.
- [8] L. Middelstädt, A. Lindemann, M. Al-Hamid und R. Vick, „Influence of parasitic elements on radiated emissions of a boost converter“, in *Electromagnetic Compatibility (EMC), 2015 IEEE International Symposium on*, Dresden, Aug. 2015, S. 755–760. DOI: 10.1109/IEMC.2015.7256258.
- [9] L. Middelstädt, S. Förster, R. Döbbelin und A. Lindemann, „Power electronics for an energy harvesting concept applied to magnetic resonance tomography“, in *Progress in Electromagnetic Research Symposium – PIERS*, Prag, Juli 2015.
- [10] R. Döbbelin, S. Förster und A. Lindemann, „Numerical field calculations for assessment of electric field strength arising in human body tissues caused by magnetic field exposure“, in *Progress in Electromagnetic Research Symposium – PIERS*, Prag, Juli 2015.
- [11] E. Möller, L. Middelstädt, F. Grieger, A. Lindemann und J. Wilde, „Investigation on the suitability of electrically conductive adhesives for the die-attachment of power devices“, in *20th European Microelectronics and Packaging Conference*, Friedrichshafen (Bodensee), Sep. 2015.
- [12] F. Grieger, L. Middelstädt und A. Lindemann, „Thermal spectroscopy for investigations of power cycling capability of power semiconductors with adhered chips“, in *12. Magdeburger Maschinenbautage*, Musterstadt, Sep. 2015.
- [13] E. Möller, L. Middelstädt, F. Grieger, A. Lindemann und J. Wilde, „Neue Entwicklungen von elektrisch leitfähigen Klebstoffen für die Anwendung in der Leistungselektronik“, in *Eingereicht für Plus, Fachzeitschrift für Aufbau- und Verbindungstechnik in der Elektronik – Produktion von Leiterplatten und Systemen*, Bad Saulgau: Leuze-Verlag, 2015.

### Dissertationen und Bücher

- [1] A. Lindemann, „Elektrotechnische Grundlagen/Leistungselektronik; Abschnitte 2.1/4.1“, in *Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs – Basiswissen*, H. Tschöke, Hrsg., Ser. ATZ/MTZ-Fachbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015, S. 20–25, 78–85, auch als eBook verfügbar, ISBN: 9783658046439. DOI: 10.1007/978-3-658-04644-6.

### Beiträge zu Kolloquien u. a. Vorträge

- [1] X. Liu, „Implementation and control of a small-scale HVDC lab prototype considering grid code requirements“, in *Kolloquium Leistungselektronik Nord*, Hannover, Mai 2015.
- [2] L. Middelstädt und A. Lindemann, „Untersuchung der Anwendbarkeit von leitfähigen Klebstoffen in der Leistungselektronik“, in *44. Kolloquium Halbleiter-Leistungsbaulemente und ihre systemtechnische Anwendung*, Freiburg i. Br., Okt. 2015.

