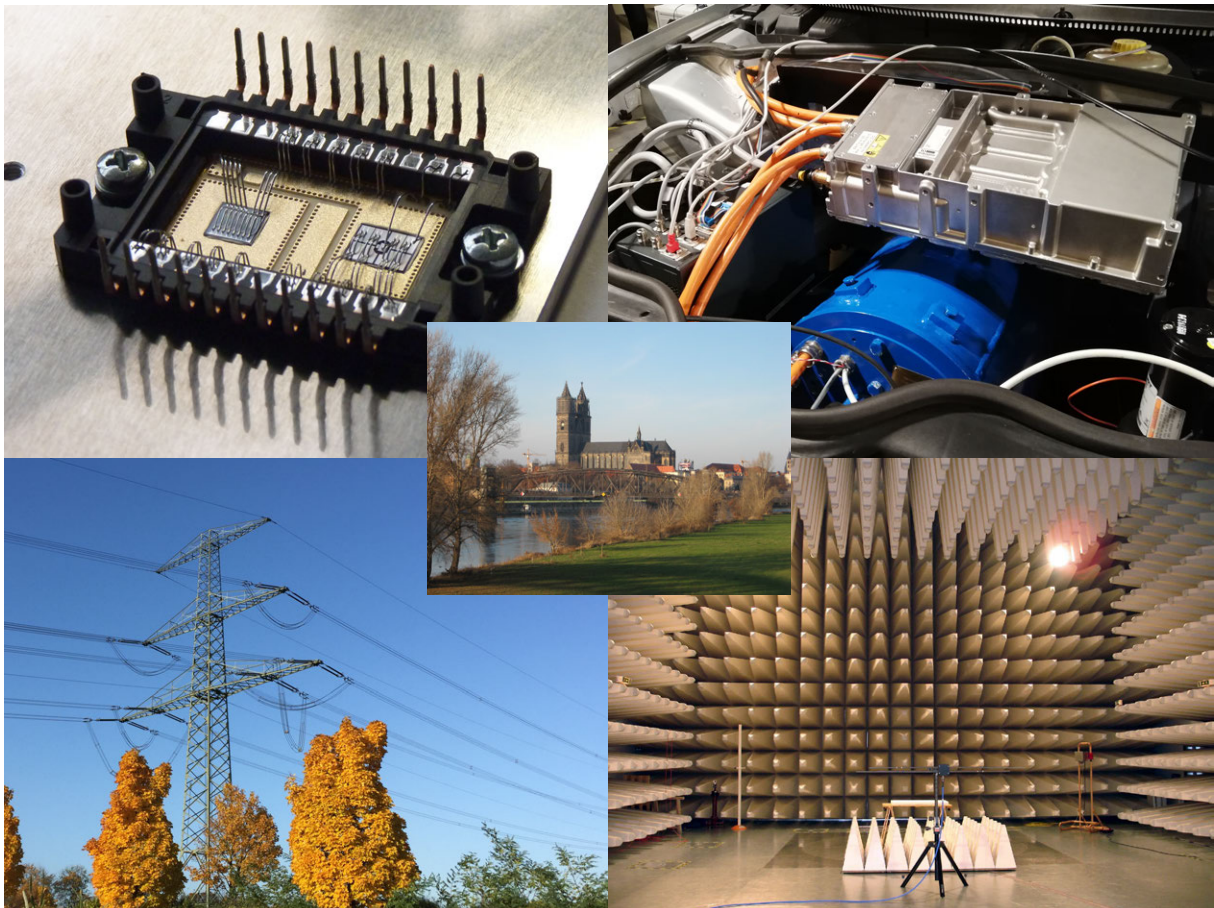


Jahresbericht 2021

der Lehrstühle für

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



OTTO VON GUERICKE
UNIVERSITÄT
MAGDEBURG

FAKULTÄT FÜR
ELEKTROTECHNIK UND
INFORMATIONSTECHNIK

Anschrift

Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Universitätsplatz 2 Postfach 4120
39106 Magdeburg 39016 Magdeburg

Sekretariate

- Lehrstuhl für Elektrische Antriebssysteme

Frau Wohner

Gebäude 03 – Raum 129 E-Mail andrea.wohner@ovgu.de
Telefon (0391) 67-58596 Telefax (0391) 67-42481

- Lehrstuhl Elektrische Netze und Erneuerbare Energie und
Lehrstuhl für Leistungselektronik

Frau Baumgarten

Gebäude 09 – Raum 124
Telefon (0391) 67-58592

E-Mail melanie.baumgarten@ovgu.de
Telefax (0391) 67-42408

- Lehrstuhl für Elektromagnetische Verträglichkeit

Frau Morscheck

Gebäude 09 – Raum 226
Telefon (0391) 67-58868

URLs

- Lehrstuhl für Elektrische Antriebssysteme
<http://www.iesy.ovgu.de/Lehrstühle/Elektrische+Antriebssysteme>
- Lehrstuhl Elektrische Netze und Erneuerbare Energie
<http://www.lena.ovgu.de>
- Lehrstuhl für Leistungselektronik
<http://www.ovgu.de/llge>
- Lehrstuhl für Elektromagnetische Verträglichkeit
<http://www.emv.ovgu.de>

Vorwort

Sehr geehrte Leserinnen und Leser,

ein weiteres Corona-Jahr neigt sich dem Ende zu. Nach nun fast eineinhalb Jahren Online-Vorlesungen, Lockdown und virtuellen Treffen ist es umso erfreulicher, seit dem Beginn des Wintersemesters zumindest vorerst wieder in einem Hörsaal zu lehren und zu lernen. Auch 2021 möchten wir Ihnen wieder unseren Jahresbericht überreichen, mit dem wir in gewohnter Weise über die neuesten Entwicklungen, Lehrveranstaltungen und Forschungsaktivitäten an den Lehrstühlen für „Elektrische Antriebssysteme“, „Elektrische Netze und Erneuerbare Energie“, „Leistungselektronik“ und „Elektromagnetische Verträglichkeit“ informieren.

Auch in diesem Jahr haben wir in zahlreichen Forschungsprojekten Antworten auf die vielfältigen, drängenden Fragen der Energietechnik finden können. Neben den bereits laufenden großen Forschungsprojekten wie z. B. ILEP oder RE-FLEX konnte unter anderem das BMWi-Projekt GridBatt gestartet werden, an dem die Lehrstühle „Leistungselektronik“ und „Elektrische Netze und Erneuerbare Energie“ gemeinsam mit weiteren Forschungs- und Industriepartnern an Konzepten für Batteriesysteme zur Sicherstellung eines stabilen Netzbetriebs forschen.

In der Lehre bieten wir fakultätsübergreifend über 40 Lehrveranstaltungen an, die im Sommersemester noch überwiegend online durchgeführt wurden. Seit dem Wintersemester findet die Lehre unter Einhaltung der Hygieneregeln wieder in der gewohnten Art und Weise als Präsenz- oder Hybridunterricht statt, der durch passende Online-Angebote ergänzt wird. Die im Jahr 2021 betreuten 31 studentischen Forschungsprojekte, 13 Bachelorarbeiten und 34 Masterarbeiten zeigen, dass die Energieforschung auch weiterhin ein spannendes und nachgefragtes Themenfeld bietet.

Veranstaltungen des akademischen Austausches sind auch dieses Jahr weitgehend ausgefallen oder fanden virtuell statt. Darunter hatten besonders Wissenschaftskonferenzen sowie internationale Kooperationen mit Brasilien und Äthiopien zu leiden. Auch die Zusammenarbeit mit der Ukraine im Rahmen des deutschsprachigen Studiengangs wurde vollständig virtualisiert.

Im Jahr 2021 konnten acht Dissertation erfolgreich abgeschlossen werden. Andreas Gerlach, Zhao Zhao und Aleksej Kiselev promovierten am Lehrstuhl für Elektrische Antriebssysteme, Yu Liu am Lehrstuhl für Leistungselektronik, Xiaowei Wang, Enrico Pannicke und Johanna Kasper am Lehrstuhl für Elektromagnetische Verträglichkeit und Yonggang Zhang am Lehrstuhl für Elektrische Netze und Erneuerbare Energie.

Ende September hat unser langjähriger IT-Administrator Uwe Göranson seinen wohlverdienten Ruhestand angetreten. Ich danke ihm für seine langjährige, zuverlässige Mitarbeit und wünsche seinem Nachfolger Marcus Glaunsinger viel Freude in seinem neuen Tätigkeitsbereich.

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

Im Namen aller Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter wünsche ich Ihnen besinnliche Weihnachtstage, Gesundheit sowie ein erfolgreiches, sich hoffentlich weiter normalisierendes Jahr 2022.

Magdeburg, im Dezember 2021

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

Inhaltsverzeichnis

1	Personalia	1
1.1	Lehrstuhl für Elektrische Antriebssysteme	1
1.1.1	Hochschullehrer	1
1.1.2	Lehrbeauftragte	1
1.1.3	Wissenschaftliche Mitarbeiter/Stipendiaten	1
1.1.4	Gastwissenschaftler	1
1.1.5	Externe Promovenden	1
1.1.6	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	Gastwissenschaftler 2021	2
1.2.5	Externe Promovenden	3
1.2.6	Mitarbeiter in Technik und Verwaltung	3
1.3	Lehrstuhl für Elektromagnetische Verträglichkeit	3
1.3.1	Hochschullehrer	3
1.3.2	Wissenschaftliche Mitarbeiter	3
1.3.3	Externe Promovenden	3
1.3.4	Mitarbeiter in Technik und Verwaltung	3
1.4	Lehrstuhl für Leistungselektronik	4
1.4.1	Hochschullehrer	4
1.4.2	Wissenschaftliche Mitarbeiter	4
1.4.3	Mitarbeiter in Technik und Verwaltung	4
1.5	Institutsebene	4
1.5.1	Technik	4
1.5.2	Verwaltung	4
2	Studium und Lehre	5
2.1	Lehrstuhl für Elektrische Antriebssysteme	5
2.1.1	Lehrveranstaltungen	5
2.1.2	Lehrveranstaltungen für Bachelor-Studiengänge	5
2.1.3	Lehrveranstaltungen für Master-Studiengänge	8
2.1.4	Abgeschlossene Forschungsprojekte	12
2.1.5	Abgeschlossene Bachelorarbeiten	12
2.1.6	Abgeschlossene Masterarbeiten	12
2.2	Lehrstuhl Elektrische Netze und Erneuerbare Energie	13
2.2.1	Lehrveranstaltungen	13
2.2.2	Abgeschlossene Forschungsprojekte	18
2.2.3	Abgeschlossene Bachelorarbeiten	19
2.2.4	Abgeschlossene Masterarbeiten	20
2.3	Lehrstuhl für Elektromagnetische Verträglichkeit	21
2.3.1	Lehrveranstaltungen für Bachelor-Studiengänge	21
2.3.2	Lehrveranstaltungen für Master-Studiengänge	25
2.3.3	Abgeschlossene Forschungsprojekte	28

2.3.4	Abgeschlossene Bachelorarbeiten	29
2.3.5	Abgeschlossene Masterarbeiten	29
2.4	Lehrstuhl für Leistungselektronik	30
2.4.1	Lehrveranstaltungen für Bachelor-Studiengänge	30
2.4.2	Lehrveranstaltungen für Master-Studiengänge	32
2.4.3	Abgeschlossene Forschungsprojekte	35
2.4.4	Abgeschlossene Masterarbeiten	35
2.5	Institutsebene	36
2.5.1	Internationale Hochschulk Kooperationen	36
2.5.2	Aktivitäten in Verbänden	36
2.5.3	Exkursionen	38
2.5.4	Studienwerbung	38
2.5.5	Preise	50
3	Forschung	53
3.1	Lehrstuhl für Elektrische Antriebssysteme	53
3.1.1	Forschungsprofil	53
3.1.2	Forschungsprojekte	55
3.1.3	Promotionen	63
3.1.4	Veröffentlichungen	68
3.2	Lehrstuhl Elektrische Netze und Erneuerbare Energie	69
3.2.1	Forschungsprofil	69
3.2.2	Forschungsprojekte	69
3.2.3	Promotionen	80
3.2.4	Veröffentlichungen	81
3.3	Lehrstuhl für Elektromagnetische Verträglichkeit	83
3.3.1	Forschungsprofil	83
3.3.2	Forschungsprojekte	84
3.3.3	Promotionen	98
3.3.4	Veröffentlichungen	102
3.4	Lehrstuhl für Leistungselektronik	109
3.4.1	Forschungsprofil	109
3.4.2	Forschungsprojekte	109
3.4.3	Promotionen	114
3.4.4	Veröffentlichungen	116
3.4.5	Auszeichnungen	117
3.4.6	Veranstaltungen	118
3.5	Institutsebene	120
3.5.1	Technische Gremien und Verbände	120
3.5.2	Kolloquien	121
3.5.3	Preise	123

1 Personalia

1.1 Lehrstuhl für Elektrische Antriebssysteme

1.1.1 Hochschullehrer

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

1.1.2 Lehrbeauftragte

1.1.3 Wissenschaftliche Mitarbeiter/Stipendiaten

- M. Sc. Shokoofeh Abbaszadeh
- Dipl.-Ing. Andreas Bannack
- M. Sc. Sebastian Benecke (bis 30.06.2021)
- Dr.-Ing. Andreas Gerlach
- M. Sc. Sebastian Hieke (bis 30.06.2021)
- Dr.-Ing. Thomas Schallschmidt (Mitglied des Vorstandes des Instituts für elektrische Energiesysteme)
- Dr.-Ing. Mario Stamann
- Dr.-Ing. Zhao Zhao

1.1.4 Gastwissenschaftler

- Adisu Teshale Afeta, Adama Science and Technology University, Äthiopien

1.1.5 Externe Promovenden

- Henning S. Vogt, Volkswagen AG, Konzernforschung
- Dr.-Ing. Aleksej Kiselev, TH Mittelhessen, Friedberg (Promotion 28.04.2021)
- Johannes M. Schäfer, Volkswagen AG, Konzernforschung
- Niklas Förster, BeXema GmbH
- Benjamin Horn, SMELA GmbH

1.1.6 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)
- Jun.-Prof. Dr.-Ing. Ines Hauer
(Juniorprofessorin für Elektrische Energiespeichersysteme)

1.2.2 Lehrbeauftragte

- Dr.-Ing. Pio Lombardi, Fraunhofer Gesellschaft, IFF Magdeburg
- Prof. dr. hab. inż. Dr.-Ing. E. h. Waldemar Rebizant, TU Wrocław, Polen: Digitale Schutztechnik

1.2.3 Wissenschaftliche Mitarbeiter

- M. Sc. Jonte Dancker
- M. Sc. Martin Fritsch
- M. Sc. Marc Gebhardt
- M. Sc. Mahmood Gholizadeh (bis 30.09.2021)
- M. Sc. Eric Glende
- M. Sc. Sebastian Helm
- Dr.-Ing. Maik Heuer
- M. Sc. Christian Klabunde
- M. Sc. Nicola Könneke
- M. Sc. Philipp Kühne
- M. Sc. André Richter
- M. Sc. Christian Rinne
- M. Sc. Tamara Schröter (bis 15.10.2021)
- M. Sc. Muhammad Tayyab
- Dipl.-Ing. Michael Wenske (bis 31.10.2021)
- M. Sc. Tahaguas Woldu
- M. Sc. Yonggang Zhang (bis 31.05.2021)
- M. Sc. Christian Ziegler

1.2.4 Gastwissenschaftler 2021

- Leonardo Nogueira Fontoura da Silva, Me. Engenheiro Eletricista, Doutorando em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria - UFSM

1.2.5 Externe Promovenden

- Dipl.-Ing. Mike Weber, 50Hertz Transmission GmbH, Berlin
- M. Sc. Anna Shchetkina, Netze Magdeburg GmbH
- M. Sc. Jenny Gronau, 50Hertz Transmission GmbH, Berlin
- M. Sc. Liang Tao, Siemens AG, Erlangen
- M. Sc. Johannes Göbel, TenneT TSO GmbH, Bayreuth

1.2.6 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.-Ing. Moawia Al-Hamid
- Dr.-Ing. Mathias Magdowski (Mitglied des Vorstandes des Instituts für Medizintechnik)
- Dr.-Ing. Dipl.-Phys. Jörg Petzold
- Dr. rer. nat. Sergey Tkachenko
- M. Sc. Johanna Kasper (bis 05.10.2021)
- M. Sc. Thomas Gerlach
- M. Sc. Enrico Pannicke
- M. Sc. Moustafa Raya
- M. Sc. Benjamin Hoepfner
- M. Sc. Felix Middelstädt
- M. Sc. Max Rosenthal

1.3.3 Externe Promovenden

- M. Sc. Benjamin Willmann, Volkswagen AG, Wolfsburg

1.3.4 Mitarbeiter in Technik und Verwaltung

- Janet Morscheck (Sekretärin)

1.4 Lehrstuhl für Leistungselektronik

1.4.1 Hochschullehrer

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

1.4.2 Wissenschaftliche Mitarbeiter

- M. Sc. Anton Chupryn
- Dr.-Ing. Reinhard Döbbelin
- M. Sc. Carsten Kempiak
- M. Sc. Kevin Ladentin (seit 01.02.2021)
- M. Sc. Tianyu Li

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) (bis 30.09.2021)
- Marcus Glaunsinger (IT-Administration) (seit 01.10.2021)
- Dipl.-Ing. Katharina Mecke (Werkstofflabor und Videotechnik, LSF-Beauftragte sowie Gleichstellungsbeauftragte und Familienbeauftragte der FEIT)
- Jens-Uwe Schulz (Meister, Werkstatt)
- Lothar Griep (Werkstatt)
- Helge Müller (Werkstatt)
- Hannes Albrecht (Auszubildender Werkstatt) (bis 31.01.2021)

1.5.2 Verwaltung

- Julia Reinecke (Ökonomie, Buchhaltung am Institut für elektrische Energiesysteme)
- Katja Grohe-Gottschling (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 Lehrveranstaltungen

2.1.2 Lehrveranstaltungen für Bachelor-Studiengänge

Allgemeine Elektrotechnik 2

— Electrical engineering and electronics —

SS	V 2 SWS:	Dr.-Ing. Thomas Schallschmidt
	P 1 SWS:	Dipl.-Ing. Andreas Bannack
	P 1 SWS:	Dipl.-Ing. Detlef Baumecker
	Ü 1 SWS:	Dr.-Ing. Reinhard Döbbelin
	Ü 1 SWS:	Dipl.-Ing. Andreas Bannack
	Ü 1 SWS:	M. Sc. Shokoofeh Abbaszadeh

Die Lehrveranstaltung wendet sich an Studierenden nicht-elektrotechnischer 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 - Fahrantriebe

— 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 Dr.-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:	Dr.-Ing. Mario Stamann
	P 1 SWS:	Dr.-Ing. Thomas Schallschmidt Dr.-Ing. Mario Stamann

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

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

E-Fahrzeugantriebe, Teil 1 und 2

— E-Power Engine —

SS/WS V 4 SWS: Prof. Dr.-Ing. Roberto Leidhold
Ü 2 SWS: Dr.-Ing. Thomas Schallschmidt
P 1 SWS: Dipl.-Ing. Andreas Bannack

Dieses Modul soll die Studierenden in die Lage versetzen, 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 im stationären Zustand, zur Analyse des Betriebsverhaltens und zur Berechnung grundlegender Einsatzfälle anzuwenden. Sie können einschlägige Maßnahmen zur Wirkungsgradverbesserung der elektrischen Maschinen ergreifen. Die Studierenden werden durch das Modul in die Lage versetzt, das elektrische Antriebssystem grundlegend zu berechnen. Nach Abschluss des Moduls können die Studierenden, die stationären und dynamischen Modelle der einzelnen Bestandteile eines Antriebssystems, sowie dessen Wechselwirkung nachvollziehen. Nach erfolgreicher Absolvierung des Moduls können die Studierenden E-Antriebe für Transportsysteme, z. B. E-Fahrräder, E-Scooter, E-Automobile, Bahnen und vieles mehr, auslegen.

- Magnetkreise, Übertrager
- Gleichstrommaschine
- Asynchronmaschine
- Synchronmaschine
- Wirkungsgrad
- Auswahl elektrischer Maschinen Aufgaben, Funktionsgruppen und Struktur eines elektrischen Fahrzeugantriebs
- Kenngrößen von Bewegungsvorgängen und Arbeitsmaschinen, Mechanik des Antriebssystems, typische Widerstandsmomenten-Kennlinien von Arbeitsmaschinen, 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 Antrieben
- Strukturen geregelter elektrischer Fahrzeugantriebe

Elektrische Maschinen

— Electrical machines —

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

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

2.1.3 Lehrveranstaltungen für Master-Studiengänge

Regelung von Drehstrommaschinen

— Control of AC Machines —

SS V 2 SWS: Prof. Dr.-Ing. Roberto Leidhold
Dr.-Ing. Thomas Schallschmidt
Ü 1 SWS: Dr.-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: Dr.-Ing. Mario Stamann
Dr.-Ing. Thomas Schallschmidt
M. Sc. Shokoofeh Abbaszadeh

- 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

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)

Unkonventionelle elektrische Maschinen

— Unconventional Electrical Machines —

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

Die Lehrveranstaltung vermittelt erweiterte Kenntnisse zu den elektrischen Maschinen und Aktoren, die in den Grundvorlesungen nicht angesprochen werden. Die Studierenden 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
Ü 1 SWS: Dr.-Ing. Andreas Gerlach

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

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

Systembetrachtung intelligenter Elektrofahrzeuge (Seminar)

— Systembetrachtung intelligenter Elektrofahrzeuge —

SS S 3 SWS: Prof. Dr.-Ing. Roberto Leidhold
S 3 SWS: Prof.-Dr.-Ing. Andreas Lindemann
S 3 SWS N.N.

Elektrofahrzeuge und autonom fahrende Fahrzeuge bestehen aus einer Vielzahl an Einzelsystemen, vom Energiespeicher, dem Antriebssystem, den Energiewandlern, bis hin zu Steuergeräten für vernetzte Planung, Umfelderkennung und Regelung. Der Entwurf, die Auslegung, Analyse und Optimierung des Gesamtsystems erfordert eine systemische Sicht auf alle Teilsysteme, um einen sicheren und zuverlässigen Betrieb von intelligenten Elektrofahrzeugen zu ermöglichen. Die Studierenden werden durch das Modul in die Lage versetzt, die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Teilsystemen in Elektrofahrzeugen in der Systemebene nachzuvollziehen, insbesondere die Energieflüsse zwischen den einzelnen Komponenten wie den Energiewandlern und dem Speicher. Sie werden befähigt, die Grundlagen der einzelnen Teilkomponenten zu verstehen, deren dynamisches und statisches Verhalten zu modellieren und zu analysieren sowie Ansätze zur optimalen Regelung und Systemauslegung zu erarbeiten. Sie können anwendungsspezifische Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Komponenten bewerten.

- Ansatz der Systembetrachtung von intelligenten Elektrofahrzeugen
- Grundlagen sowie Methoden zur Modellierung und Analyse des Gesamtfahrzeuges und der Teilkomponenten, insbesondere der
- Energiespeicher
- leistungselektronischen Energiewandler
- elektrischen Maschinen
- Steuergeräte und Regelungssysteme
- optimale Dimensionierung
- optimale Regelung und Planung

Mikrocontroller-basierte Antriebsregelungen (Seminar)

— Microcontroller-based Drive Control —

WS S 3 SWS: Prof. Dr.-Ing. Roberto Leidhold
Dr.-Ing. Andreas Gerlach

Lernziele und erworbene Kompetenzen: Die Studierenden werden durch das Modul in die Lage versetzt, grundlegende Regelungsverfahren für elektrische Antriebssysteme in Mikrocontroller umzusetzen. Sie können die Methoden der Taskverwaltung und Kommunikation für Echtzeitanwendungen nachvollziehen. Sie sind befähigt die Regelungsglieder zu diskretisieren und implementieren, sowie mit den Problemen der Umsetzung mit Festkommazahlen umzugehen.

- Architektur der Mikrocontroller und digitale Signalprozessoren (DSP) Wichtigste Schnittstellen für Antriebsregelung (ADC, PWM, EncoderEinheit)
- Echtzeit-Taskverwaltung und Interrupts
- Synchronisierung zwischen Prozessorkern, Pulsbreiten-Modulator (PWM) und Analog-digital-Umsetzer (ADC)

- Echtzeit-Kommunikation (Controller-Area-Network) Programmierungsumgebungen
- Debugging in Echtzeitanwendungen
- Diskretisierung und Festkommazahlen
- PWM-Steuerung und Stromregelung für umrichter gespeiste Maschinen

2.1.4 Abgeschlossene Forschungsprojekte

1. Vladislav Bataev: Influence of Diameter and Pole Pitch on the Force Sensitivity of Tubular Linear Machines
2. Irfan Shahzad: An Overview of Current Technologies and Emerging Trends of Industrial Automation
3. Florian Miegel: Vergleich verschiedener Wicklungsarten am Beispiel einer Asynchronmaschine

2.1.5 Abgeschlossene Bachelorarbeiten

1. Florian Aust: Entwicklung eines optimierten Qualitäts sicherungsverfahrens zur Erkennung mangelhafter Schweißverbindungen in der Statorwicklung eines Ringgenerators
2. Samuel Weber: Modernisierung einer Formenförderanlage in einem Porenbetonwerk
3. Valeriia Kantur: Modellbildung eines Antriebssystems
4. Ngoc Duc Nguyen: Antriebsregelung und Datenerfassung
5. Florian Miegel: Inbetriebnahme und technische Validierung eines Direktantriebes

2.1.6 Abgeschlossene Masterarbeiten

1. Aparna Suresh: Optimization of a Self-Sensing Control Method for Implementation in Microcontrollers
2. Anton Komar: Weiterentwicklung einer Ringsegmentengeneratorkonstruktion auf Basis von Versuchsergebnissen eines Labormusters
3. Erik Maximilian Pieves: Mikrocontrollerbasierte Regelung einer Klimakammer
4. Renukadevi Krishnaraj: Comparative Analysis of the Sensor Requirements for the Field Oriented Control and the Six-Step Commutation in Electric Drives
5. Vladislav Bataev: Optimal Movement Control of the Three-Link Manipulator
6. Bilal Badar: Torque Ripple Compensation of Switched-Flux Electrical Machines for Maximum Power Generation of River-Energy-Systems
7. Andreas Frost: Feldorientierte Regelung einer permanenterregten Synchronmaschine

2.2 Lehrstuhl Elektrische Netze und Erneuerbare Energie

2.2.1 Lehrveranstaltungen

Elektrische Energieversorgung

— Electric Power Supply—

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

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

Elektrische Netze 1

— Electric Power Networks 1 —

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

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

Elektrische Netze 2

— Electric Power Networks 2 - Power System Dynamics —

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

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

Grundlagen der elektrischen Energietechnik

— Introduction to Electrical Power Systems —

WS V 2 SWS: Prof. Dr.-Ing. habil. Martin Wolter
Ü 1 SWS: M. Sc. Jonte Dancker

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

Energiespeichersysteme

— Energy storage systems —

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

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

Methoden der Optimierung elektrischer Energieversorgungsnetze

— Optimization Methods for Electrical Grids —

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

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

Operative Systemführung elektrischer Netze

— System Operation of Electric Power Networks —

WS V 2 SWS: Prof. Dr.-Ing. habil. Martin Wolter
Ü 1 SWS: M. Sc. Jonte Dancker

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

Photovoltaische Energiesysteme

— Photovoltaic Energy Systems —

SS V 2 SWS: Jun.-Prof. Dr.-Ing. Ines Hauer
Ü 1 SWS: M. Sc. Jonte Dancker

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

Regenerative Elektroenergiequellen - Systembetrachtung

— Renewable Energy Sources —

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

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

Windenergie

— Wind Energy —

SS V 2 SWS: M.Sc. André Richter
Ü 1 SWS: M.Sc. André Richter

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

Power Network Planning and Operation

WS V 2 SWS: Prof. Dr.-Ing. habil. Martin Wolter
Ü 1 SWS: M.Sc. Jonte Dancker

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

- 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: Jun.-Prof. Dr.-Ing. Ines Hauer
Ü 1 SWS: M.Sc. Jonte Dancker

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

Digital Protection of Power Networks

SS V 2 SWS: Prof. Dr.-Ing. habil. Martin Wolter
Prof. dr. hab. inż. Dr.-Ing. E. h. Waldemar Rebizant

- Concepts and requirements of power system protection
- Protection of particular network elements
- Digital signal processing for protection purposes
- Adaptive and intelligent protection systems

2.2.2 Abgeschlossene Forschungsprojekte

- | | |
|------------------------|---|
| 1. Christoph Andres: | Hochfrequenz-Stromwandler als Teilentladungssensor |
| 2. Zhargal Namsaraev: | Interference Between HVDC Systems and PST |
| 3. Bennett Sattler: | Literaturrecherche zu Netzausbaukonzepten |
| 4. Pierre Bolze: | Vergleich von Modellierungsansätzen zur Abbildung des transienten Verhaltens von Wärmenetzen |
| 5. Nikita Loginov: | Impact of PV Systems on Grid Stability and their modelling |
| 6. Artem Kashtanov: | Study on Principles of FLISR |
| 7. Guzel Zinnatullina: | Wide Area Monitoring System in Power Systems |
| 8. Enzhe Gilmudtinova: | Stochastic Congestion Management Optimization |
| 9. Aliiya Sharipova: | Acceleration of the Contingency Analysis of Electrical Grids based on DC Power Flow Assumptions |
| 10. Wenwen Yang: | Analysis and Identification of Appropriate Methods to Determine Power Network Losses |

- | | |
|--------------------------------|---|
| 11. Shubham Satyapal: | Contribution of PV Systems and Wind Turbines to Maintain Voltages in a Secure Range |
| 12. Haytham Darawish: | Modellierung von „virtueller Trägheit“ |
| 13. Danielle Nodonn: | Technologienutzung aus etablierten Märkten |
| 14. Chaman Das: | Revision of a Smart Grid Software Framework |
| 15. Omobolaji Oluwajuwon Koyi: | Pitch Control of Wind Turbines with PID and Fuzzy Logic Controllers |
| 16. Julian Reek: | Analyse des Betriebs der Interkonnectoren zwischen Schweden, Dänemark, Deutschland und Polen |
| 17. Veeranjanyulu Akula: | Literature Review on Uncertainties Modeling in Planning and Operation of Multi-Energy Systems |
| 18. Ali Golmohammadi: | Auswertung von Messungen an einem Brennstoffzellensystem |
| 19. Likhitha Thakkalapally: | Literature Research on Week Ahead Unit Commitment |
| 20. Normen Lüttge: | Approximation von Nasenkurven durch Kegelschnittgleichungen |
| 21. Shubhajit Biswas: | Development of an Infeed Quantile Forecast |
| 22. Ali Kharnoub: | Literaturrecherche zur Methode des „Continuation Power Flow“ |

2.2.3 Abgeschlossene Bachelorarbeiten

- | | |
|---------------------------|--|
| 1. Andy Sauer: | Strategische Marktteilnahme an Energy-only- und Systemdienstleistungsmärkten |
| 2. Christoph Sauer: | Analyse des deutschen Strommarktmodells und Betrachtung neuer leistungsbasierter Strommarktansätze und deren technische Auswirkungen |
| 3. Constantin Leichhardt: | Methodik zur Ableitung von repräsentativen Tagen aus Strommessdaten |
| 4. Long Nguyen: | Anlagen zur Bereitstellung von Momentanreserve im Kontext des Energiesystems |
| 5. Linxiao Wang: | Prognosen zur Entwicklung des deutschen und europäischen Kraftwerksparks im Zeitverlauf bis 2050 |
| 6. Lasse Kramer: | Konzeptionierung und Definition von kundennahen Erprobungsfällen, zur Erprobung von intelligenten Ladefunktionen |
| 7. Mustafa Mustafa: | Erweiterung eines Modells zur Ermittlung von Day-Ahead-Marktpreisen |

2.2.4 Abgeschlossene Masterarbeiten

- | | |
|------------------------------|---|
| 1. Janna Wortelker: | Dimensionierung von Sektorkopplungstechnologien zur Versorgung von Wohneinheiten mit Ladeinfrastruktur |
| 2. Sebastian Dreier: | Entwicklung einer Methode zur Erbringung von PRL durch E-Kfz |
| 3. Shyne Sukumaran: | Developing Machine-Learning-Based Algorithms Within Net Zero Energy Factories |
| 4. Philipp Anke: | Optimierung der Netzführung mittels diagnostischer Befunde des Leistungstransformators |
| 5. Jean-Baptiste Weh: | Entwicklung und Bewertung von Standardlastprofilen aus Strommessdaten |
| 6. Lutz A. Wibbing: | Entwicklung und Vergleich von Optimierungsalgorithmen von Batteriespeichersystemen |
| 7. Awais Aijaz: | TSO/DSO Communication |
| 8. Pavlo Oliinyk: | Bereitstellung von „virtueller Trägheit“ durch Windenergieanlagen |
| 9. Zhargal Namsaraev: | Correlation between HVDC systems and PST |
| 10. Sai S. Punyam Rajendran: | Stochastic Optimization for DERs Planning and Operation in Microgrids Considering the Rise in the EVCS as Long-Term Uncertainty |
| 11. Polina Gordeeva: | Implementation of Energy Storage Systems for the Charging Stations Infrastructure |
| 12. Daniel Mayr: | Mehrfachnutzungskonzepte für Batteriespeicher |
| 13. Sergii Grygorchuk: | Untersuchung einer CO ₂ -neutralen Strom- und Wärmeerzeugung für den Industriesektor |
| 14. Artem Kasthanov: | Applying Graph Theory to Automatic Network Recovery |
| 15. Guzel Zinnatullina: | Hybrid State Estimation with Wide Area Monitoring Systems |
| 16. Fabian Bauer: | Bewertung von unitären reversiblen Brennstoffzellen mit Hilfe der elektrochemischen Impedanzspektroskopie |
| 17. Patrali Majumder: | Time Series Clustering of Energy Metering Data |
| 18. Muhammad Butt: | Development of a Grid Expansion Optimization Algorithm |
| 19. Issan Baral: | Improving Substation Operation Through Advanced Transformer Analysis |

2.3 Lehrstuhl für Elektromagnetische Verträglichkeit

2.3.1 Lehrveranstaltungen für Bachelor-Studiengänge

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

Die Lehrveranstaltung wird durch eine handschriftliche Übung und durch eine Computerübung ergänzt. In der handschriftlichen Übung werden die Lehrveranstaltungsthemen 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 wurden per Download-Link 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.

Grundlagen der Elektrotechnik I

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

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. Moustafa Raya
M. Sc. Johanna Kasper
M. Sc. Benjamin Hoepfner
Dr.-Ing. Dipl.-Phys. Jörg Petzold

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.

Grundlagen der Elektrotechnik II

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

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

Die Prüfungszulassung zu der Lehrveranstaltung „Grundlagen der Elektrotechnik I und II“ basiert seit einigen Jahren auf einem Konzept von personalisierbaren Aufgabe mit anonymen Peer Review. Dabei bekommen alle Studierenden eine eigene Aufgabe per E-Mail zugeschickt, können diese lösen und ihre Lösung über das Lernmanagementsystem Moodle zur Korrektur einreichen. Um den Korrekturaufwand für die Lehrenden zu senken, begutachten sich die Studierenden dann anhand einer ebenfalls personalisierten Musterlösung gegenseitig. Das ganze Verfahren läuft automatisiert ab und ist dadurch gut skalierbar. Gegenüber einfachen Multiple-Choice- oder Zahlenwert-und-Einheit-Aufgaben lassen sich hier auch der Rechenweg und Ansatz gut bewerten. Auf der Seite <https://bit.ly/PeerReviewAufgaben> sind weitere Informationen dazu in zusammengefasster Form verfügbar.

Grundlagen der Elektrotechnik (Praktikum II)

SS P 3 SWS: M.Sc. Moustafa Raya
M.Sc. Johanna Kasper
Dr.-Ing. Dipl.-Phys. Jörg Petzold
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: Dr.-Ing. Mathias Magdowski
M.Sc. Thomas Gerlach
Dr.-Ing. Thomas Schallschmidt

Im zweiwöchigen Projektseminar Elektrotechnik/Informationstechnik sollen unsere Studierenden Einblicke in die Programmierung in MATLAB sowie in die Sensorik, Aktorik und Robotik bekommen. Dazu werden die Studierenden zunächst in die MATLAB-Programmierung und in die Ansteuerung von LEGO-Motoren und das Auslesen von LEGO-Sensoren über einen entsprechenden Programmierbaustein eingeführt. In kleinen Gruppen konstruieren, gestalten und programmieren die Studierenden dann kleine Maschinen oder Roboter aus LEGO, die eigenständig eine mehr oder weniger sinnvolle Tätigkeit ausführen, siehe Abbildung 2.1. Die Ideen entwickeln die Studierenden selbst, was für die besondere Motivation im liebevoll „LEGO-Praktikum“ genannten Projektseminar sorgt. Neben den fachlichen Komponenten werden im Seminar auch Schlüsselkompetenzen geschult, z.B. in der Gruppenarbeit, im Zeit- und Projektmanagement sowie im wissenschaftlichen Arbeiten, Schreiben und Präsentieren.

In diesem Semester konnte das für den Zeitraum von vom 08. bis 19. Februar geplante Seminar pandemiebedingt natürlich nicht wie gewohnt in den Laboren im Rechenzentrum stattfinden. Ganz ausfallen sollte es trotzdem nicht und so wurde gemeinsam mit den Studierenden nach alternativen Varianten gesucht. Pandemie-konform haben sich die Studierenden die LEGO-Kästen deshalb aus der Universität abgeholt und dann von Zuhause aus im „Home-Lab“ in Zweiergruppen oder allein an ihren Projekten gearbeitet. Für Rückfragen und zur Klärung von Problemen konnten sich die Studierenden jederzeit in eine Videokonferenz mit den Betreuern Thomas Gerlach, Thomas Schallschmidt, Robert Kowal oder dem Modulverantwortlichen Mathias Magdowski einwählen. Insgesamt verlief das Seminar deshalb nicht weniger erfolgreich als in den Vorjahren, wobei den Studierenden natürlich die noch freiere Zeiteinteilung der Heimarbeit deutlich entgegen kam.