## 3.5 Institutsebene

### 3.5.1 Kooperationen

#### Studienaufenthalte ausländischer Wissenschaftler am Institut

- M. Sc. T. V. Sokolnikova  
(Lehrstuhl Elektrische Netze und Erneuerbare Energie, 29.12.2014–30.01.2015, 20.05.2015–10.06.2015 und 23.09.2015–02.10.2015)
- Dr. K. V. Suslov  
(Lehrstuhl Elektrische Netze und Erneuerbare Energie, 12.03.2015–10.04.2015)
- Prof. Hans Helmut Zürn  
(Lehrstuhl Elektrische Netze und Erneuerbare Energie, 04.05.2015–15.06.2015)
- Caio Felipe de Paula Santos  
(Lehrstuhl Elektrische Netze und Erneuerbare Energie, 04.05.2015–04.07.2015)
- Jorge Mario Avella Ruiz  
(Lehrstuhl Elektrische Netze und Erneuerbare Energie, 04.05.2015–04.08.2015)
- Adriana Montero  
(Lehrstuhl Elektrische Netze und Erneuerbare Energie, 24.06.2015–22.09.2015)
- Ricardo de Avila Geisler  
(Lehrstuhl Elektrische Netze und Erneuerbare Energie, 01.09.2014–28.02.2015)
- Prof. Rubiapiara Calvacante Fernandes  
(Lehrstuhl Elektrische Netze und Erneuerbare Energie, 28.09.2015–08.10.2015)
- Prof. Samuel Luna de Abreu  
(Lehrstuhl Elektrische Netze und Erneuerbare Energie, 28.09.2015–08.10.2015)
- Mariana Nau  
(Lehrstuhl Elektrische Netze und Erneuerbare Energie, 03.10.2015–16.02.2016)
- Saulo Gomes Moreira  
(Lehrstuhl Elektrische Netze und Erneuerbare Energie, 25.10.2015–20.01.2016)
- Nadya Kalache  
(Lehrstuhl Elektrische Netze und Erneuerbare Energie, 25.10.2015–20.01.2016)
- Kemal Ibrahim Yassin  
(Lehrstuhl Elektrische Antriebssysteme, 31.01.2015–30.04.2015 und 01.10.2015 bis 31.12.2015)
- Dr. Mouloud Adli  
(Lehrstuhl Elektrische Antriebssysteme, 01.10.2015–15.10.2015)
- Milkias Berhanu Tuka  
(Lehrstuhl Elektrische Antriebssysteme, 15.10.2015–30.04.2016)

### 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
  - \* 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. Styczynski:
  - Mitgliedschaften und Gremien
    - \* VDE/ETG, IEEE, CIGRE, CRIS, ZERE, Mitglied
    - \* VDE-ETG V2 Elektrische Energienetze, Mitglied (seit 2004)
    - \* CIGRE TF C6.4.2 Smart Grid Benchmarks, Mitglied (2004-2012)
    - \* CIGRE SC 6 Dispersed Generation, Stellv. Vorsitzender DAK SC 6 (seit 2004)
    - \* EU European Technology Plattform Smart Grid – WG4 Generation and Storages, Mitglied (2005-2009)
    - \* ETG Life Needs Power, Mitglied (2006-2011)
    - \* ETG Task Force Smart Distribution, Mitglied (2007–2008)
    - \* CIGRE WG C6.15 Electric Energy Storage, Leiter (2008-2012)
    - \* ETG Task Force Demand Side Management, Leiter (2009-2012)
    - \* TU Wrocław, Beirat der Fakultät für Elektrotechnik (seit 2006)
    - \* ZERE e. V., Vorstandsvorsitzender (seit 2006)
    - \* FNN Mitglied des Lenkungskreises Mittel- und Niederspannung, Mitglied (2008-2015)
    - \* IEEE Subcommittee International Practices WG Europe, Leiter (2006-2009)
    - \* CRIS International Institute for Critical Infrastructures (Schweden/USA), (seit 2005), President (2011-2013)
    - \* Land Sachsen-Anhalt Plattformen: Elektrische Netze und Regenerative Energien, Mitglied (seit 2013)
    - \* Akademieprojekt „Energiesysteme der Zukunft“ – Fachgruppe DSM, Leiter (seit 2014)
  - Herausgeberschaft, Redaktion
    - \* MAgeburger FOrum zur Elektrotechnik, Co-Editor
    - \* European Transaction on Electrical Power (ETEP)
    - \* IEEE Transaction
    - \* Archives of Electrical Engineering, Polish Academy of Science
    - \* Tagungen: Power Tech , PSCC, LPQU, ETG, VDE
- 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
    - \* VDE
    - \* ETG FB2
    - \* BMWi AG Intelligente Netze und Zähler
    - \* BMWi AG Systemsicherheit

#### 3.5.3 Kolloquien

##### **6th ECPE SiC & GaN User Forum (Warwick, 20./21. April 2015) – Potential of Wide Bandgap Semiconductors in Power Electronic Applications: Report of Conclusions**<sup>34</sup>