In diesem Jahr wurden u.a. folgende LEGO-Maschinen gebaut:

- ein Kalimba-Roboter
- ein Bergungsroboter
- ein lichtgeleitetes Suchsystem

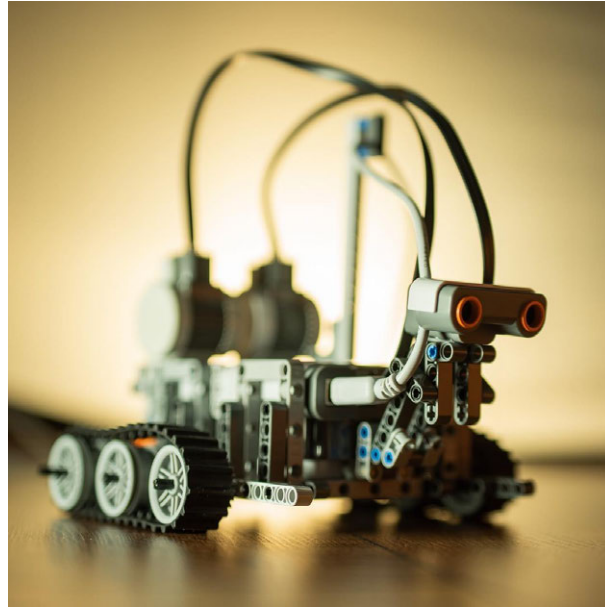


Abbildung 2.1: Spannende und innovative Konstruktionen beim LEGO-Praktikum 2021 (Foto: Anton Schlünz, <https://www.instagram.com/p/CLK0TobB5B2/>)

- ein Putzroboter
- ein bionischer Greifarm

Da die Studierenden sich nicht in der Universität sehen konnten, fanden die gegenseitige Vernetzung und das Zeigen von Zwischenergebnissen in diesem Jahr hauptsächlich über die sozialen Netzwerke statt. Dafür nutzten die Studierenden einen vorhandenen Account oder legten Sie einen neuen anonymen oder pseudonymen Account bei Twitter oder Instagram an.

Wer mal reinschauen möchte, findet hier eine Übersicht der studentischen Aktivitäten:

Gruppe 1: <https://www.instagram.com/legomindstorms2021/>

Gruppe 2: <https://www.instagram.com/lego.mindstorm/>

Gruppe 3: https://www.instagram.com/r.o.b._i2021/

Gruppe 4: <https://www.instagram.com/sortierbobby/>

Gruppe 5: <https://www.instagram.com/lego3vv/>

Gruppe 6: <https://www.instagram.com/legopraktikum2021/>

Gruppe 7: <https://twitter.com/FelixGrimm4> und <https://twitter.com/BrehmerLennart>

Gruppe 8: <https://www.instagram.com/legomindblow/>

Gruppe 9: https://www.instagram.com/ottos_legobots/

Gruppe 10: <https://twitter.com/kevcurry0>

Instagram: <https://www.instagram.com/explore/tags/legopraktikum2021/>

Twitter: <https://twitter.com/hashtag/LEGOPraktikum2021>

Neben den vielen Fotos und Videos in den sozialen Medien gibt es auch für das mittlerweile 9. LEGO-Praktikum auch wieder eine Playlist mit den Demonstrationsvideos der Abschlusspräsentationen bei YouTube (<https://bit.ly/LegoPraktikum2021>).

Im Anschluss an das Seminar halten die Studierenden ihre Resultate auch wieder in 4-seitigen Papieren fest, die über die Universitätsbibliothek veröffentlicht wurden (siehe <http://journals.ub.uni-magdeburg.de/ubjournals/index.php/LEGO>).

Elektromagnetische Verträglichkeit

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

2.3.2 Lehrveranstaltungen für Master-Studiengänge

Modern Concepts of EMC und EMC Measurements

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

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

Modern Concepts of EMC and EMC Measurements (Laboratory Experiments)

WS P 2 SWS: Dr.-Ing. Mathias Magdowski
Dr.-Ing. Al-Hamid
M. Sc. Enrico Pannicke
Dr.-Ing. Dipl.-Phys. Jörg Petzold
M. Sc. Thomas Gerlach

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

Elektromagnetische Verträglichkeit regenerativer elektrischer Systeme

WS V 2 SWS: Prof. Dr.-Ing. Ralf Vick
M.Sc. Benjamin Hoepfner
Dr.-Ing. Mathias Magdowski
Ü 1 SWS: M.Sc. Benjamin Hoepfner
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

EMV-Messtechnik

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

Inhalte:

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

Analyse und Berechnung elektromechanischer Strukturen

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

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

Die Lehrveranstaltung findet als Inverted-Classroom-Variante statt, d. h. die Vorlesungen sind größtenteils auf Video aufgezeichnet und können eigenständig von den Studierenden vorbereitet, angeschaut und nachbereitet werden. In der synchronen Phase, die in diesem Jahr als Zoom-Videokonferenz stattfand, wurden dann hauptsächlich komplexe Übungsaufgaben bearbeitet sowie weiterführenden Probleme besprochen und diskutiert.

Non-technical Project Seminar

SS Seminar Dr.-Ing. Mathias Magdowski
M. Sc. Johanna Kasper
M. Sc. Enrico Pannicke
M. Sc. Moustafa Raya

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

Siebte Gastvorlesung am German-Russian Institute of Advanced Technologies in Kasan, Russland

Einen Einblick in die Grundlagen der elektromagnetischen Verträglichkeit gab es für die sieben Studierenden des Masterstudiengangs „Electrical Engineering and Information Technology“ am German-Russian Institute of Advanced Technologies (GRIAT) an der Staatlichen Technischen Andrej-Nikolajewitsch-Tupolew-Universität Kasan in Russland in Form eines Blockseminars vom 22. Februar bis 05. März 2021. Die Gastvorlesung fand bereits das 7. Jahr in Folge statt, wurde in diesem Jahr aufgrund der Corona-Pandemie aber per Zoom durchgeführt. Die synchronen Abschnitte in der Videokonferenz mit kurzen Wissenvermittlungsphasen, der Besprechung von Beispielen und kurzen Aufgaben sowie vielen interaktiven Quizen per Kahoot! wurden durch einen asynchron nutzbaren Moodle-Kurs im E-Learning-System der Otto-von-Guericke-Universität ergänzt, auf den die Studierenden per Gastzugang Zugriff hatten.

Dabei wurden folgende Themen behandelt:

- Grundlagen und Historie der elektromagnetischen Verträglichkeit
- Rechnen mit Maßen und Pegeln in Dezibel
- Störquellen und Störsignale im Zeitbereich und Frequenzbereich
- Fourier-Reihenentwicklung und Fourier-Transformation
- Gleichtakt- und Gegentaktsignale
- galvanische Kopplung über Leitungen
- kapazitive Kopplung über elektrische Felder
- induktive Kopplung über magnetische Felder
- elektromagnetische Kopplung über Wellenfelder
- Elementardipole und Linearantennen

Zur Lösung der Übungsaufgaben wurden auch praxisrelevante Numerikprogramme wie MATLAB oder GNU Octave, Schaltungssimulatoren wie LTspice, CONCIRC oder EasyEDA sowie Feldsimulatoren wie CONCEPT-II oder CONMTL für Mehrfachleitungssysteme eingesetzt und ausprobiert.

Daneben gab es die Möglichkeiten von zwei virtuellen Live-Laborführungen durch die Modenverwirbelungskammer (siehe Abbildung 2.2) des Lehrstuhls für EMV und die Absorberhalle in der experimentellen Fabrik, die in einem Präsenzkurs in Kasan so natürlich nicht möglich gewesen wären, und die mit Sicherheit zu den Highlights des Kurses gehörten.

Die teilnehmenden Studierenden schlossen den zweiwöchigen Kurs am zweiten Freitag mit einer 90-minütigen unbeaufsichtigten Open-Book-Klausur mit individuellen Aufgabenstellungen und einer Online-Einreichung ab.

2.3.3 Abgeschlossene Forschungsprojekte

- | | |
|---------------------------|---|
| 1. Niklas Ritz: | Implementierung des Vector-Fitting-Algorithmus in MATLAB |
| 2. Constantin Leichhardt: | Steuerung und Programmierung der Effektbeleuchtung im Foyer des Siemensgebäudes |
| 3. Florian Beier: | Steuerung und Programmierung des LED-Würfels im Foyer des Siemensgebäudes |



Abbildung 2.2: Dr.-Ing. Mathias Magdowski bei einer Videokonferenz und virtuellen Laborführung in der Modenverwirbelungskammern der Lehrstuhls für Elektromagnetische Verträglichkeit

2.3.4 Abgeschlossene Bachelorarbeiten

1. Bodo Gambal: Prüfverfahren für Störeinkopplungen im Magnetresonanztomograf
2. Joaquin Löning: Verbesserungen der MR-Verträglichkeit eines Mikrowellengenerators durch Etablierung eines Schirmgehäuses für Mikrowellengeneratoren

2.3.5 Abgeschlossene Masterarbeiten

1. Nitin Aggarwal: Comparison of New Immunity Measurements Methods with Standardized Method Using a Component of an Ambulance
2. Yu-Chen Chang: Design and Shielding Efficiency Analysis of Shielding Curtains for an RFID Tunnel Gate
3. Steven Bernick: Algorithmus zur Bestimmung der frequenz- und zeitvarianten Netzimpedanz
4. Joris Hubmann: Entwurf eines Demonstrators für die MR-geführte Irreversible Elektroporation
5. Christoph Brandes: Entwicklung von Modulationsverfahren für Vierleiter-Gleichspannungsumrichter in Zwei- und Drei-Level-Umrichtertopologie
6. Arnob Mazumder: Design and Optimization of Two-Stage Output EMI Filters
7. Rehnuma Bushra: Modeling and Analysis of Electromagnetic Field Couplings in EMI Filter Inductors

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 Dr.-Ing. Reinhard Döbbelin
	Ü 1 SWS:	Dr.-Ing. Reinhard Döbbelin
WS	P 1 SWS:	Dr.-Ing. Reinhard Döbbelin M. Sc. Anton Churpryn M. Sc. Carsten Kempiak M. Sc. Tianyu Li

- 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. Kevin Ladentin M. Sc. Anton Churpryn
	P 1 SWS:	Dr.-Ing. Reinhard Döbbelin M. Sc. Kevin Ladentin M. Sc. Anton Churpryn M. Sc. Tianyu Li

- Leistungshalbleiter-Bauelemente:
 - MOSFET

- IGBT
- Diode
- Thyristor

unter besonderer Berücksichtigung von

- Funktionsweise
- statischem und dynamischen Verhalten
- Ausführung — Si, SiC, ...
- Aufbautechnik
- schaltungsgerechter Auslegung
- Ansteuerung, Systemarchitektur

Bauelemente der Elektronik bzw. Fahrzeugelektronik

— Electronic devices —

WS	V 2 SWS:	Prof. Dr.-Ing. Andreas Lindemann
	Ü 1 SWS:	Dr.-Ing. Reinhard Döbbelin
		M. Sc. Anton Chupryn
		M. Sc. Kevin Ladentin

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

Allgemeine Elektrotechnik 1 bzw. Grundlagen der Elektrotechnik für Maschinenbau (Teil 1)

— Electrical engineering and electronics 1 —

WS	V 2 SWS:	Prof. Dr.-Ing. Andreas Lindemann
	S 1 SWS:	Dr.-Ing. Reinhard Döbbelin
		M. Sc. Anton Chupryn
		M. Sc. Kevin Ladentin
		Dipl.-Ing. Andreas Bannack
		Dr.-Ing. Thomas Schallschmidt
		und Kollegen

- Grundbegriffe
- Stromkreise
- Wechselgrößen
- elektrische und magnetische Felder

Veranstaltung für Nicht-Elektrotechniker; Allgemeine Elektrotechnik 2 vgl. auch Abschnitt 2.1.2

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: M.Sc. Carsten Kempiake

- 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
M.Sc. Carsten Kempiake
Ü 1 SWS: M.Sc. Carsten Kempiake

- 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

Systemintegration von Leistungselektronik

— System integration of power electronics —

SS S 3 SWS Prof. Dr.-Ing. Andreas Lindemann
Dr.-Ing. Reinhard Döbbelin
M. Sc. Carsten Kempia

Für die Betrachtung der Systemintegration von Leistungselektronik werden verschiedene Methoden und Werkzeuge einbezogen, die Modellbildung, Simulation sowie experimentelles Arbeiten einschließlich Hardware-in-the-Loop umfassen. Diese werden exemplarisch eingesetzt, um ein funktionierendes Gesamtsystem unter Berücksichtigung seiner leistungselektronischen Baugruppen einschließlich ihrer Steuerung und Regelung darzustellen.

Anwendungsbeispiele sind u. a. den Bereichen Netzeinspeisung von aus erneuerbaren Quellen erzeugter elektrischer Energie sowie Elektromobilität entnommen.

Systembetrachtung intelligenter Elektrofahrzeuge

— System aspects of intelligent electric vehicles —

SS S 3 SWS Prof. Dr.-Ing. Andreas Lindemann
M. Sc. Tianyu Li

Elektrofahrzeuge und autonom fahrende Fahrzeuge bestehen aus einer Vielzahl an Einzelsystemen, vom Energiespeicher, dem Antriebssystem, den Energiewandlern, bis hin zu Steuergeräten für vernetzte Planung, Umfelderkennung und Regelung. Der Entwurf, die Auslegung, Analyse und Optimierung des Gesamtsystems erfordert eine systemische Sicht auf alle Teilsysteme, um einen sicheren und zuverlässigen Betrieb von intelligenten Elektrofahrzeugen zu ermöglichen.

Inhalte:

- Ansatz der Systembetrachtung von intelligenten Elektrofahrzeugen
- Grundlagen sowie Methoden zur Modellierung und Analyse des Gesamtfahrzeuges und der Teilkomponenten, insbesondere der
 - Energiespeicher
 - leistungselektronischen Energiewandler
 - elektrischen Maschinen
 - Steuergeräte und Regelungssysteme
- optimale Dimensionierung
- optimale Regelung und Planung

gemeinsam mit den Lehrstühlen für Elektrische Antriebssysteme — vgl. Abschnitt 2.1.2 — und für Systemtheorie und Regelungstechnik

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)

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
M. Sc. Tianyu Li

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

- dimensioning
- reliability

2.4.3 Abgeschlossene Forschungsprojekte

1. Zhyrgalbek Beishenkulov: Methods to Quickly Sense the Threshold Voltage of SiC MOSFETs During Operation
2. Wenwen Yang: Research on Temperature Sensitive Electrical Parameters of GaN HEMTs
3. Svenja Langer: Praktikumsversuch Leistungsfaktorkorrektur

2.4.4 Abgeschlossene Masterarbeiten

1. Kevin Ladentin: Konzeption und Umsetzung eines Verfahrens zur Justierung der Gate-Spannung von SiC-MOSFETs während der Lastwechselprüfung zur Kompensation einer Schwellspannungsdrift
2. Willem Biermann: Mehrphasiger Hochsetzsteller

2.5 Institutsebene

2.5.1 Internationale Hochschulkooperationen

German-Russian Institute of Advanced Technology (GRIAT)¹

Die mehrjährige Kooperation mit der Staatlichen Technischen Andrej-Nikolajewitsch-Tupolew-Universität Kasan in Russland wurde auch in diesem Jahr mit Neueinschreibung und Doppelabschluss erfolgreich fortgesetzt. Weitere Informationen zur Gastvorlesung sind in Abschnitt 2.3.1 zu finden.

Kooperation mit der Ukraine²

Die langjährige Kooperation im Rahmen des deutschsprachigen Studiengangs (DSG) mit den ukrainischen Universitäten NTUU Kiew, NTU Charkiw und DonNTU Pokrovsk in Zusammenarbeit mit der Fakultät für Maschinenbau wurde auch in diesem Jahr fortgesetzt. Im März beteiligte sich der Lehrstuhl gemeinsam mit dem Lehrstuhl für Messtechnik an einer Vorlesungsreihe im Charkiw sowie im Mai an einer Studentenkonferenz. Derzeit befinden sich ukrainische Masterstudenten für ihr Studium der Elektrotechnik in Magdeburg.

Technische Universität Breslau

Die langjährige Kooperation mit der Politechnika Wroclawska wurde auch in diesem Jahr mit Neueinschreibung und Doppelabschluss erfolgreich fortgesetzt. Die von Dozenten aus Magdeburg in Breslau gehaltene Ringvorlesung „Renewable Energy Sources“ fand aus aktuellem Anlass in Form von Fernunterricht statt.

2.5.2 Aktivitäten in Verbänden

IEEE Student Branch Magdeburg

Wie in so vielen Bereichen war auch die IEEE Student Branch Magdeburg durch die Einschränkungen im öffentlichen Leben stark betroffen. Nichts desto trotz konnten neben den traditionellen Workshops als Online-Variante, einige gemeinschaftliche Aktivitäten unternommen werden, die nachfolgend beschrieben sind.

Technical Talks³ Die IEEE Student Branch Magdeburg hat Vertreter eines international erfolgreichen Konzerns, eines mehrfach ausgezeichneten Startups und eines für zahlreiche Innovationen bekannten Instituts für angewandte Forschung eingeladen, die einen Einblick in den Berufsalltag gaben und zeigten, was mit einem Hochschulabschluss im Bereich Elektrotechnik möglich ist, siehe Abbildung 2.3a. Als Nachfolgeveranstaltung der Technical Talks waren alle Teilnehmer eingeladen, weitere Fragen zu den vorgestellten Themen zu stellen oder sich in entspannter Atmosphäre beim Grillen auszutauschen.

¹von Dr.-Ing. Mathias Magdowski

²von Prof. Dr.-Ing. habil. Martin Wolter

³von Dipl.-Ing. Max Rosenthal

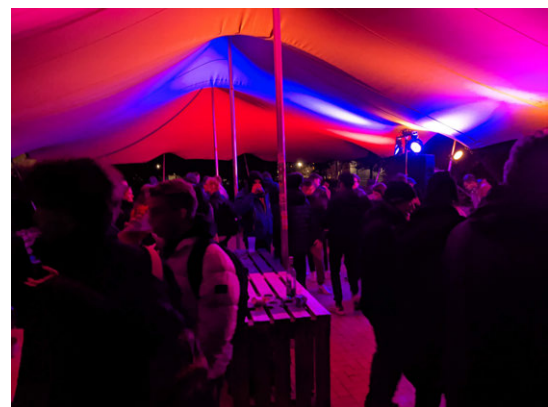
bIEEEer-Reinlötkurs⁴ Nach einer langen Zeit des Verzichts und der sozialen Distanz hat die IEEE Student Branch Magdeburg am 21. Oktober zum gemeinsamen Feiern geladen. In Anlehnung an den für alle Erstis stattfindenden „Lötkurs“ wurde dazu der „bIEEEer-Reinlötkurs“ als abendliches Pendant mit DJ, Grill und natürlich Bier sowie anderen Getränken ins Leben gerufen. Wie sich am Abend herausstellte war der Bedarf für so ein ausgelassenes Zusammenkommen groß. Etwa 150 Studierende, wissenschaftliche Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter und auch ein paar Professorinnen und Professoren waren dabei, siehe Abbildung 2.3b.

Dass dieses Event eine große Aufmerksamkeit bekam, lag nicht zuletzt daran, dass im Vorfeld eigens dafür bedruckte Getränkebecher bei Vorlesungen, Übungen und anderen Gelegenheiten verteilt wurden und einer hohen Nachfrage nachkamen. Die Becher erfüllten gleich mehrere Zwecke: Die Veranstaltung konnte mit Ihnen beworben werden, ein auf Ihnen befindlicher QR-Code verweist auf eine Webseite, die zum einen informiert und zum anderen von der IEEE Student Branch Magdeburg auch künftig nach Belieben gestaltet werden kann und alle Besitzer eines Bechers konnten sich kostenlos Bier oder nicht-alkoholische Getränke einfüllen lassen. Gerade letzteres war für viele Studierende wohl ein dankbares Angebot. Eine großzügige Grillgutauswahl komplettierte die Versorgungswünsche aller Teilnehmenden.

Dank des Live-DJs und einer kleinen Flunkyball-Challenge konnten sich Alle durch Tanzen und Spielen körperlich betätigen und kennen lernen. An diesem Abend war die Stimmung nicht nur ausgelassen sondern so gut, dass sich sehr viele Studies trotz der widrigen Wetterbedingungen eine Wiederholung des Ganzen gewünscht haben.



(a) Technical Talks



(b) bIEEEer-Reinlötkurs

Abbildung 2.3: Eindrücke aus den Veranstaltungen der IEEE Student Branch Magdeburg

VDE-Hochschulgruppe Magdeburg⁵

Im Rahmen der Kooperation ergaben sich im Jahr 2021 keine Exkursionen. Die Absprachen für zukünftig stattfindende Exkursionen liefen, sodass für 2022 einige Besichtigungen geplant sind.

Fakultätentag für Elektrotechnik und Informationstechnik (FTEI)

Ingenieure der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg sind erstmals in den Vorstand des Fakultätentages für Elektrotechnik und Informationstechnik FTEI gewählt worden: Prof. Dr.-

⁴von M. Sc. Benjamin Hoepfner

⁵von M. Sc. Marc Gebhardt

Ing. Andreas Lindemann vom Institut für Elektrische Energiesysteme der Otto-von-Guericke-Universität hat die Leitung des Gremiums übernommen; Prof. Dr.-Ing. Thilo Pionteck vom Institut für Informations- und Kommunikationstechnik wurde zum Vorsitzenden der ständigen Kommission gewählt.

Der Fakultätentag für Elektrotechnik und Informationstechnik ist der Zusammenschluss der Fakultäten oder Fachbereiche für Elektrotechnik der Universitäten und Technischen Hochschulen in Deutschland und darüber hinaus: Derzeit umfasst der Fakultätentag für Elektrotechnik und Informationstechnik 32 Mitgliedsfakultäten, hinzu kommen fünf Fakultäten aus Österreich und der Schweiz als Gäste.

Einmal im Jahr sind die Vertreter aller Fakultäten zur Plenarversammlung eingeladen, auf der weitergehende Beschlüsse gefasst werden. Die Plenarversammlung im Juni 2021 wurde als Webkonferenz von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg organisiert. Dr.-Ing. Mathias Magdowski vom Lehrstuhl für Elektromagnetische Verträglichkeit hielt dort einen Keynote-Vortrag zum Thema „Online-Prüfungen – Wo stehen wir? Und wo wollen wir eigentlich mal hin?“.

Außerdem entsenden die Fakultäten jedes Bundeslandes einen gemeinsamen Vertreter in die ständige Kommission des FTEI; diese trifft sich häufiger und erarbeitet Lösungsvorschläge zu anstehenden Themen, wie zum Beispiel aktuell der Gestaltung digitaler Prüfungsformate.

Besuch der Volkshochschule Magdeburg in der Leitwarte

Der Netzleitstand ist ein „besuchbarer Ort“ im Rahmen des vom BMWi geförderten Projektes WindNODE. Im Zuge dessen organisierte die Städtische Volkshochschule Magdeburg am 21.10.2021 eine Besichtigung des Netzleitstandes. Der Termin wurde sehr gut angenommen und neben Studenten waren vor allem ehemalige Mitarbeiter aus der Energiebranche, die sich für die neuesten Entwicklungen in der Netzleittechnik und im Energieversorgungssystem interessieren, vertreten. Im Rahmen der Besichtigung stellte Professor Wolter zuerst die Forschungsschwerpunkte des Lehrstuhls und die Anwendungsgebiete des Netzleitstand vor. Anschließend waren die Teilnehmer selbst gefragt. Im Rahmen einer Live-Demonstration des Systems, moderiert von Christian Klabunde und Eric Glende, mussten Sie die Stabilität des Systems in kritischen Netzsituationen gewährleisten. Hierzu konnten sowohl Schalthandlungen im elektrischen Netz durchgeführt als auch die Einspeiseleistung von Erzeugungsanlagen angepasst werden. Am Ende der Veranstaltung wurden noch unterschiedliche Entwicklungen im Energiesystem, z. B. die Nutzung der Hochspannungsgleichstromübertragung oder die Potentiale zur Speicherung elektrischer Energie, diskutiert.

2.5.3 Exkursionen

Bedingt durch die Auswirkungen der Corona-Pandemie fanden in diesem Jahr keine Exkursionen statt.

2.5.4 Studienwerbung

Schülerpraktikum am LENA – Interessante Einblicke in Forschung und Studium⁶

2021 fanden keine Schülerpraktika statt.

⁶von Dr.-Ing. Maik Heuer

Herbstuni⁷

Am 28.10. besuchten Schüler und Schülerinnen der 11. und 12. Klassenstufe im Rahmen der Herbst-Uni das IESY. Zusammen mit dem Lehrstuhl für elektrische Antriebssysteme gab der LENA einen kleinen Einblick in das Themengebiet der elektrischen Energiesysteme. Anhand des Multi-Energiesystem-Demonstrators zeigten Herr Marc Gebhardt und Herr Jonte Dancker die Herausforderungen des heutigen Energiesystems, siehe Abbildung 2.4. So konnten die Schüler und Schülerinnen sehen welche Auswirkungen eine zunehmende Anzahl an Erneuerbaren Energien auf das Stromnetz hat und wie Netzbetreiber heute das Stromnetz stabil halten. Anhand des Demonstrators bekamen die Schüler und Schülerinnen zudem einen Einblick in mögliche Lösungsansätze, deren Vorteile aber auch deren Grenzen.

Im Rahmen der Veranstaltung gaben Herr Marc Gebhardt und Herr Jonte Dancker darüber hinaus einen kleinen Einblick in die Vielfalt der Forschungsmöglichkeiten und Forschungsfragen im Bereich der elektrischen Energiesysteme und elektrischen Netze und deren Schnittpunkte mit anderen Forschungsbereichen.

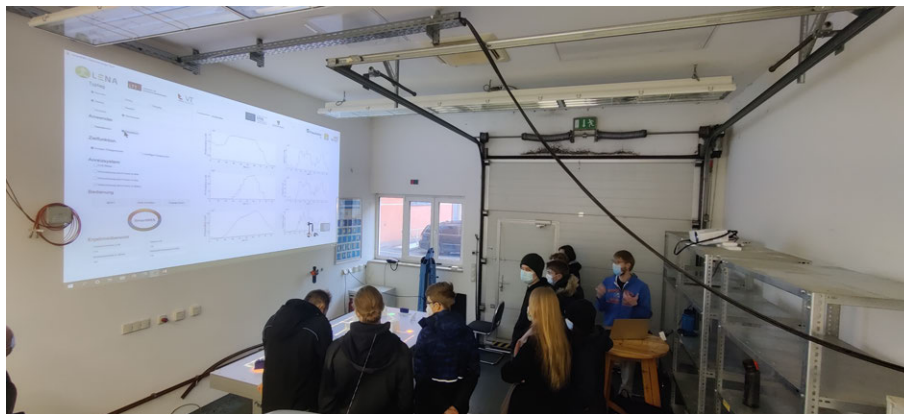


Abbildung 2.4: Schüler*innengruppe am Demonstratortisch

Elektrotechnik mit Spaß beim 8. Hörsaalslam der Ingenieure ohne Grenzen⁸

Die eigene Forschung einem fachfremden Publikum nahebringen – und zwar kurz, prägnant, informativ, unterhaltsam und im Idealfall etwas humorvoll, darum geht es bei Science Slam. Diese Chance nutzen Thomas Schallschmidt (Lehrstuhl für Elektrische Energiesysteme) und Mathias Magdowski (Lehrstuhl für Elektromagnetische Verträglichkeit) beim 8. Hörsaalslam der Ingenieure ohne Grenzen am 18. November im Hörsaal 1 der Otto-von-Guericke-Universität in Magdeburg. Unter einem streng kontrollierten 2G-Hygienekonzept waren dabei so viele Studierende und andere Zuschauer*innen im Hörsaal, wie sonst nur sehr selten bei Lehrveranstaltungen anzutreffen sind.

Nach etwas Live-Musik der Band „Es bedarf an Helden“ und einer launigen Anmoderation des OVGU-Social-Media-Sprechers Peer Niehof standen zunächst zwei Forscherinnen aus der Medizin bzw. den Neurowissenschaften auf der Bühne. Danach folgten Thomas mit einem Slam zum Ansehen von Elektroingenieuren und der Rolle des „Beobachters“ in Regelkreisen (siehe Abbildung 2.5) sowie ein Slam von Mathias zur Messung von Mobilfunkstrahlung (siehe Abbildung 2.6). Dabei gab es auch ein Live-Experiment unter Nutzung einer Antenne und eines Spektrumanalysators sowie ein interaktives Publikumsquiz zur optischen Tarnung von Mobilfunkmasten. Abgestimmt wurde dann vom Publikum per „Applausometer“.

⁷ von M. Sc. Jonte Dancker und M. Sc. Marc Gebhardt

⁸ von Dr.-Ing. Mathias Magdowski

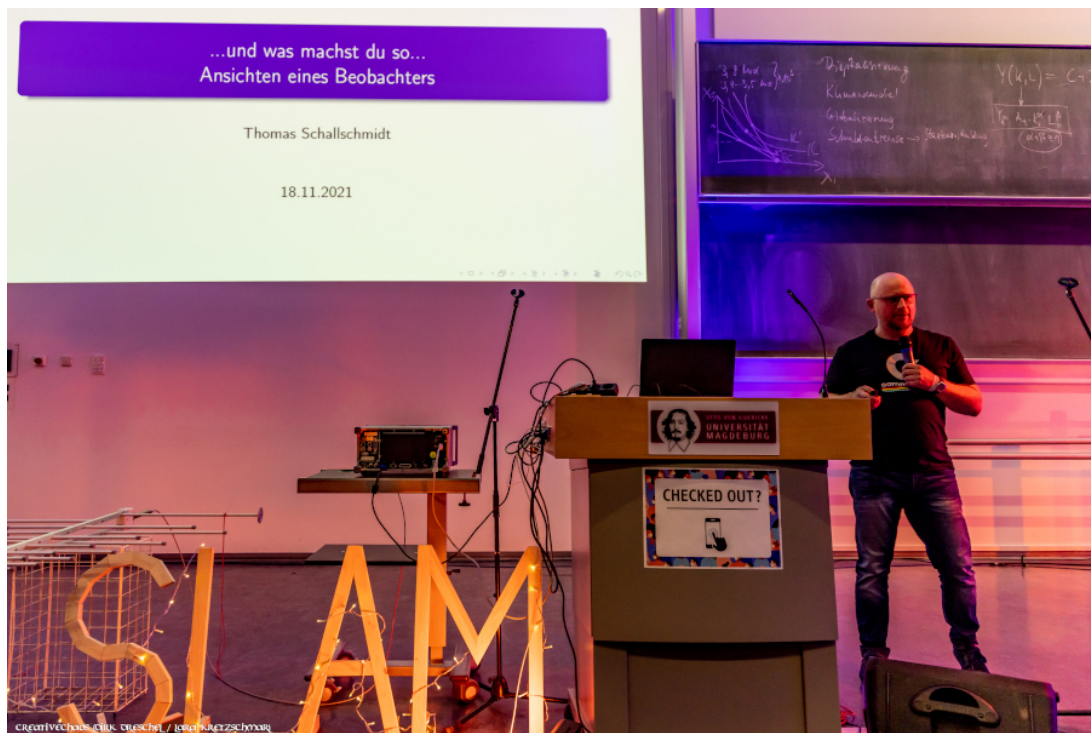


Abbildung 2.5: Dr.-Ing. Thomas Schallschmidt beim 8. Hörsaalslam der Ingenieure ohne Grenzen (Foto: Creative Chaos, Dirk Dreschel, Lara Kretzschmar)

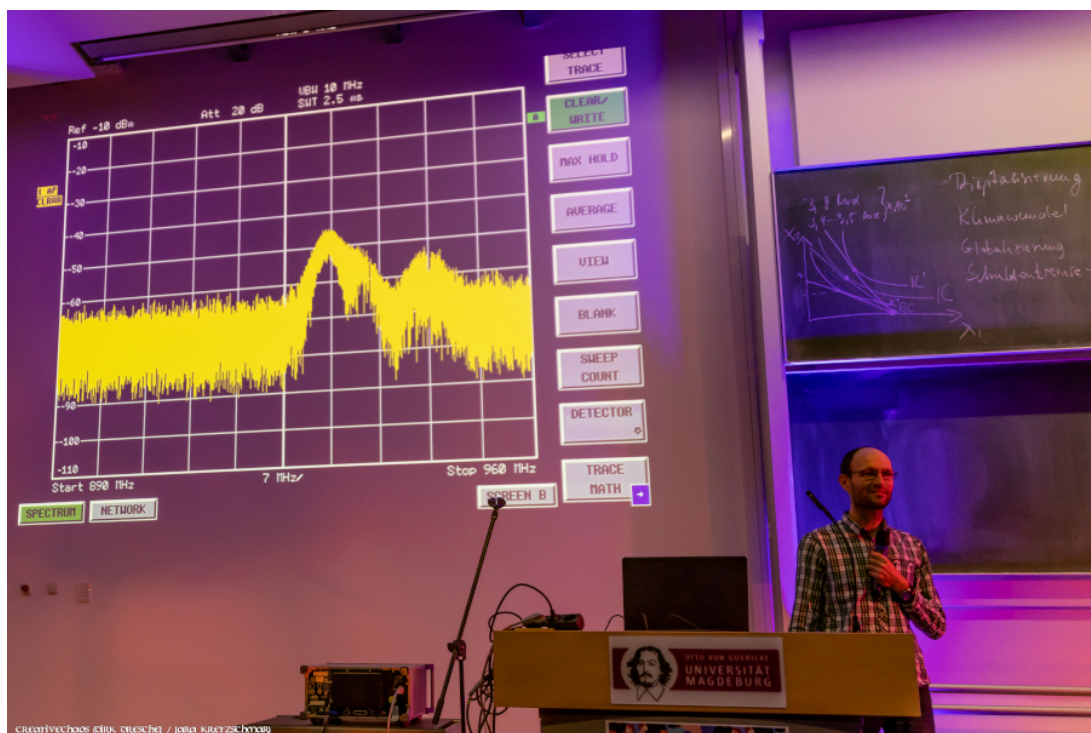


Abbildung 2.6: Dr.-Ing. Mathias Magdowski beim 8. Hörsaalslam der Ingenieure ohne Grenzen (Foto: Creative Chaos, Dirk Dreschel, Lara Kretzschmar)

Nach einer kurzen Pause und weiterer Live-Musik der Band wurde der Abend dann von einem Poetry Slam mit weiteren sechs kurzen lyrischen Darbietungen abgerundet. Ein großer Dank ergeht dabei an das Team der Ingenieure ohne Grenzen für die fantastische Organisation des großartigen Events, an Moderator Peer, die Band „Es bedarf an Helden“ sowie natürlich an das Live-Publikum im Hörsaal, dessen Spenden wohltätigen Zwecken der Ingenieure ohne Grenzen zukommen.

MINT-Aktionsvormittage mit den Magdeburger Stiftungsschulen⁹

Am 05., 07. und 08. Oktober besuchten uns jeweils eine 2. und 4. Klasse der Dreisprachigen Internationalen Grundschule sowie eine 6. Klasse des Internationalen Stiftungsgymnasiums aus Magdeburg zu einem MINT-Aktionsvormittag in der Experimentellen Fabrik.

Die Schüler*innen experimentierten dort in kleinen Gruppen von 2 bis 4 Kindern unter meist studentischer Anleitung an sieben verschiedenen MINT-Mitmachstationen. Dabei ging es z. B. um Elektrobaukästen, das Programmieren und Steuern von kleinen Robotern (Ozobot, Sphero und KUBO Robotics), um einen mechanischen Logik-Rechner (Turing Tumble), um das Austauschen von Nachrichten mit Morse-Codes oder um Interferenzen von Funkwellen. Dazu untersuchten die Kinder in der imposanten Absorberhalle des Lehrstuhls für Elektromagnetische Verträglichkeit wie Funkwellen von Antennen erzeugt und empfangen werden, wie sie sich ausbreiten und gegenseitig beeinflussen (siehe Abbildung 2.7).



Abbildung 2.7: Schnappschuss von den MINT-Aktionsvormittagen mit den Magdeburger Stiftungsschulen in der Absorberhalle in der Experimentellen Fabrik

Die Jungs und Mädels werden diese bisher ersten größeren MINT-Mitmachaktionen, die wir nach der Corona-Pause in der experimentellen Fabrik organisiert haben, sicher noch lange in guter Erinnerung behalten. Vielen Dank an alle studentischen Stationsbetreuer*innen und das Team der ExFa, das wir wieder dort Gast sein durften.

⁹von Dr.-Ing. Mathias Magdowski

Malen mit Robotern beim Maustüröffnertag am 03. Oktober¹⁰

Wie schon 2014 bis 2016 sowie 2018 beteiligte sich auch in diesem Jahr die Fakultät für Elektro- und Informationstechnik wieder beim „Türen Auf!“-Tag der Sendung mit der Maus. Am 3. Oktober konnten Kinder zwischen 6 und 12 Jahren unter dem Motto „Hallo Zukunft“ bei verschiedenen deutschlandweiten Angeboten verrückte Ideen, interessante Pläne, spannende Projekte und vieles mehr erleben.



Abbildung 2.8: Dr.-Ing. Thomas Schallschmidt beim „Malen mit Robotern“ beim Maustüröffnertag am 03. Oktober

Wir sind dabei mit der Aktion „RoboPicasso online“ bzw. „Malen mit Robotern“ der Frage nachgegangen, wie kreativ Menschen und Roboter zusammen malen können. Dazu packten wir golfballgroße Roboter farbdicht ein, ließen diese erst durch Farbe und dann über große weiße Blätter fahren und freuten uns über aufregende Zeichnungen (siehe Abbildung 2.8). Steuern konnten die Roboter bei der interaktiven Mitmachaktion insgesamt 36 Kinder in einer Zoom-Videokonferenz über das Internet. Die fertigen Bilder schickten wir den Teilnehmenden dann auf Wunsch per Post zu. Unsere Aktion verband somit kreative Gestaltung und Techniksensibilisierung auf innovative Art und Weise.