**Overview** ECPE wide bandgap user forums have established as an international event where users – i. e., engineers developing advanced power electronic converters – and manufacturers of Silicon Carbide (SiC) and Gallium Nitride (GaN) devices meet biannually for a fruitful exchange. It recently was prepared in conjunction with a newly established ECPE SiC & GaN technical committee and hosted by University of Warwick (UK). The highest number of registrations ever showed the great interest of the community in this actual subject. Main technical focus has been on new developments with SiC and GaN transistors including system and circuit design or related aspects like packaging and parasitics. Renowned experts from 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 share experience and ideas, to show best practise of power electronic systems with of 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 exploit the high potential of those devices and to support their beneficial introduction in power electronic systems. Connected meetings of relevant research projects impressively complemented this aspect. The main topics of this year's ECPE wide bandgap user forum are summarised in the following:

---

<sup>34</sup>von Prof. Dr.-Ing. Andreas Lindemann

**State of the Art and Trends** SiC FETs are established as commercial products in the voltage range up to some 1200 V. Higher voltage classes have been successfully demonstrated and sampled; breakdown voltages above 10 kV might in future advantageously be covered by SiC IGBTs as already demonstrated. GaN transistors are competing SiC especially in the voltage range up to 1200 V with principally better characteristics, however typically as normally-on devices still with more constraints regarding reliability and robustness. Examples of cheaper GaN on Silicon (Si) and even better performing GaN on SiC devices and related applications have been shown, underlining the cost benefit for power electronics using a technology which is well established in radio frequency electronics. Packaging with low parasitics and potentially high temperature capability is a known issue with partially contradictory aims, e. g. regarding required creepage distances for high voltage components versus low parasitic inductance: Related issues are already addressed in industry, implementing evolutionary progress as has been shown with several examples of state-of-the-art packages, while research goes further proposing more sophisticated approaches for future generations.

Device and packaging technology directly determine robustness and reliability which is an ongoing research topic where important intermediate results have been shown with respect to SiC: There is a strong impact of device design e. g. on surge current or cosmic ray withstand capability, permitting to receive very rugged and reliable devices when properly designed; to prolong lifetime under power cycling conditions the higher thermal conductivity of the material needs to be taken into account, leading to a different temperature distribution and thus potentially even more thermo-mechanical stress. Robustness and reliability are further affected by the drivers which may include features like protection schemes – e. g. fast short-circuit protection – or control to achieve synchronous rectification, reducing SiC transistor’s bipolar reverse diode’s conduction time to a minimum and this way increasing efficiency. As contributions from industry and researchers impressively outlined, challenges in driver design result from the high voltage change rates achievable with wide bandgap devices, the partially low threshold voltages in particular of normally-off devices and last but not least potential high temperature operation in vicinity to the power semiconductors.

A major part of presentations has been dedicated to systems and circuits: Device cost versus system benefit is a known issue which has been generally addressed in a presentation and a dedicated forum discussion. Further contributions gave details about several applications: For automotive use, promising a high future production volume, an efficient power supply for LED lights with GaN transistors has been investigated, while in the higher power range a SiC traction converter has been demonstrated to achieve higher fuel efficiency and also miniaturise the converter. It has been impressive to see that even utility vehicles like a bus and light rail carriages have been equipped with SiC traction converters.

A wide range of nominal power is also covered by the presented power supplies, starting at low power domestic converters and reaching up to the discussed idea to equip converters for high voltage DC transmission in utility scale with SiC devices with high blocking voltages. In the latter case the modular multilevel converter (MMC) is a viable solution also with Si devices, so SiC can be expected to establish when feasible for the required high current ratings and offering the benefit of loss reduction, mainly referring to conduction losses because of the property of MMC to add the relatively low switching frequencies of its submodules to a resulting higher frequency. It was interesting to observe the introduction of SiC devices to industrial niche applications with special requirements, like pulsed power or induction heating applying high frequency resonant switching. In the latter case a cost benefit regarding investment in devices and energy losses during operation could be impressively demonstrated.

**Conclusion and Outlook** Power electronics is an enabling technology to increase energy efficiency, to feed electrical energy from renewable sources into the grid, for electromobility or also for control in any modern production environment. Wide bandgap devices and the related circuits and systems are a fascinating and rapidly evolving part of it as the aforementioned up-to-date contributions to ECPE wide bandgap user forum have impressively underlined. The issue is continuously followed up by the respective ECPE technical committee; an update about further progress in this area will further be available on the occasion of the next ECPE SiC & GaN User Forum.