RoboPicasso und andere Mitmach-Experimente bei der Studienorientierungsmesse KickStart MINT im IGZ Barleben¹¹

Auf der jährlich stattfindenden Berufs- und Studienorientierungsmesse KickStart des Netzwerks SCHULEWIRTSCHAFT Sachsen-Anhalt können sich bereits seit 2008 junge Menschen über Berufs-, Ausbildungs-, und Karrieremöglichkeiten im naturwissenschaftlichen und technischen Bereich informieren. Bei der vorletzten Austragung 2019 konnten die Besucher*innen mehr als 70 Ausbildungsberufe und duale Studiengänge von 53 regionalen Ausstellern kennenlernen. Im letzten Jahr musste die Messe leider pandemiebedingt ausfallen, startete aber in diesem Jahr einen neuen Anlauf und wurde auf das gesamte Feld der MINT-Berufe erweitert.

¹⁰ von Dr.-Ing. Mathias Magdowski

¹¹ von Dr.-Ing. Mathias Magdowski

Diesjähriger Veranstaltungsort für die 12. KickStart MINT war das Innovations- und Gründerzentrum (IGZ) in Barleben. Die Messe war am Freitag, den 10.09.2021, von 09:00 Uhr bis 16:00 Uhr und am Samstag, den 11.09.2021, von 09:00 Uhr bis 14:00 Uhr für Besucher*innen geöffnet. Damit Einzelbesucher*innen und Schulklassen ein einfacher Messezugang gewährt wurde, gab es einen Bus-Shuttle-Service vom ZOB Magdeburg zum Veranstaltungsort.

In Kooperation mit der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg und dem Landesinstitut für Schulqualität und Lehrerbildung Sachsen-Anhalt (LISA) gab es zahlreiche MINT-Experimente und -Exponate in einem separat dafür freigestellten Bereich, an denen sich die Besucher*innen praktisch erproben und Erfahrungen sammeln konnten (siehe Abbildung 2.9). Dazu gehörten:

- der „Rettungswagen der Zukunft“ des Medizintechnik-Forschungscampus STIMULATE, in dem kleine Experimente zur Medizintechnik ausprobiert werden können.
- ein autonomes Lastenrad der Forschungsgruppe „AuRa – Autonomes Rad“, welches sich z. B. auf Geh- und Radwegen selbstständig orientieren und bewegen kann.
- das interdisziplinäre Team robOTTO der OVGU, das mit seinen Robotern bei internationalen Wettkämpfen antritt.
- das Team oTToCar der OVGU, das ein autonomes Auto im Maßstab 1:10 entwickelt.
- die Aktion „RoboPicasso“, die MINT-Sensibilisierung mit Kunst verbindet und der Frage nachgeht, wie kreativ Menschen und Roboter zusammen malen können.
- weitere MINT-Experimente der Fakultät für Elektro- und Informationstechnik



Abbildung 2.9: RoboPicasso und andere Mitmach-Experimente bei der Studienorientierungsmesse KickStart MINT im IGZ Barleben

Lernen mit Spaß in der Kinderakademie der Kinderstadt „Ottopia“¹²

Die Kinderstadt „Ottopia“ der Europäischen Jugendbildungsstätte Magdeburg ist ein Mitmach-Projekt, in dem Kinder komplexe gesellschaftliche Zusammenhänge aus der Erwachsenenwelt spielerisch erfahren können. In ihrer eigenen Stadt können sich die teilnehmenden Kinder in verschiedenen Gewerken ausprobieren, miteinander sowie voneinander lernen und natürlich viel

¹²von Dr.-Ing. Mathias Magdowski

Spaß haben. Erwachsene haben dabei nichts zu sagen, denn auch politische Entscheidungen werden gemeinsam von den Kindern getroffen. Neben ihnen dürfen auch nur die Betreuer*innen die Kinderstadt betreten, andere Erwachsene benötigen ein Besuchervisum. So entsteht ein städtisches Leben, das sich durch die Aktionen und Entscheidungen der 8- bis 12-jährigen Kinder selbst gestaltet und mit einer gewissen Eigendynamik weiterentwickelt. Dabei müssen sich die Kinder spielerisch mit demokratischen Entscheidungsprozessen und dem gesellschaftlichem Zusammenleben auseinandersetzen, wie z. B. Preise für ihre Produkte und Löhne für ihre Arbeit festlegen. Die Kinderstadt fand vom 16. bis 27. August in den letzten beiden Sommerferien-Wochen 2021 im Amtsgarten der Villa Böckelmann in Magdeburg Ottersleben statt und konnte dann von 10 Uhr bis 17 Uhr besucht werden.



Abbildung 2.10: Kleine Experimente mit einem Elektrobaukasten in der Kinderakademie der Kinderstadt „Ottopia“

Neben einem Rathaus, einer Stadtinformation, einer Post, einer Gärtnerei, einem Kinderkrankenhaus, einer Holzwerkstatt, einer Apotheke, einem Café und vielen anderen Gewerken gab es in der Kinderstadt auch eine Kinderakademie, in der die Kinder nacheinander in Kursen Abschlüsse als Bachelor, Master, Doktor*in und Professor*in erreichen konnten.

Beim Angebot der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg konnten die Nachwuchs-Studierenden der Kinderstadt Ottopia unter Anleitung von Dr.-Ing. Mathias Magdowski beispielsweise auch etwas über die Elektrotechnik lernen und direkt ausprobieren (siehe Abbildung 2.10):

- Was ist ein Stromkreis?
- Wie kann man mit einem Motor einen Propeller antreiben?
- Womit kann man mit einem Lautsprecher eine kleine Polizeisirene bauen?

Ebenso dabei war auch ein Angebot der „BlitzKitz“ der Stadtwerke Magdeburg, bei dem die Kinderstadt-Studierenden mit Solarzellen nachhaltigen und umweltfreundlichen Strom aus Sonnenlicht erzeugen und damit einen kleinen kühlenden Ventilator antreiben konnten. Außerdem konnten die Kinder mit Magneten experimentieren und testen, welche Materialien magnetisch sind, z. B. Eisen und Nickel, aber nicht Kupfer, Aluminium oder Edelstahl.

Neben der Elektrotechnik bzw. „Elektrik“ gab es in der Kinderakademie noch andere Studiengänge, welche sich die Kinder selbst ausgedacht haben oder die etwa von der Landesvereinigung Kulturelle Kinder- und

Jugendbildung Sachsen-Anhalt e. V. oder dem NABU Sachsen-Anhalt unterstützt wurden. Dazu zählten z. B. Kunst, Geographie, Nachhaltigkeit, Medizin oder Englisch, für welche die Kinder entsprechende „Studiengebühren“ in der Kinderstadt-Währung „Topi“ festgelegt hatten. Auch in Ottopia zahlte sich ein Studium nicht nur geistig sondern auch finanziell aus, denn mit dem Abschlusszeugnis in der Tasche konnten die Kinder in den anderen Gewerken meist mehr Lohn bekommen. Alle Kinderakademie-Absolvent*innen wurden dann in einer kleinen Zeremonie mit Doktorhüten beglückwünscht und in der „Zeitschrift für Studenten“ eingetragen und verewigt.

Leider ging die Kinderstadt nach zwei Wochen zu Ende und alle beteiligten warteten sicher sehnsüchtig auf eine hoffentlich neue Ausgabe im nächsten Jahr, die auch gern wieder von unserer Fakultät bzw. der „echten“ Otto-von-Guericke-Universität unterstützt wird.

Roboter-Experimente und Wasserraketen-Flugversuche für kleine Nachwuchsstudierende bei den Campusferien 2021¹³

Die Campusferien sind ein etabliertes Angebot an der OVGU, bei dem die Grundschulkinder von Universitätsangehörigen in den ersten zwei Sommerferienwochen spannende Angebote an der Universität besuchen können. Die Campusferien fanden in diesem Jahr vom 26.07. – 06.08.2021 statt. Es gab zwei verschiedene Gruppen für Kinder im Alter von 6 bis 11 Jahren.

Die erste Gruppe „Erforschen & Entdecken“ besuchte jeweils am Dienstag- und Mittwochnachmittag ein Workshopangebot der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik rund um die Themen Roboter, Elektrotechnik, Medizintechnik, Flugzeuge und Wasserraketen, das von den Kollegen Dr.-Ing. Thomas Schallschmidt vom Lehrstuhl für Elektrische Antriebssysteme und Dr.-Ing. Mathias Magdowski von Lehrstuhl für Elektromagnetische Verträglichkeit betreut wurde.



Abbildung 2.11: Sehen so die potentiellen Ingenieur*innen der Zukunft aus? Die Campusferien-Kids der OVGU besuchten die Experimentelle Fabrik und haben dort Wasserraketen gebastelt.

An einem der beiden Nachmittage gab es jeweils ein Angebot mit mehreren Stationen, an denen die Kindern in kleinen Gruppen für jeweils 20 Minuten basteln und spielerisch experimentieren konnten.

¹³von Dr.-Ing. Mathias Magdowski

Beim Früchtememory des Forschungscampus STIMULATE konnten die Kinder Bilder von Früchten zu den zugehörigen Schnittbildern aus dem Magnetresonanztomograf oder Computertomograf zuordnen und so spielerisch etwas über die medizinische Bildgebung erfahren.

Der Ozobot an der zweiten Station ist ein kleiner Roboter, der schwarze Linien entlang fährt und sich durch farbige Muster 'programmieren' lässt. Das ist sehr intuitiv und funktioniert am besten, wenn die Kinder es sich nach kurzer Erprobung gegenseitig erklären.

An der dritten MINT-Mitmachstation konnten die Campusferien-Kinder einen weiteren Roboter ausprobieren. Der KUBO-Roboter fährt über spezielle Kacheln und lässt sich so auf eine bestimmte Strecke programmieren, z. B. einen bestimmten Weg entlang einer Spielfläche.

Wie kann man mit Möhren Musik machen und warum braucht man dazu (ein bisschen) Strom? Das konnten die Campusferien-Kids an Station Nr. 4 mit einem Makey Makey ausprobieren und ein Möhrenpiano bauen.

Selbst eine kleine Schaltung bauen, die z. B. einen Propeller fliegen oder eine Sirene ertönen lässt - das konnten die Campusferien-Kids an der fünften Station mit einem Elektrobaukasten erproben.

An der sechsten Station ging es um folgende Frage: Wie kann man mit rollenden Sphero-Robotern Minigolf spielen und trifft der Roboter (fast) immer, wenn man ihn einmal genau programmiert hat?

„Ich leuchte mit meiner Diode“ hieß es dann an Station Nr. 7. Hier konnten die Kinder ihre Feinmotorik testen, eine kleine Schaltung auf einem Steckbrettchen bauen, eine LED zum Leuchten bringen und prüfen, welche Materialien alle den elektrischen Strom leiten.

Am zweiten Nachmittag ging es dann um Wasserraketen, die nicht einfach nur „gebastelt“, sondern auch entworfen, konstruiert, prototypenartig gefertigt sowie gestaltet und im Experiment erprobt wurden, siehe Abbildung 2.11. Wie die „echten“ Ingenieur*innen haben sich die angehenden Nachwuchs-Studierenden dann auch über ihre Ergebnisse ausgetauscht. Nach der Konstruktions- und Bauphase ging es dann gemeinsam zur mobilen Raketenabschussbasis, an der die Campusferien-Kids zuerst den nachhaltigen Raketentreibstoff, also Wasser, einfüllten und ihre selbstgebaute Rakete zum Abschuss bereit machten. Nach einem kurzen Countdown flogen die Raketen dann nacheinander in den sonnigen Magdeburger Sommerhimmel.

Ein großes Dankeschön Medizintechnik-Studentinnen Katharina, Janine und Darya, an die angehenden Wirtschaftsingenieure Nikolai und Maxim sowie die Hiwis Markus, Oliver und Anne Marie für die engagierte Unterstützung und an die Universitätsbibliothek der OVGU, dass wir dort Campusferien-Gast sein durften.

An den anderen Tagen gab es Workshops und Angebote zum Erstellen von Umfragen an der Fakultät für Humanwissenschaften, eine Schnitzeljagd zur virtuellen Realität vom Fraunhofer IFF, Knobelaufgaben zur Mathematik, Temperaturmessungen in der Verfahrenstechnik, Informationen zum Immunsystem und zur Blutspende in der medizinischen Fakultät sowie physikalische Phänomene im Tierreich in der Physik.

Die zweite Gruppe konnte gemeinsam mit Informatiker*innen im „ChocLab“ erste Programmiererfahrungen sammeln. In analogen Übungen und kleinen Bastelprojekten versuchten die Kinder gemeinsam zu verstehen, wie Computer und die darin ablaufenden Algorithmen funktionieren. Dabei wurden einfache Programme für den micro:bit, den LEGO-WeDo-Baukasten und den Roboter von Robo-Wunderkind erstellen und ausprobiert.

Schnupper-Laborpraktikum mit Schüler*innen des Domgymnasiums Magdeburg zu den Grundlagen der Elektrotechnik am 16. Juli 2021¹⁴

Wie misst man Strom, Spannung, Widerstand und Leistung? Wie benutzt man ein Digitalspeicheroszilloskop? Wie verhalten sich Halbleiterbauelemente wie Dioden? Was passiert bei Wechselstrom an Spulen und Kondensatoren? Diesen und weiteren Fragen sind 14 Schüler*innen vom ökumenischen Domgymnasium aus Magdeburg in einem Schnupper-Laborpraktikum zu den Grundlagen der Elektrotechnik nachgegangen. Die Laborversuche fanden unter studentischer Anleitung am Freitag, den 16. Juli 2021 im Rahmen einer Naturwissenschaftswoche der Schüler*innen statt.

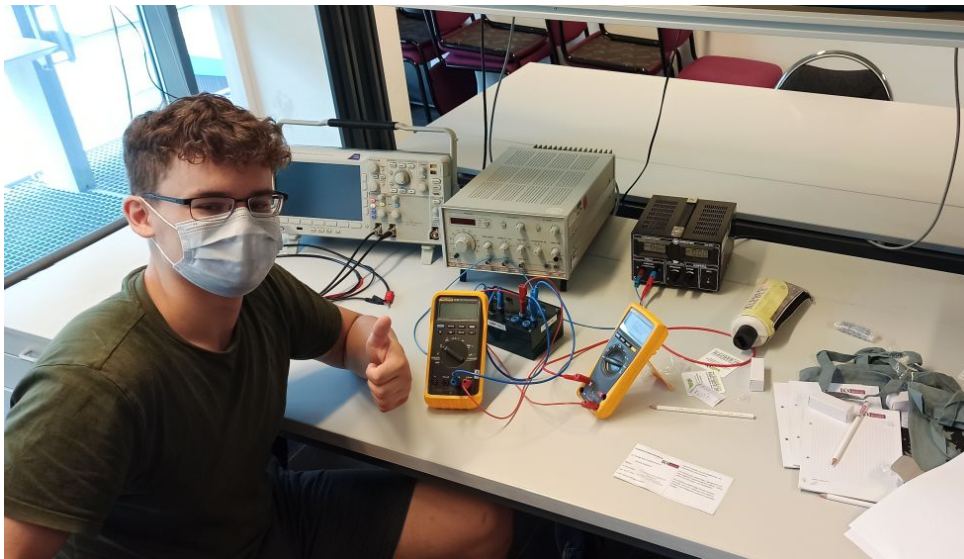


Abbildung 2.12: Schnupper-Laborpraktikum mit Schüler*innen des Domgymnasiums Magdeburg zu den Grundlagen der Elektrotechnik

In Dreiergruppen experimentieren die Schüler*innen zu den Themen:

- Kennlinien von Diode und Z-Diode
- Elektrische Bauelemente und einfache elektrische Schaltungen, untersuchen, verstehen, anwenden
- Experimentelle Untersuchung von Wechselstromwiderständen

Auf die Versuche bereiteten sich die Schüler*innen bereits in der Schule mit entsprechenden Versuchsanleitungen vor. Nach einer kurzen Arbeitsschutzbelehrung konnten sie dann selbst Schaltungen aufbauen, die Labornetzteile einschalten und praktisch mit Multimetern sowie Oszilloskopen messen und experimentieren, siehe Abbildung 2.12. Studierende der Bachelorstudiengängen „Elektrotechnik und Informationstechnik“ sowie „Mechatronik“ unterstützten die Schüler*innen dabei und konnten so ihr eigenes Wissen direkt anwenden und weitergeben.

Neben den elektrotechnischen Experimenten wurden auch Informationen zum Studieren an der OVGU gegeben, so dass vielleicht in ein paar Jahren einige der jetzigen Schüler*innen selbst als Studierende ein solches Schnupperpraktikum betreuen werden.

¹⁴ von Dipl.-Ing. Marco Schwerdtfeger

Roboter-Minigolf und ein Rechner aus Murmeln beim MINT-Projekttag mit dem Siemensgymnasium am 19.07.2021¹⁵

Nach einer langen pandemiebedingten Pause gab es am Montag, den 19. Juli 2021, seit mehr als einem Jahr mal wieder einen MINT-Projekttag an der Fakultät für Elektro- und Informationstechnik. Etwa 30 Schüler*innen aus den 11. Klassen des nicht weit entfernten Werner-von-Siemens-Gymnasiums statteten der Fakultät einen Besuch ab und experimentierten in kleinen Gruppen an verschiedenen Stationen zum Thema Robotik, Elektronik und Informatik. Pandemiekonform fanden alle MINT-Mitmachaktionen im Außenbereich vor der Experimentellen Fabrik statt.



Abbildung 2.13: Roboter-Minigolf mit Dr.-Ing. Thomas Schallschmidt beim MINT-Projekttag mit dem Siemensgymnasium am 19.07.2021

An der ersten Station konnten die Schüler*innen kleine Ozobots ausprobieren, die man per Tablet-PC oder über selbstgezeichnete Farbmuster entlang schwarzer Linien steuern und programmieren kann. Die Muster werden dann über Sensoren an der Unterseite der Roboter erkannt und von der Steuerungseinheit in entsprechende Ansteuerbefehle für die Motoren umgesetzt.

Bei der zweiten Station ging es um das sogenannte „Turing Tumble“, einen Experimentierkasten, mit dem man Schaltkreise und Logikgatter mechanisch nachbauen kann. Der Elektronenfluss wird durch Murmeln modelliert, die antreibende Spannung durch die Schwerkraft nachgebildet. Statt Drähten und Transistoren gibt es Wippen und Weichen. Kommt eine Murmel unten an, wird oben automatisch eine neue gestartet. Damit lassen sich ganze Zähler, Register und Rechenwerke nachbauen.

An Station Nr. 3 konnten die Schüler*innen mit einem Elektrobaukasten auch den „echten“ elektrischen Strom ausprobieren. Aus Batterie und Glühlampe lässt sich ein Grundstromkreis bauen, mit einem kleinen Motor ein Propeller betreiben und mit Hilfe entsprechender Mikrocontroller lassen sich auch Töne erzeugen und über einen kleinen Lautsprecher ausgeben.

Die vierte und letzte Station beim MINT-Aktionstag drehte sich um die golfballgroßen Sphero-Roboter, die sich ebenso per Smartphone-App steuern und programmieren lassen. Damit lässt sich z. B. ein elektronisch gesteuertes Minigolf-Duell spielen, siehe Abbildung 2.13. Digital gezielt

¹⁵von Dr.-Ing. Mathias Magdowski

und geschlagen wird über die Bildschirmsteuerung auf einem Tablet-PC oder über die integrierten Beschleunigungssensoren in einem Smartphone, das dann wie ein gedachter Golfschläger gehalten und geschwungen wird.

Die Schüler*innen waren mit großem Interesse dabei, hatten viel Spaß beim Experimentieren und sicherlich auch den einen oder anderen Aha-Effekt, wo doch überall Elektro- sowie Informationstechnik drin steckt und praktische Verwendung findet. Zwischen den Aktionen gab es auch die Möglichkeit, den Campus zu erkunden, die studentischen Verpflegungsmöglichkeiten in der Mensa zu testen oder Fragen zum Studium an der OVGU direkt an aktuelle Studierende zu stellen, so dass alle den Tag bestimmt in guter Erinnerung behalten. Ein besonderer Dank gilt deshalb insbesondere unseren Studenten Maximilian Hollenbach und Marcus Nagel für die engagierte Unterstützung.

Technisches Wissen digital erleben beim Zukunftstag 2021¹⁶

Nachdem der Zukunftstag im letzten Jahr aufgrund des Pandemiegeschehens ausfallen musste, freuten wir uns, dass man sich in diesem Jahr dazu entschieden hatte, den Zukunftstag unter angepassten Bedingungen am 22.04.2021 stattfinden zu lassen.

Der Zukunftstag bot dabei unter den Namen Girls- und Boys' Day einzigartige Möglichkeiten der Berufsorientierung. Die Fakultät hatte dazu informative und interaktive digitale Angebote vorbereitet (siehe auch Abbildung 2.14):

- Das Stromnetz im Gleichgewicht halten
- Ich leuchte mit meiner Diode
- Live-Show aus dem CT-Labor
- Live-Versuche im MRT-Labor
- Virtuelle Experimente rund um die Elektrotechnik

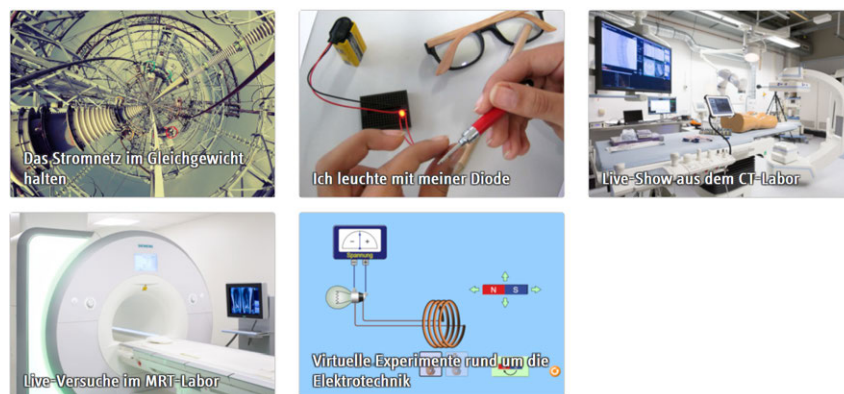


Abbildung 2.14: Digitale Studieninformationsangebote zum Zukunftstag 2021

Je nach Format wurde die Workshops- und Online-Demonstrationen von etwa 10 bis 300 Schüler*innen besucht. Notwendige Experimentierkits bekamen die interessierten Jugendlichen vorher postalisch zugesandt. Ähnliche Workshops wurden auch im Rahmen einer „Inspiration Week“ der „Digitalen Drehtür“ im März und Dezember 2021 sowie beim digitalen Studieninformationstag am 25.03.2021 angeboten und erreichten auch dort ein ebenso überregionales Publikum.

¹⁶von Dr.-Ing. Mathias Magdowski

2.5.5 Preise

Tägliches Quiz zu den Grundlagen der Elektrotechnik bei Instagram als Best-Practice-Beispiel vom Stifterverband ausgezeichnet¹⁷

Zum Thema „MINTeinander im Dialog – Neue Wege in der Wissenschaftskommunikation“ suchten der Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft e. V. und der Club MINT im Rahmen einer dritten MINTchallenge nach Lösungen für anschauliche und spannende WissKomm-Formate in den MINT-Fächern. Dabei lag ein besonderer Fokus auf Ideen, mit denen MINT-Fachwissen einer breiten Öffentlichkeit vermittelt werden kann, um stärker mit der Gesellschaft in Dialog zu treten, Wissen zu teilen und Begeisterung für MINT-Themen zu schaffen.



Abbildung 2.15: Beispielfrage- und -antwort beim täglichen „dailyGETquiz“ zu den Grundlagen der Elektrotechnik bei Instagram

Dabei wurde das Format „dailyGETquiz“ der Fakultät für Elektro- und Informationstechnik an der Otto-von-Guericke-Universität in Magdeburg als eines von zehn Best-Practice-Beispielen ausgezeichnet. Dahinter steckt ein Instagram-Kanal mit einem täglichen Quiz zu den Grundlagen der Elektrotechnik, der von Mathias Magdowski vom Lehrstuhl für Elektromagnetische Verträglichkeit am Institut für Medizintechnik initiiert wurde.

Kernidee und Zielsetzung Mathias Magdowski betreibt seit dem 1. Oktober 2020 den Instagram-Kanal dailyGETquiz auf dem er täglich in den Stories ein öffentlich einsehbares Quiz zu den Grundlagen der Elektrotechnik (GET) postet und die Lösung in einer weiteren Story Slide kurz erklärt, siehe Abbildung 2.15. Das Quiz besteht jeweils aus einer knapp formulierten Single-Choice-Frage mit zwei bis vier Antwortmöglichkeiten, die inhaltlich möglichst praxisnah, anwendungsbezogen und alltagsrelevant ausgerichtet ist. In der Auflösung werden in wenigen

¹⁷ von Dr.-Ing. Mathias Magdowski

Sätzen (Lesezeit maximal 10 bis 15 Sekunden) den Hintergrund allgemein verständlich und möglichst ohne Fachbegriffe erklärt.

Passend zum Charakter des sozialen Netzwerk Instagram werden die Quiz- und Antwort-Slides mit passenden Fotos, Videos oder Grafiken gestaltet.

Erfolgs- und Risikofaktoren/Übertragbarkeit Zielgruppe sind primär Studierende an der Otto-von-Guericke-Universität in Magdeburg. Unter den Follower*innen befinden sich mittlerweile knapp 180 Abonnent*innen, die auch von anderen Hochschulen, Schulen oder aus der interessierten Öffentlichkeit kommen. Das Format holt Studierende/Schüler*innen dort in den sozialen Medien ab, wo sie mit ihren digitalen Endgeräten unterwegs sind, und wird dementsprechend sehr gut angenommen. Bei der Fragerstellung wird versucht, die Community mit einzubinden.

Zu den Risiken des Formats zählen die allgemeinen datenschutzrechtlichen Gefahren von öffentlichen sozialen Medien. Die von den Studierenden geteilten Daten wie ihr (möglicherweise anonymer oder pseudonymer) Name sowie die täglich gegebene Antwort würden aber auch in hochschulinternen Lernmanagementsystemen anfallen und werden bei Instagram auch nicht dauerhaft sondern nur wenige Tage gespeichert.

Übertragen lässt sich das Format ohne weiteres auf andere Fächer, Lehrveranstaltungen oder Themengebiete sowie an andere Hochschulen oder Universitäten. Eine solche Übertragung an andere Institutionen bei gleicher Themenwahl ist aber nicht sinnvoll, da ein globales soziales Netzwerk wie Instagram natürlich nicht regional eingeschränkt ist. Stattdessen wäre es sinnvoll, wenn Lehrende unterschiedlicher Hochschulen mit ähnlichen Lehrveranstaltungen gemeinsame Quiz-Kanäle betreiben.

Finanzierung/Ressourcen Das Format benötigt nur wenig finanzielle Ressourcen. Als Sachmittel braucht man ein digitales Endgerät, also ein Smartphone oder Tablet-PC zum Erstellen der Story Slides. Zusätzlich nutzt Herr Magdowski eine externe Tastatur zum schnelleren Tippen gegenüber der Bildschirmtastatur. Außerdem benötigt man natürlich Zeit zum Ausdenken und Formulieren der Fragen, zur Recherche von passenden lizenzfreien Bilder zur Pflege der Community und zur Beantwortung von Fragen. Hierfür werden pro Tag etwa 30 Minuten gebraucht.

Nachhaltigkeit/Verstetigung Nach einem Jahr mit 365 Fragen und zum Beginn eines neuen Studienjahres würde Herr Magdowski diese Arbeit aber gern an eine Assistenz abgeben, um sich neuen Aufgaben zu widmen und neue Formate zu entwickeln. Trotzdem möchte er die bestehende Community natürlich weiter pflegen. Eine finanzielle Förderung durch einen Sponsor oder eine Stiftung würde dafür mehr Planungssicherheit geben.

Testimonials der Studierenden

- „Hallo Herr Magdowski, tolle Idee mit dem Account!“
- „Hallo, Ich wollte Ihnen rückmelden, dass ich die Idee von diesen Kanal sehr cool finde. So hat man jeden Tag eine kurze Wiederholung vom gelernten Wissen. Danke, dass Sie sich die Mühe für diesen machen.“
- „Finde die täglichen Rätsel echt super!“
- „Super Frage, hab ich so noch nie darüber nachgedacht!“
- „Vielen Dank für die tollen Fragen!“

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.

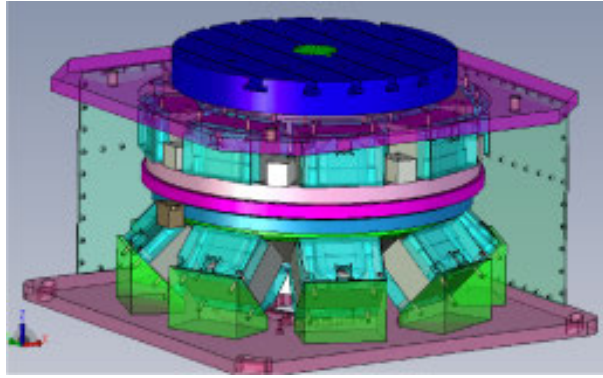


Abbildung 3.1: Magnetisch gelagerter Rundtisch

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.

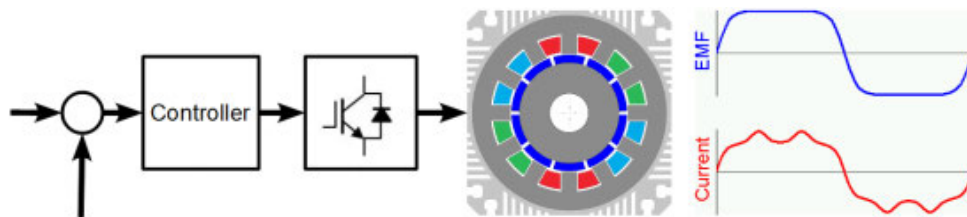


Abbildung 3.2: Regelung von Maschinen nicht sinusförmiger elektromotorischer Kraft

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, Kugelumformtrieb, Zahnriemen, Kurbeltrieb etc. an die Arbeitsmaschine angepasst.

Mechanische Übertragungssysteme sind durch ihren Verschleiß und die damit verbundene Wartung gekennzeichnet. 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

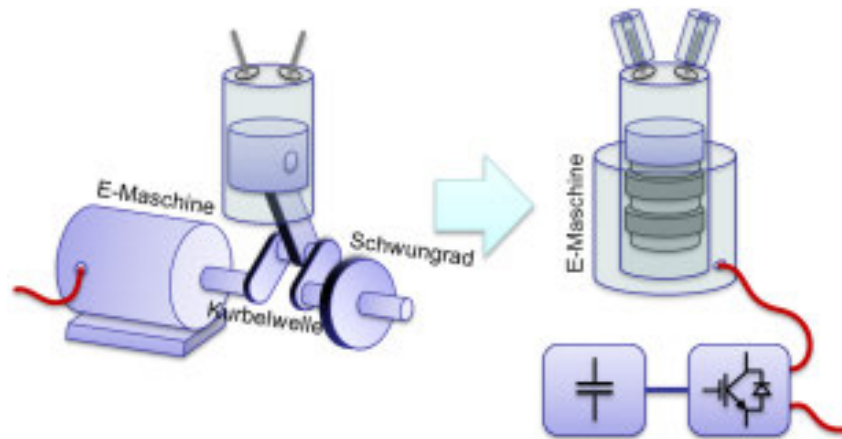


Abbildung 3.3: Einsatz von elektrischen Linearmaschinen bei Verbrennungsmotoren

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.

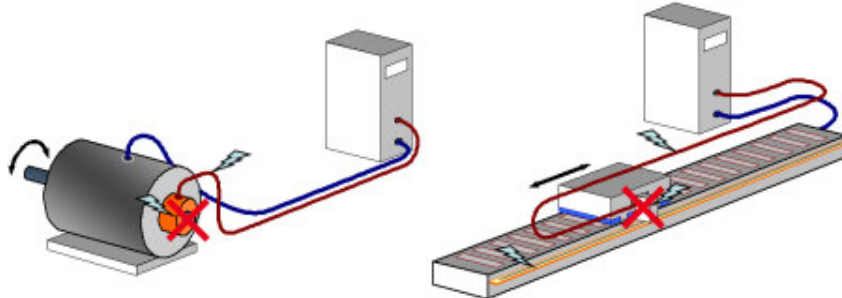


Abbildung 3.4: Sensorlose Regelung elektrischer Maschinen

3.1.2 Forschungsprojekte

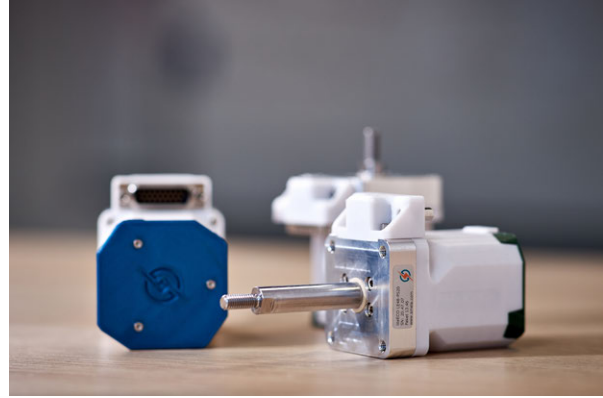
SMELA – 2. Platz unter den Top 50 Start-ups Deutschlands¹

Dr.-Ing. Denis Draganov, Benjamin Horn und Oleksandr Tyshakin, alles wissenschaftliche Mitarbeiter des Lehrstuhls für elektrische Antriebssysteme, entwickelten 2017 einen neuartigen Linearantrieb, der elektrische und mechanische Komponenten intelligent vereint und damit die kompakteste Plug&Play-Alternative zu pneumatischen Zylindern bildet. Um diese neuartige Idee hauptberuflich weiter zu entwickeln und zu vermarkten, entschlossen sie sich dann zur Gründung eines Start-ups. Der Name des Unternehmens war schnell gefunden SMELA (Smart Electric Actuators). Unterstützung erhielten sie vom TUGZ der Universität und weiteren Fördermöglichkeiten.

¹von M. Sc. Benjamin Horn, Andrea Wohner



(a) 2. Platz für SMELA mit B. Horn, D. Draganov, O. Tyshakin und F. Pflugfelder



(b) neue Aktoren

Abbildung 3.5: SMELA (Smart Electric Actuators)

Neben vielen weiteren Auszeichnungen in den folgenden Jahren, wie den Hugo-Junkers-Preis, dem IQ-Innovationspreis Magdeburg 2020, dem bundesweiten Gründungswettbewerb start2grow sowie dem bundesweit größten Businessplan-Wettbewerb Science4Life im Bereich Energie, wurden sie nun auch in dem von der FAZ und dem Magazin Für-Gründer.de ausgelobten Wettbewerb der besten 50 Top Start-ups Deutschland mit dem 2. Platz belohnt, siehe Abbildung 3.5.

Damit bestätigt sich die positive Entwicklung des Magdeburger Jungunternehmens in den vergangenen 3 Jahren.

„Unter die Top 50 der deutschen Start-ups gewählt zu werden, macht uns sehr stolz und bestätigt uns auf unserem aktuellen Kurs, welcher nun vom Start-up-Projekt zum Unternehmen führt. Wir haben von Beginn an gemeinsam mit unseren Pilot-Kunden einen praxistauglichen elektrischen Antrieb entwickelt. Nun sind wir bereit diese Lösung auch vielen weiteren Industriepartnern zur Verfügung zu stellen“, so Benjamin Horn.

Die SMELA GmbH ist seit dem 2. September 2020 nun auch ein eingetragenes Unternehmen im Handelsregister. Damit hat das Gründertrio nach langer Vorarbeit aus ihrem Gründungsprojekt ein erfolgreiches Unternehmen geschaffen.

Unser Lehrstuhl freut sich, dass das junge Unternehmen mit seinen ehemaligen wissenschaftlichen Mitarbeitern erfolgreich in den Markt einsteigt. Herzlichen Glückwunsch.

Investigations for a Trajectory Variation to Improve the Energy Conversion for a Four-Stroke Free-Piston Engine ²

Internal combustion engines with a crankshaft have been successfully developed for many years. They are lacking in the fact that the piston trajectory, i.e., position as a function of time, is limited by the crankshaft motion law. Position-controlled electric linear machines directly coupled to the piston allow to realize free-piston engines. Unlike the crankshaft-based engines, they allow for a higher degree of freedom in shaping the piston trajectory, including adaptive compression ratios, which enables optimal operation with alternative fuels. The possibility of adapting the stroke course results in new degrees of freedom with which the combustion process can be optimized. In this work, four-stroke trajectories with different amplitudes and piston dynamics have been proposed and analyzed regarding efficiency. A simulation model was created

²Authors: Robin Tempelhausen, Andreas Gerlach, Sebastian Benecke, Kevin Klepatz, Roberto Leidhold and Hermann Rottengruber

based on experimental measurements for testing the proposed trajectories. It could be proved that the variation of the trajectory resulted in an improvement of the overall efficiency. The trajectories were described analytically so that they can be used for a prototype in a future work.