### IEEE Workshop<sup>35</sup>

Am Montag, 28.09.2015 fand in Magdeburg ein gemeinsamer Workshop von IEEE und Otto-von-Guericke-Universität statt, wobei 70 hochkarätige Experten aus Forschung und Industrie über die Auswirkungen der Stilllegung konventioneller Erzeugung in den Übertragungsnetzen auf die Systemstabilität und die Versorgungssicherheit diskutierten (Abbildung 3.59). Diese Thematik ist insbesondere vor dem Hintergrund der jüngsten Stilllegungsankündigungen der deutschen Kraftwerksbetreiber besonders brisant.

Mit der schwindenden konventionellen Erzeugung geht eine deutliche Verstärkung in der Netzdynamik einher. Prof. Wolter von der Otto-von-Guericke-Universität erläutert, dass dezentrale, leistungselektronisch angeschlossene Erzeuger die stabilisierenden Eigenschaften großer Kraftwerksgeneratoren nur eingeschränkt ersetzen können. Erschwerend kommt hinzu, dass diese in den unteren Spannungsebenen angeschlossenen Erzeuger oft aufgrund fehlender Messtechnik nicht überwacht und gesteuert werden können. Auf dem Workshop wurden Lösungsansätze erarbeitet, wie die Netzbetreiber in dieser unübersichtlichen Situation ihre Netze weiterhin stabil und sicher betreiben können. Im Ergebnis stufen die Teilnehmer die zu erwartenden Herausforderungen aber als lösbar ein, wenn alle beteiligten Player zusammenarbeiten.



Abbildung 3.59: Die Referenten des Workshops in der Diskussion mit dem Auditorium

---

<sup>35</sup> von Prof. Dr.-Ing. Martin Wolter

### Dresdener Kreis 2015<sup>36</sup>

Der Dresdener Kreis ist ein gemeinsames Kolloquium der Universitäten Hannover, Dresden, Duisburg-Essen und Magdeburg und fördert die Zusammenarbeit und den wissenschaftlichen Austausch. Die Wissenschaftlichen Mitarbeiter bekommen dabei die Möglichkeit, sich mit anderen Doktoranden über Forschungsschwerpunkte auszutauschen und aktuelle Ergebnisse zu präsentieren.

Im Rahmen dieses Projektes wurde in diesem Jahr ein gemeinsames Kolloquium von der Universität Hannover organisiert. Das Kolloquium fand am 25.03. in Hannover statt und wurde durch verschiedene Fachvorträge zum Thema der Energietechnik im Museum für Energiegeschichte eingeleitet. Unter den Fachvorträgen befanden sich auch zwei Beiträge zu den Forschungsergebnissen des LENA. Zum einen Frau M. Sc. I. Chychykina mit der Präsentation zu „Vermeidung von Instabilitäten in den Stromnetzen durch Online Dynamic Security Assessment“ und zum anderen Herr Dipl.-Ing. M. Wenske mit dem Thema „Entwicklung und Validierung eines Brennstoffzellen USV-Systems“.

Den Abschluss des ersten der zwei Kolloquientage bildete eine gemeinsame Abendveranstaltung mit Restaurantbesuch und anschließender Nachtwächterführung durch die Altstadt von Hannover. Am zweiten Tag wurde eine Besichtigung des Kabelherstellers „Nexans“ organisiert (siehe Abbildung 3.60) und abschließend eine Führung durch das neue Rathaus in Hannover unternommen.



Abbildung 3.60: Besuch beim Kabelhersteller *Nexans* im Rahmen des Dresdner Kreises

### Pressemitteilung: Mitteldeutsche Wissenschaftler entwickeln mit Siemens Dynamische Leitwarte für intelligentes Netzmanagement<sup>37</sup>

Zum Start des Forschungsprojektes „DynaGridCenter“ fand am 1. Oktober 2015 im Beisein der Staatssekretärin aus dem Ministerium für Wissenschaft und Wirtschaft des Landes Sachsen-Anhalt, Dr. Tamara Zieschang, und Vertretern aller Kooperationspartner an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg eine Auftakt-Veranstaltung statt.