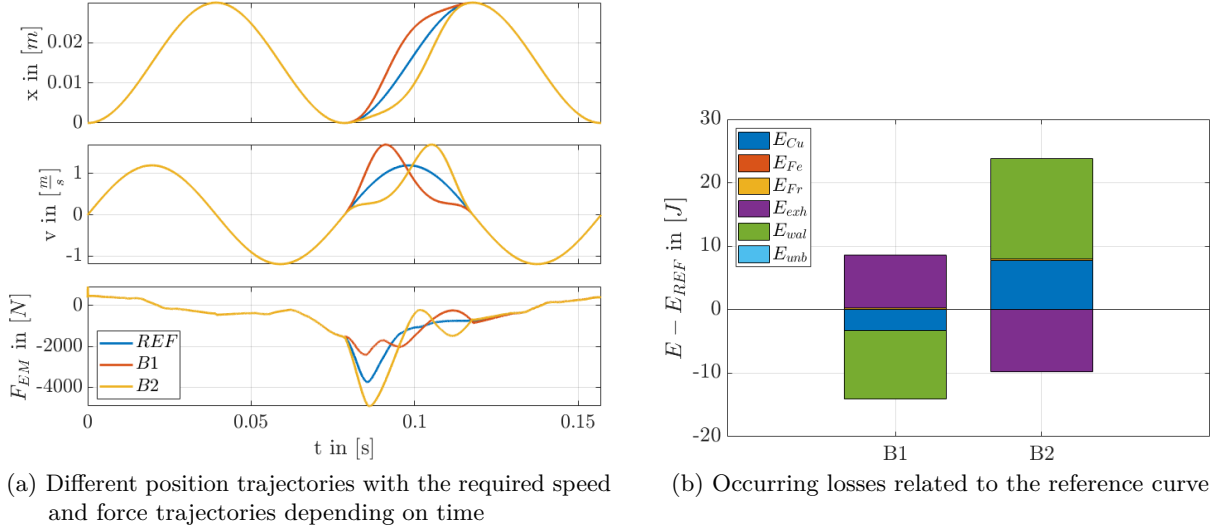


Figure 3.6: Investigations for a Trajectory Variation to Improve the Energy Conversion for a Four-Stroke Free-Piston Engine

Figure 3.6a shows a conventional trajectory and two changes in the course of the stroke. For comparison, the position x , the speed v and the force of the electric machine F_{EM} are shown. Each trajectory causes different losses. The copper losses E_{Cu} , the iron losses E_{Fe} , the friction losses E_{Fr} , the exhaust gas losses E_{exh} , the cylinder wall losses E_{wal} , and the losses due to unburned energy were examined. The losses are shown in Fig. 3.6b. The results show that a variation of the trajectory leads to a change in the losses and thus the overall efficiency can be influenced.

On the Estimation Error of Position Sensorless Control of PM Synchronous Motors³

Using three-phase four-wire drive topologies can realize sensorless control with high accuracy and stability in the full range of the operation speed. However, there still exists errors between the estimated and actual rotor position as shown in Fig. 3.7, while the reason of it remains unclear.

In this study, the influence of several key parameters of the four-wire drive system on the rotor position estimation error has been studied. Here a saliency based sensorless method using a zero-sequence carrier is considered. Based on the theoretical analysis, there exists a relationship between the current ripple on three phase currents and the estimation error of the rotor position. Through analysis of a simulation model with LRC load, the change of modulation ratio (m), neutral capacitance (C_{nN}) and switching frequency (f_s) can seriously influence the estimation error.

Afterwards, all the simulation analysis was validated on a practical electric drive system with a permanent magnetic synchronous motor. Besides, variable switching frequency PWM (VSFPWM) is also applied to further increase the accuracy of the rotor position estimation. It is proved that the current ripple surely affects the estimation significantly. The specific comparison of the estimation error between the drives with different parameters are presented in Table. 3.1.

³from Dr.-Ing. Zhao Zhao and Prof. Dr.-Ing. Roberto Leidhold

This study also paves the way of a further theoretical research of the relationship between the current ripple and estimation error, and thus lays the foundation of an optimized parameter selection for the drives using the position sensorless control strategy.

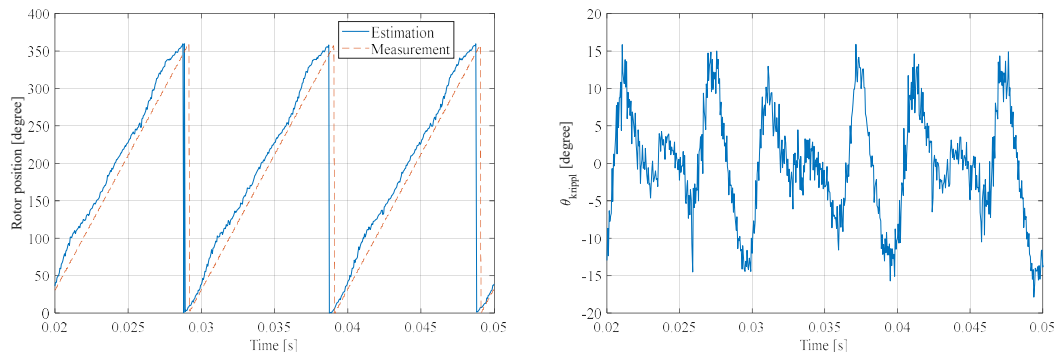


Figure 3.7: Comparison between the estimated and measured rotor position (left), and the corresponding estimation error (right)

Table 3.1: Comparison of the estimation error for different parameters.

m	f_s (kHz)	C_{nN} (μF)	RMS error ($^\circ$)
0.43	10	0.047	8.27
0.43	10	0.1	6.73
0.84	10	0.047	12.1
0.84	10	0.1	9.53
0.43	8	0.047	5.15
0.43	8 (VSFPWM)	0.047	4.61

MicroDrives⁴

Ziel des Projekts ist die Entwicklung eines permanent erregten Synchronmotors für Kleinantriebe (im Bereich von 10 W bis 1 kW) in einer sehr einfachen konstruktiven Ausführung, um den Herstellungsaufwand gegenüber gängigen Motoren zu reduzieren. Es ist zu erwarten, dass die Produktionszeit bzw. -schritte um ca. 30 % reduziert werden. Gleichzeitig sollen der Wirkungsgrad und die Leistungsdichte vergleichbar mit dem Stand der Technik sein oder diesen sogar übertreffen. Die Lösungsmethode basiert auf einer speziellen Motorausführung bestehend aus drei Steckspulen und einem neuartigen, spritzgegossenen Rotor auf Basis eines magnetischen Verbundwerkstoffes (bspw. isotropes Neodym), welcher über ein äußeres Magnetfeld bereits während des Einspritzvorgangs teil- bzw. vollständig magnetisiert wird.

Anders als bei bisherigen Ansätzen mit ähnlichen Spulenausführungen bleibt hier nur ein geringes Rastmoment von ca. 2 % bestehen. Die neue Motorausführung erlaubt daher einen flexiblen und günstigen Produktionsprozess und ist für verschiedenste Nutzer von kompakten Elektromotoren, beispielsweise in der Medizintechnik oder der Automobilindustrie, von großem Interesse. Der prinzipielle Aufbau der geplante Entwicklung ist in Abbildung 3.8 dargestellt.

Die drei Wicklungen sollen getrennt vom Stator auf einen Spulenkörper in einem einfachen Verfahren aufgewickelt und anschließend auf die Statorzähne aufgesteckt werden. Dieses Vorgehen vereinfacht nicht nur wesentlich die Produktion, sondern ermöglicht auch die höchstmögliche Wicklungsdichte (bei weiterhin vergleichbarer Leistung und Gleichlauf). Der Rotor selbst wird aus

⁴von Dr.-Ing. Thomas Schallschmidt

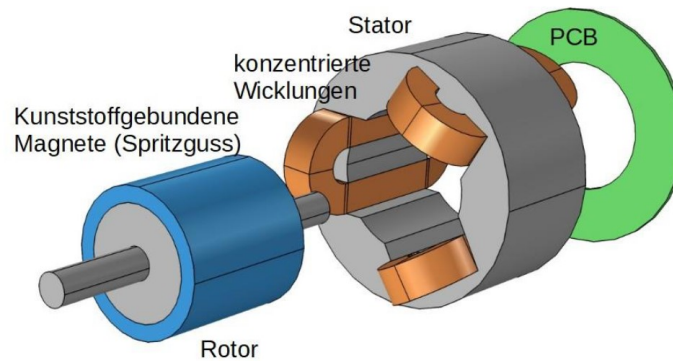


Abbildung 3.8: Schematische Darstellung des Entwicklungsgegenstands

magnetischen Verbundwerkstoffen (bspw. isotropes Neodym) im Spritzgussverfahren hergestellt und über ein äußeres Magnetfeld magnetisiert. Hierzu wird im Rahmen des Projekts eine spezielle Magnetisierungsvorrichtung entwickelt. In einem ersten Schritt soll der spritzgegossene Rotor in die externe Vorrichtung eingebracht und dann nachträglich vollständig magnetisiert werden. In einem späteren Entwicklungsstadium ist geplant, dass der Rotor bereits während des Einspritzvorgangs teil- bzw. vollständig magnetisiert werden kann.

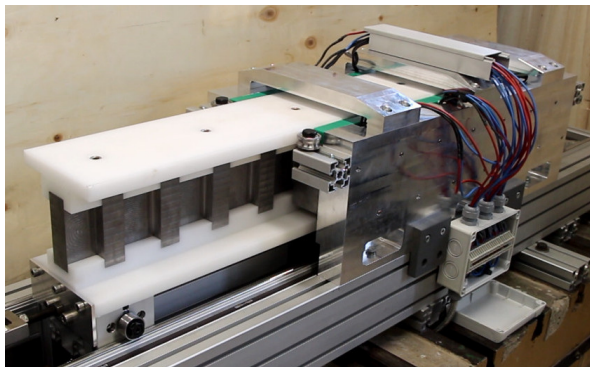
Das Projekt hat eine Laufzeit von 2 Jahren und ist über das Bundesförderprogramm „Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie als FuE-Kooperationsprojekt finanziert. Neben dem Lehrstuhl für elektrische Antriebssysteme der OVGU sind noch 2 Unternehmen beteiligt. Die 1A Autenrieth Kunststofftechnik GmbH & Co. KG bringt im Projekt fundiertes Wissen in allen Bereichen der Spritzgießtechnik mit ein und wird durch das Know-how im Elektromaschinenbau der Elektro-Gerätebau Hambrücken GmbH ergänzt. Die Projektabwicklung wird zusätzlich durch die Innoscripta GmbH begleitet.

Ringsegmentgenerator⁵

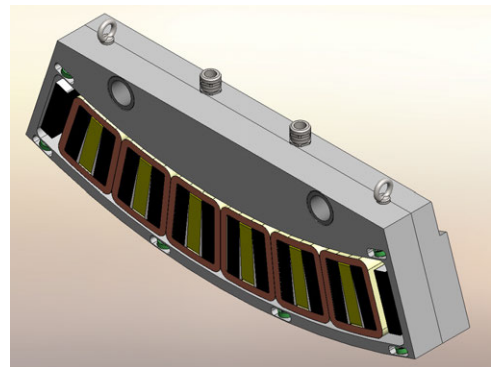
Im Rahmen des Forschungsprojektes RING-GEN wurde am Lehrstuhl für elektrische Antriebssysteme in Zusammenarbeit mit den mittelständischen Unternehmen Gräber Feinwerktechnik GmbH und Hesseland GmbH ein Ringsegmentgenerator für ein Klappschaufelwasserrad entwickelt. Die Entwicklung, die Auslegung und die Tests eines Labormusters erfolgten auf Seite des Lehrstuhls, während die Konstruktion, die Prototypenfertigung und die Integration des Generators in die Anlage von den externen Projektpartnern übernommen wurde. Dieses Projekt verfolgte das Ziel, einen möglichst energieeffizienten und skalierbaren langsamlaufenden Generator-Prototyp zu fertigen, der eine grundlastfähige regenerative Energieerzeugung durch Wasserkraft ermöglicht.

Mit Hilfe des in Abbildung 3.9a dargestellten Labormusters in Linearanordnung konnte die Funktionsweise der neuartigen Generatorkonstruktion als flussgeschaltete permanenterregte Synchronmaschine nachgewiesen werden. Im Rahmen einer Masterarbeit wurden unterschiedliche Methoden zur Kompensation der Rastkräfte implementiert und getestet, mit dem messtechnischen Nachweis einer deutlichen Reduzierung der Rastkräfte sowie eine gleichzeitige Erhöhung des Wirkungsgrades des Generators. Abbildung 3.10 zeigt das gemessene Wirkungsgradkennfeld unter Vernachlässigung der mechanischen Verluste. Bereits bei sehr niedrigen Geschwindigkeiten wird schnell ein guter Wirkungsgrad erreicht, der vergleichbar ist zu schnelllaufenden Generatoren mit Untersetzungsgetrieben.

⁵von Dr.-Ing. Mario Stamann



(a) Linearanordnung



(b) Statorsegment des Prototypen

Abbildung 3.9: Labormuster RING-GEN

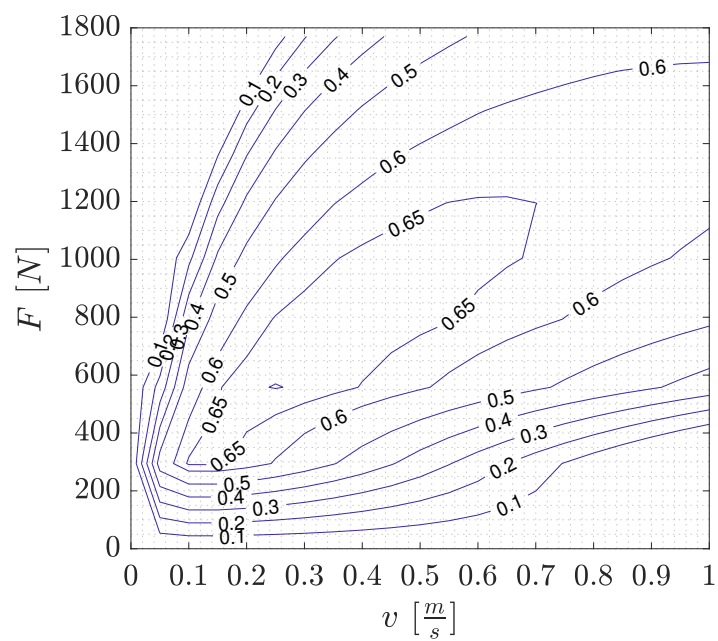


Abbildung 3.10: Gemessenes Wirkungsgradkennfeld der Linearanordnung ohne mechanische Verluste der Rollenführung

Als Schwachstelle der Konstruktion wurde die Rollenführung identifiziert, die auf Grund der Normalkräfte zwischen Stator und Translator mechanische Verluste verursachen und damit eine besondere Beachtung bei der Auslegung erfordert. Aus diesen Erkenntnissen ergaben sich Optimierungsmöglichkeiten zur Fertigung des Prototypen, der in Abbildung 3.11 als integriertes Generatorsegment mit Radkranz und Rotor auf einem Versuchsstand in der experimentellen Fabrik zu sehen ist. Den Aufbau eines Statorsegmentes zeigt Abbildung 3.9b.



Abbildung 3.11: RING-GEN Versuchsstand in der experimentellen Fabrik

Zum derzeitigen Projektstand wird der Prototyp in der Versuchsanlage in Betrieb genommen und getestet. Der Rotor in Abbildung 3.11 besitzt anstelle der Rotorverzahnung Öffnungen und Flussleitstege, wodurch sich eine erhebliche Gewichtsersparnis ohne Beeinträchtigung des Maschinenwirkungsgrades ergibt.

RETERO - Reduction of live fish testing through science and technology⁶

Die Europäische Wasserrahmenrichtlinie fordert einen „guten Zustand“ der Grund- und Oberflächengewässer. Der ökologische Zustand muss erfasst und der aktuelle Zustand muss erhalten oder verbessert werden. Die Risikobewertung für Verletzungen und Sterblichkeit von Fischen bei Turbinenpassagen ist obligatorisch für innovative Technologien, neue Installationen und auch existierende Wasserkraftanlagen. Dadurch ist mit einer signifikanten Zunahme von Tierversuchen an lebenden Tieren zu rechnen, da derzeit keine anderen validierten Methoden zur Verfügung stehen.

Ziel des RETERO-Projektes ist es, neue Methoden in die etablierten Normen zur Bewertung des Verletzungsrisikos von Fischen beim Durchgang stromabwärts der Turbine ohne Lebendtierversuche einzuführen. Das RETERO-Projekt wird von 5 Partnern unter anderem zwei Fakultäten der

⁶von M. Sc. Shokoofeh Abbaszadeh

OVGU bearbeitet. Während die Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik sich mit den mathematischen Modellen und Simulationen zur Modellierung von Fischverhalten beschäftigt, wird von Seiten des Lehrstuhls für Elektrische Antriebssysteme (IESY) auf den Aufbau einer teilautonomen Sonde (Roboterfische) hingearbeitet, die zukünftig mit Druck- und Beschleunigungssensoren das Schädigungsrisiko bei Turbinenpassagen messen sollte.

2021 wurde sich auf den Entwurf, die Konzeption und Optimierung eines Antriebssystems mit mehreren Freiheitsgraden konzentriert. Diese Fischroboter, die Tests mit lebenden Fischen ersetzen sollen, müssen recht klein (etwa 30 cm lang) und leicht sein (maximal 380 g bei neutralem Auftrieb) und mit einem leistungsstarken Antriebssystem ausgestattet sein.

Die Sensoren von Taltechs Environmental Sensing Group werden in den Kopf des Fisches eingebettet, um Informationen über mögliche Schäden zu liefern, während das Gerät eine Turbine passiert. Die Sensoren werden auch für die Rheotaxis (Ausrichtung gegen die Strömung) verwendet. In erster Linie wurden verschiedene Konzepte des Antriebssystems getestet. Aufgrund der Gewichts- und Platzbeschränkungen wurde sich für den Einsatz eines piezoelektrischen Antriebs (MFC) entschieden. MFC sind extrem leicht (jeder Antrieb unter 10 g), aber sie benötigen eine Spannung von 2 kV, was für Unterwasseranwendungen eine Herausforderung darstellt.

Der Roboter besteht aus einem starren 3D-gedruckten Kopf, gefolgt von einem weichen, beweglichen Teil und einer passiven Schwanzflosse. Vier piezokeramische Aktoren in einer Anordnung von zwei Paaren unterschiedlicher Größe und Leistung sind auf beiden Seiten der CFC-Platte angebracht und bilden eine muskelähnliche morphende Struktur.

Im November 2021 wurde ein Artikel vom Journal für Bionic Engineering akzeptiert. Hier wurde ein Designkonzept und ein kinematisches Modell für einen flexiblen Fischroboter mit komplexer, bio-mimetischer Bewegung vorgestellt, um den Position des Körpers nachbilden zu können, siehe Abbildung 3.12.