In Mitteldeutschland entsteht ein einzigartiges Versuchslabor, in dem Wissenschaftler die Herausforderungen im Hochspannungsnetz der Zukunft simulieren und erforschen können. Universitäten

<sup>36</sup> von Dipl.-Ing. Michael Wenske

<sup>37</sup> Ansprechpartner: Prof. Dr.- Ing. Andreas Lindemann, Dekan der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

aus Sachsen-Anhalt und Thüringen entwickeln gemeinsam mit der Siemens AG in den nächsten drei Jahren Steuerungs- und Regelungstechnologien, die das deutsche Strom-Transportnetz auf die Anforderungen der Energiewende vorbereiten (siehe Abbildung 3.61).

Die Prozesse im Netz werden durch die zunehmende Einspeisung von Wind- und Sonnenenergie sowie durch den daraus resultierenden Transport über weite Strecken wesentlich komplexer und dynamischer. Es ist Experten zufolge absehbar, dass die heutigen Mechanismen zur Beobachtung und Steuerung den künftigen Anforderungen nicht mehr genügen werden.

Ein wesentlicher Schwerpunkt des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie mit rund fünf Millionen Euro unterstützten Forschungsprojektes sind so genannte Smart Grids, intelligente Stromnetze für eine effiziente Energieversorgung. Sie vernetzen, steuern und überwachen Stromerzeuger, Stromspeicher, Verteilungsnetze und Verbraucher. Smart Grids können beispielsweise innerhalb von Hundertstelsekunden Störungen durch Blitzschläge, Baggerbiss, Vögel oder Kurzschlüsse identifizieren und darauf reagieren.

Das an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg bereits bestehende Smart-Grid-Labor wird deshalb in das neue Forschungsprojekt einbezogen. „Windenergie wird hauptsächlich in Norddeutschland ins Netz eingespeist, Ballungsgebiete mit hohem Stromverbrauch liegen vielfach im Süden“, so Prof. Andreas Lindemann, Dekan der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Universität Magdeburg. „Unsere Arbeiten haben zum Ziel, dass die elektrische Energie den optimalen Weg durchs Netz nimmt und die Verbraucher bedarfsgerecht aus erneuerbaren Quellen versorgt werden. So arbeiten wir an der Universität Magdeburg erfolgreich an Zukunftsthemen für die elektrische Energieversorgung.“

An der Technischen Universität Ilmenau wird im Rahmen des Projekts eine dynamische Netzleitwarte entstehen, die das simulierte Magdeburger Hochspannungsnetz aus der Ferne überwacht, steuert und das intelligente Datenmanagement übernimmt.

Spezialisten für Regeltechnik und Leistungselektronik von der Ruhr-Universität Bochum arbeiten im Projekt ebenso mit wie Forscher der Fraunhofer Institute Magdeburg (Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF) sowie Ilmenau (Angewandte Systemtechnik IOSB-AST). Sie bringen ihr Know-how unter anderem für den Aufbau einer zukunftssicheren, automatisierten IT- und Kommunikationsinfrastruktur in der Stationstechnik und dem gesamten Energieleitsystem ein. „Die Automatisierung ist nur mit standardisierten, gesicherten Schnittstellen und Datenformaten möglich. Das ist unser Forschungsauftrag im DynaGrid-Projekt“, erklärt Dr.-Ing. Przemyslaw Komarnicki vom Fraunhofer IFF. Siemens als Anbieter eines umfassenden Portfolios für den gesamten Hochspannungsbereich wird die Forschung koordinieren.

Das DynaGridCenter beinhalte aber nicht nur den Aufbau des über zwei Bundesländer verteilten Demonstrators, so der Siemens-Projektleiter, Prof. Rainer Krebs. „In Mitteldeutschland haben wir international anerkannte Experten für die Lösung dieser spezifischen Herausforderungen beim Umbau unseres Energieversorgungssystems. Unser Ziel ist es, hier ein dauerhaftes Forschernetzwerk zur gemeinsamen Weiterentwicklung von Hochtechnologien zu etablieren.“

„Der Schwerpunkt der Energiewende in Deutschland liegt auf nachhaltigen Energiesystemen. Doch müssen diese stabil und zuverlässig arbeiten. Das Verbundprojekt ‚Dynamische Leitwarte‘ ist in Mitteldeutschland bestens platziert und beginnt zum richtigen Zeitpunkt“, sagt Staatssekretärin Dr. Tamara Zieschang.



Abbildung 3.61: v.l. Prof. A. Lindemann, Prof. M. Wolter, Dr. P. Komarnicki, Prof. R. Krebs

### PowerTech Eindhoven 2015<sup>38</sup>

PowerTech ist eine sehr wichtige Konferenz der IEEE Power & Energy Society in Europa. Die PowerTech Konferenz 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 Technischen Universität Eindhoven, Niederlande zwischen dem 29. Juni und 2. Juli stattgefunden. Im Rahmen einer Poster-Session (siehe Abbildung 3.62) wurden auch zwei Papers zu den Forschungsergebnissen des LENA präsentiert, zum einen von Frau M. Sc. I. Chychykina mit dem Thema „Power System Instability Prevention and Remedial Measures with Online Dynamic Security Assessment“ und zum anderen von Herrn M. Sc. C. Klabunde mit dem Poster „Use of Energy Storage Systems in Low Voltage Networks with High Photovoltaic System Penetration“.

### IEEE PES General Meeting 2015 in Denver, CO (USA)<sup>39</sup>

In diesem Jahr fand das IEEE General Meeting der Power & Energy Society (PES) in Denver, Colorado (USA) statt. Vom 26. bis 30. Juli 2015 versammelten sich auf der weltweit größten Konferenz für Elektro- und Energietechniker namhafte Universitäten, Repräsentanten aus der Industrie und Gäste aus der ganzen Welt, um einen Einblick in die neuesten Forschungen zu bekommen. Als Veranstaltungshotel wurde das Sheraton Denver Downtown Hotel ausgewählt.

Das LENA-Team wurde zusammen mit dem Fraunhofer IFF (Abteilung PAT) repräsentiert durch:

- Herrn Prof. Martin Wolter
- Frau Prof. Antje Orths
- Herrn Dr. Przemyslaw Komarnicki
- Herrn Dr. Andre Naumann,

<sup>38</sup> von M. Sc. Iryna Chychykina

<sup>39</sup> von M. Sc. Christian Klabunde

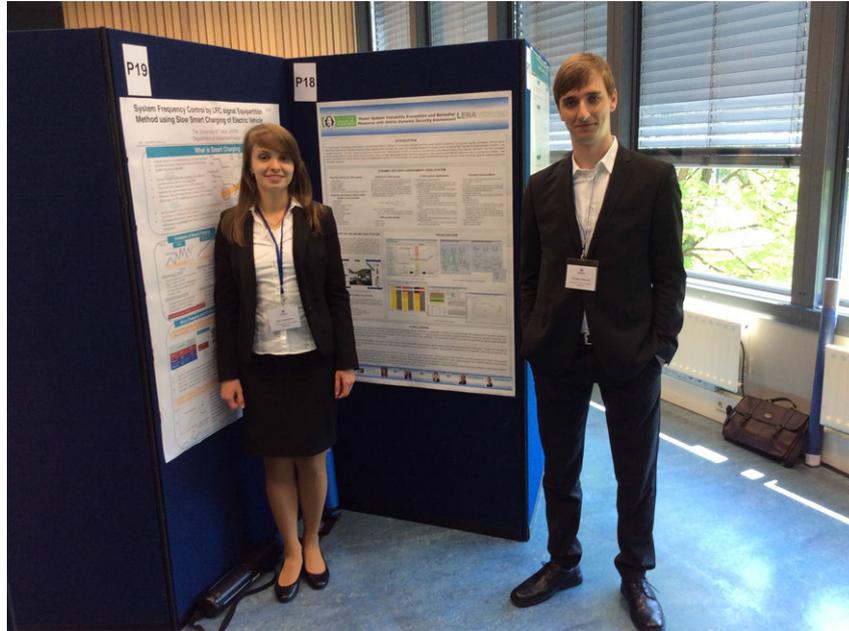


Abbildung 3.62: Poster-Session bei der PowerTech Eindhoven 2015



Abbildung 3.63: Vortrag von Herrn M.Sc. Christian Klabunde

- Herrn Dr. Pio Lombardi und
- Herrn Christian Klabunde

Als Organisator bzw. Co-Organisator von insgesamt 3 Sessions wurden innerhalb dieser zusammen mit der Technischen Universität Ilmenau und der Firma Siemens individuelle und auch gemeinsame Ergebnisse der Forschung präsentiert.

Folgende Beiträge wurden in diesem Jahr von Seiten des LENA beigesteuert:

- M. Wolter: „Impact of HVDC on System Security and Stability“, Präsentation in der Panel Session „HVDC Grids – The European Perspective“
- M. Wolter, E. Habermann: „Ensuring Transmission System Security Even During Highest Fluctuating Renewable Infeeds“, Präsentation in der Panel Session „Transmission System Security and Blackout Prevention“
- I. Bielchev, M. Richter, M. Banka, P. Trojan, Z.A. Styczynski, A. Naumann, P. Komarnicki: „Dynamic Distribution Grid Management Through the Coordination of Decentralized Power Units“, Posterpräsentation und Präsentation in der Session „Distributed Energy Resources and Demand Response“ (präsentiert von A. Naumann)
- C. Klabunde, N. Moskalenko, P. Lombardi, P. Komarnicki, Z.A. Styczynski: „Optimal onshore wind power integration supported by local Energy Storages“, Posterpräsentation und Präsentation in der Panel Session „Impact of Green Generation on Power Systems“

### **ETG-Kongress 2015 – Die Energiewende<sup>40</sup>**

Der ETG-Kongress ist eine der wichtigsten Energietechnikkonferenzen in Deutschland und wird alle zwei Jahre vom VDE organisiert. Zwei Tage lang wurden vom 17.11.–18.11.2015 in vier Fachtagungen über Trends, Neuerungen und Forschungsansätze in der Energietechnik im alten Bundestag in Bonn diskutiert. Die diesjährigen Themen bezogen sich auf Systemaspekte, Technologie & Komponenten, Markt & regulatorisches Umfeld sowie auf Referenzprojekte.

Im Einzelnen Schwerpunkte lauteten wie folgt:

#### 1. Systemaspekte

- Betrieb von komplexen Systemen
- Dispatching
- Interaktion von verschiedenen Energiesystemen
- Strom, Gas, Heizen/Kühlen
- Energieverbrauch

#### 2. Technologie & Komponenten

- Kraftwerke
- Speicheranlagen
- HS/MS/NS-Netze
- Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT)

#### 3. Markt & regulatorisches Umfeld

- Märkte
- Marktakteure
- Standards und Vorschriften

---

<sup>40</sup>von M. Sc. André Richter

### 3 Forschung

- Leistungselektronik

#### 4. Referenzprojekte

- Leuchtturmprojekte
- Technische Referenzprojekte

Der LENA wurde dieses Jahr vertreten durch Prof. M. Wolter, Prof. Styczynski, Dr.-Ing I. Hauer und A. Richter. Frau Dr.-Ing. I. Hauer (siehe Abbildung 3.64) bekam den „VDE/ETG-Literaturpreis 2015“ in Anerkennung ihrer herausragenden technisch/wissenschaftlichen Veröffentlichung verliehen. Sie erhielt diese Auszeichnung für ihre Dissertation mit dem Thema „A probabilistic load shedding concept considering highly volatile local generation“. Herr A. Richter stellte sein eingereichtes Konferenzpaper mit dem Titel „Transformer suitability for a successful load shedding in the TSO control area“ in Form eines Posters vor.



Abbildung 3.64: Frau Dr.-Ing. Ines Hauer zum Auftakt des ETG-Kongresses 2015 in Bonn