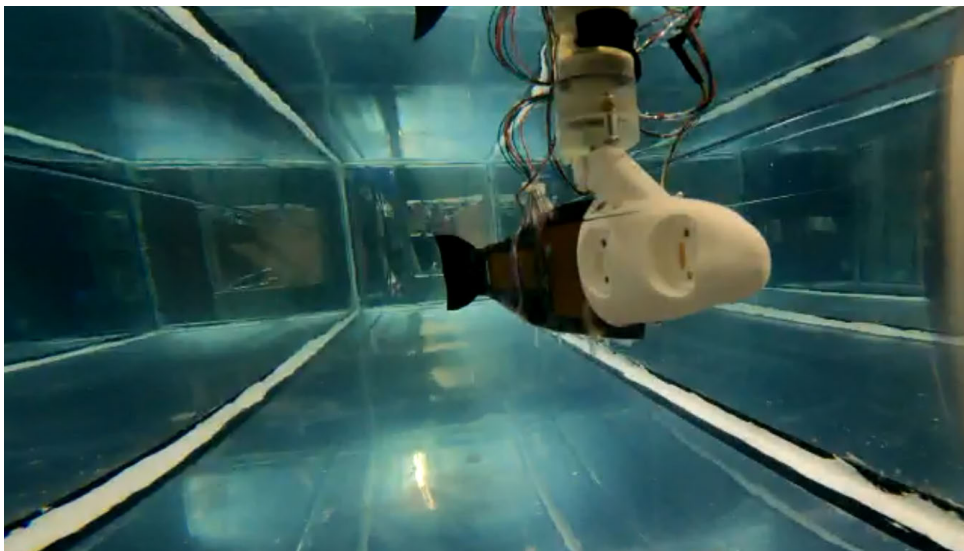


Abbildung 3.12: Roboterfisch im Aquarium

Derzeit laufen Experimente zur systematischen Optimierung des Antriebs- & Messkonzepts, sowie Verbesserungen und Vereinfachungen der Konstruktion und Bau eines frei schwimmenden Roboterfisches mit externer Elektronik, siehe Abbildung 3.13.

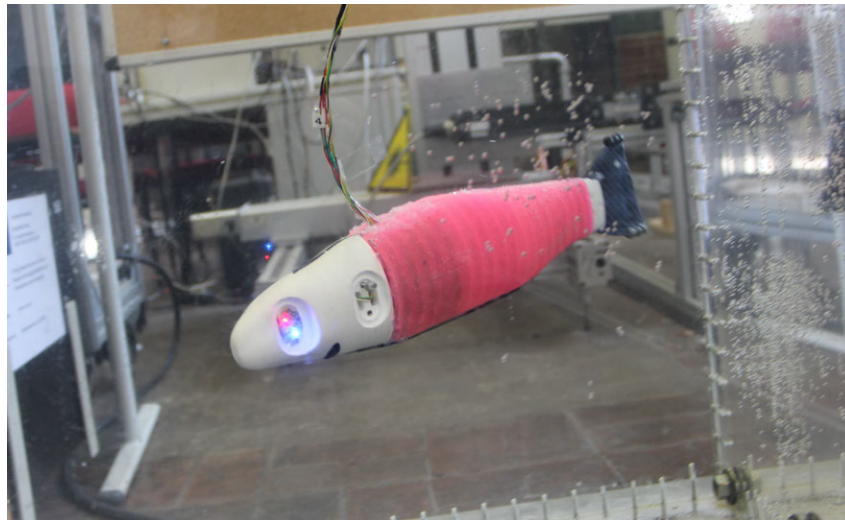


Abbildung 3.13: Roboterfisch mit Sensoren

3.1.3 Promotionen

Dr.-Ing. Andreas Gerlach: Regelung von direktangetriebenen elektrischen Maschinen für Verbrennungsmotoren

Gutachter:

- Prof. Roberto Leidhold, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
- Prof. Hermann Rottengruber, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

verteidigt am 3. Mai 2021 an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Die Entwicklung des Verbrennungsmotors ermöglichte es, chemisch gespeicherte Energie in mechanische Energie umzuwandeln. Der Brennstoff besteht zum größten Teil aus fossilen Energieträgern. Diese Energieträger lassen sich nicht wie bei regenerativen Energien (Wind-, Sonnenenergie, usw.) erneuern. Die Ressource ist somit nur über eine begrenzte Zeit hin nutzbar. Bei der Umwandlung der fossilen Energieträger wird u. a. klimaschädliches CO_2 ausgestoßen. Durch den vermehrten Einsatz von Kraftmaschinen, steigt zum einen der Kraftstoffbedarf, als auch die Emissionen an. Um diese Probleme zu bewältigen gibt es zahlreiche Bemühungen, um den Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors zu verbessern und auch die Nutzung von alternativen Kraftstoffen zu ermöglichen. Eine richtungsweisende Komponente, die vermehrt genutzt wird, ist die elektrische Maschine. In dieser Arbeit wurden verschiedene Regelverfahren entwickelt um den Betrieb von Verbrennungsmotoren zu verbessern. Die entwickelten Regelungsverfahren lassen sich in mittelwertbasierte und dynamikbasierte Regelverfahren unterteilen. In Abbildung 3.14 sind die entwickelten Regelungsverfahren übersichtlich eingeordnet.

Zu den mittelwertbasierten Regelverfahren werden Verfahren gezählt, welche keine hochdynamische Drehmomentänderung innerhalb der vier Takte des Verbrennungsmotors benötigen. Hierzu gehört unter anderem die drosselklappenaktorlose Leistungsregelung. Das zu regelnde System ist nichtlinear. Zur Regelung des Systems wurde es zum einen mithilfe einer Taylorannäherung und zum anderen mit einer Ausgangsrückführung linearisiert. Zu dem linearisierten System konnte anschließend ein Regler ausgelegt werden. Ein weiteres mittelwertbasiertes Regelverfahren ist die winkelgeberlose Regelung. Hierbei wurden verschiedene Winkelschätzverfahren für die PMSM angewendet, um den elektrischen Winkel und das Drehmoment des Verbrennungsmotors zu schätzen, welches mit einem theoretischen Kompressionsdrehmoment verglichen wird, um den Kurbelwinkel zum elektrischen Winkel zu referenzieren.

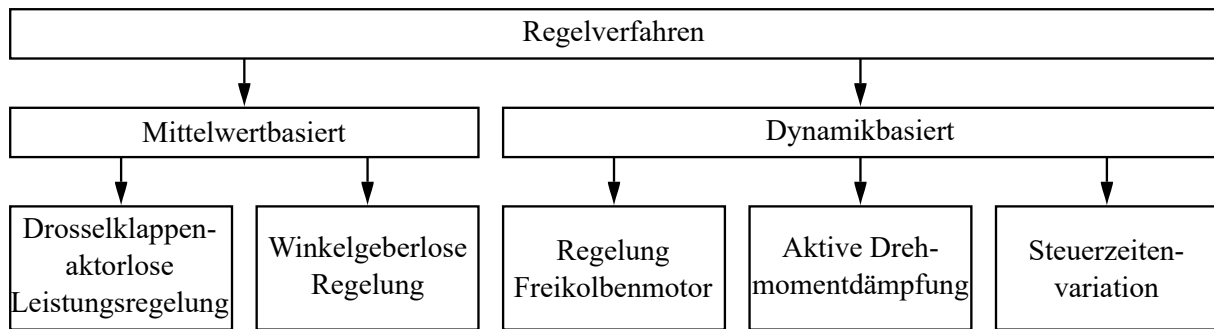
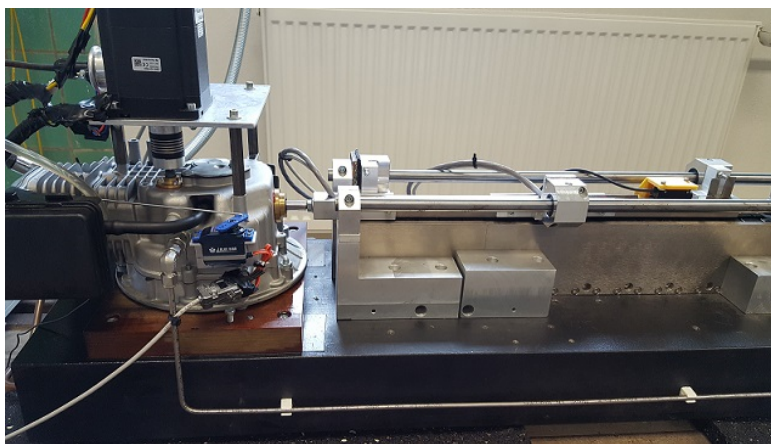


Abbildung 3.14: Unterteilung der Regelungsverfahren

Die dynamikbasierten Regelverfahren sind Verfahren, welche innerhalb der vier Takte den Drehmoment-/ Kraftverlauf der elektrischen Maschine stark verändern. Hierdurch ist es unter anderem möglich, den Kolbenhubverlauf bei einem Verbrennungsmotor mit Kurbelwelle und bei einem Freikolbenmotor anzupassen. Der entwickelte Freikolbenmotor ist in Abbildung 3.15a dargestellt. Außerdem kann die Einprägung eines hochdynamischen Drehmoments auf einer Nockenwelle dazu genutzt werden, um die Ventilsteuerzeiten zu variieren. Weiterhin wird eine hohe Regeldynamik benötigt, wenn eine nahezu konstante Drehzahl erforderlich ist. Hierfür muss ein Drehmoment eingepreßt werden, was das Drehmoment des Verbrennungsmotors kompensiert. Dies wird als Drehmomentdämpfung/-kompensation bezeichnet. Es wurden verschiedene Drehmomentdämpfungsmethoden getestet und die Ergebnisse nach Implementierungsaufwand und benötigten Sensoren verglichen.



(a) Entwickelter Freikolbenmotor



(b) Gratulation an Andreas Gerlach

Abbildung 3.15: Promotion von Andreas Gerlach zur „Regelung von direktangetriebenen elektrischen Maschinen für Verbrennungsmotoren“

Dr.-Ing. Alexsej Kiselev: Modellbasierte prädiktive Regelung und Fehlererkennung für permanenterregte Synchronmaschinen

Gutachter:

- Prof. Dr.-Ing. Roberto Leidhold, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
- Prof. Dr.-Ing. habil. Alexander Kuznietsov, Hochschule Mittelhessen
- Prof. Dr.-Ing. Gerd Griepentrog, Technische Universität Darmstadt

verteidigt am 28. April 2021 an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (siehe Abbildung 3.16)

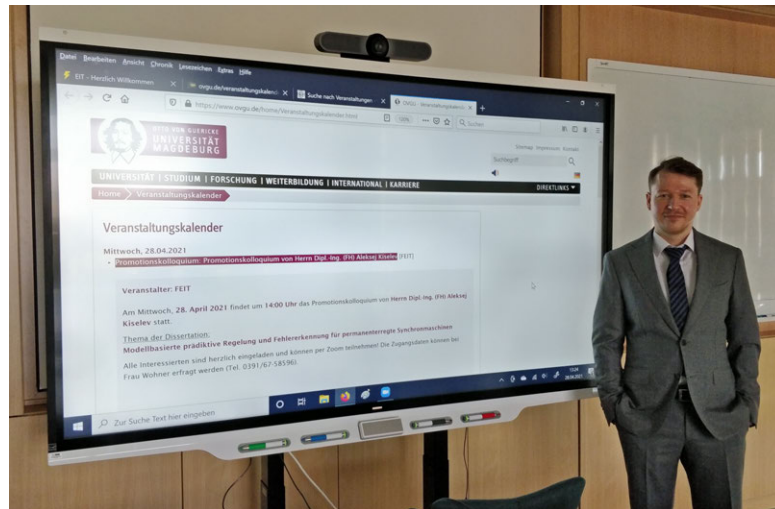


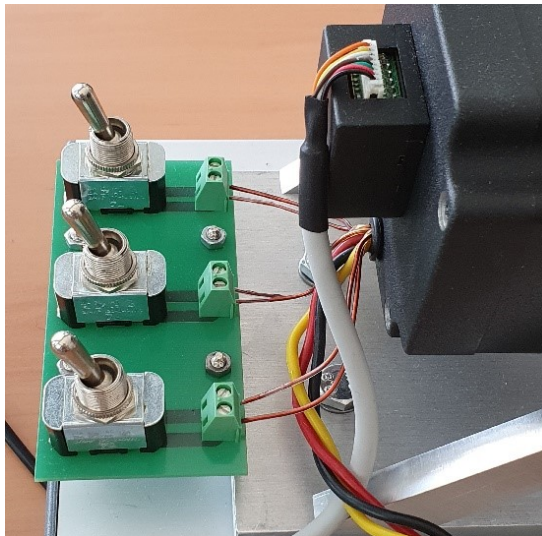
Abbildung 3.16: Dr.-Ing. Alexsej Kiselev bei seiner Verteidigung

Die nachfolgend beschriebene Dissertation beschäftigt sich mit der modellbasierten prädiktiven Regelung (MPC), der permanenterregten (PM) Synchronmaschine und ihren möglichen Einsatz in der Fehlererkennung als Teil von Condition Monitoring. Auch wird die Erweiterung der MPC zur Erreichung der Fehlertoleranz gegenüber den detektierten Fehlern vorgestellt. In Bezug auf die Fehlererkennung wird speziell die Frage gestellt, ob die der MPC innewohnende Prädiktion der Systemgrößen als erwartetes Verhalten eines intakten Antriebs für eine Verbesserung der Fehlererkennung in diesem Antrieb genutzt werden kann. Es werden zwei Fehlerarten untersucht: ein Zwischenwindungskurzschluss und eine offene Phase. Die Auswirkungen beider Fehler auf den Antrieb werden analysiert, wobei insbesondere auf den Zwischenwindungskurzschluss als einen komplexen und schwer zu detektierbaren Defekt eingegangen wird. Dafür wird ein mathematisches Modell des Zwischenwindungskurzschlusses entwickelt und daraus der erwartete Einfluss auf die Systemgrößen abgeleitet.

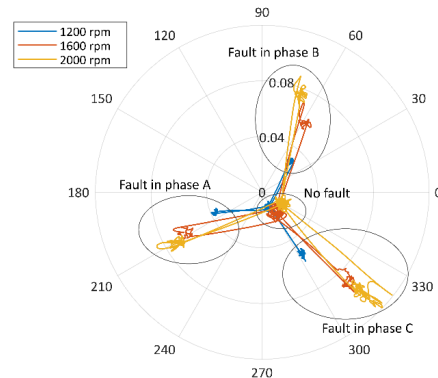
Auf Basis dieser Erkenntnisse wird der Fehlererkennungsalgorithmus entworfen. Dieser berechnet das Residuum zwischen der Prädiktion und der Messung, wodurch die Fehlermerkmale vom Führungsverhalten der Maschine abgegrenzt werden. Das Residuum wird mittels einer aus dem Fehlereinfluss abgeleiteten Koordinatentransformation in einen direkten Fehlerindikator überführt. Der Detektionsalgorithmus wird als eine Erweiterung des MPC-Algorithmus experimentell getestet, dem ein entsprechender Umbau des Motorprüfstands mit einem Einbau des Fehlers vorausgeht, siehe Abbildung 3.17a. Die Experimentalergebnisse zeigen eine sehr gute Detektionsperformance sowohl im stationären Zustand als auch während des transienten Vorgangs mit einer kurzen Reaktionszeit siehe Abbildung 3.17b.

Im letzten Teil der Arbeit wird schließlich auf die Problemstellung eingegangen, wie der Betrieb der Maschine nach einem erkannten Zwischenwindungskurzschluss oder einer offenen Phase sichergestellt werden kann. Dafür wird zunächst eine notwendige Hardwareerweiterung vorgestellt. Diese erlaubt im Fehlerfall, die ausgefallene Phase durch den angeschlossenen Neutralleiter zu ersetzen, wobei der Nullstrom in diesem Fall zur Wirkleistung beiträgt. Damit eignet sich jedoch der Ansatz der dq -Feldorientierung nicht mehr, sodass die Modellbeschreibung nunmehr im statorfesten Koordinatensystem über die Wirk- und Blindleistung stattfindet.

Auf dieser Basis wird ein fehlertoleranter MPC-Algorithmus vorgestellt, welcher ohne eine Rekonfiguration oder Änderung der Reglerparameter beide Operationsmodi (fehlerfreier Fall und Fehlerfall) meistert. Um seine Regelperformance zu untersuchen, wird vorher der Motorprüfstand



(a) Eingebauter Windungskurzschluss



(b) Experimentalergebnisse

Abbildung 3.17: Modellbasierte prädiktive Regelung und Fehlererkennung für permanenterregte Synchronmaschinen

erweitert und die zur Fehlertoleranz notwendige Hardwareerweiterung implementiert. Die anschließenden Experimentalergebnisse zeigen nicht nur eine gute Performance im beiden Fällen, sondern auch einen glatten Übergang vom intakten Zustand zum Fehlerfall ohne einen in anderen Arbeiten beobachteten, kurzfristigen Drehmomenteinbruch.

Dr.-Ing. Zhao Zhao: Common-Mode Current Reduction Technologies in Four-Wire Inverter-Fed Motors

Gutachter:

- Prof. Dr.-Ing. Roberto Leidhold, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
- Prof. Dr.-Ing. Ralf Vick, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

verteidigt am 05. Juli 2021 an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (siehe Abbildung 3.18)

Two kinds of CM current reduction technologies (CMCRTs), optimization of pulse-width modulation (PWM) algorithm and the design of filter topologies, are introduced for three-phase four-wire drive systems. A theoretical method for analyzing CM current has been proposed based on the transfer function between the cable input or neutral voltage and the original phase voltage.

For the PWM optimization, hybrid phase-shift PWM is proposed to reduce the CM current through removing the zero sequence in switching cycles. Besides, variable switching frequency PWM is applied in addition to the hybrid phase-shift PWM to largely attenuate the peaks of CM current at integral multiples of the switching frequency to adjacent frequencies (shown in Fig. 3.19). The switching loss also reduces for lower RMS value of the switching frequency.

For the filter design of four-wire drives, the analysis of transfer function leads to a finding that unfiltered four-wire drives already consists of a filter network that can reduce the flowing CM current. The filtering effect of filter network is also influenced by the impedance of the motor. Based on this, a novel design procedure is proposed and results in better filtering effects, less



Figure 3.18: Dr.-Ing. Zhao Zhao nach seiner Verteidigung

power losses, as well as smaller size and weight than the conventional three-wire filter topology (in Fig. 3.20a).

The effects of reducing CM current by both CMCRTs have been validated experimentally in practical EDSs. In addition, these two CMCRTs are also applied together in a EDS designed for the traction of electric vehicles (in Fig. 3.20b). It is concluded that simply combining effective CMCRTs will not result in an added effect of CM current reduction, which provides hints of an more appropriate application strategy for the combined utilization of CMCRTs.

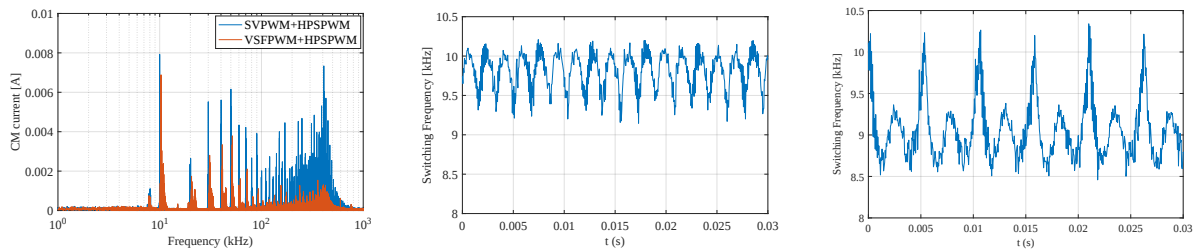


Figure 3.19: Measured CM current in frequency domain (left) and switching frequency applying VFS-PWM in SV-PWM (mid) and HPS-PWM (right) modulated EDS.

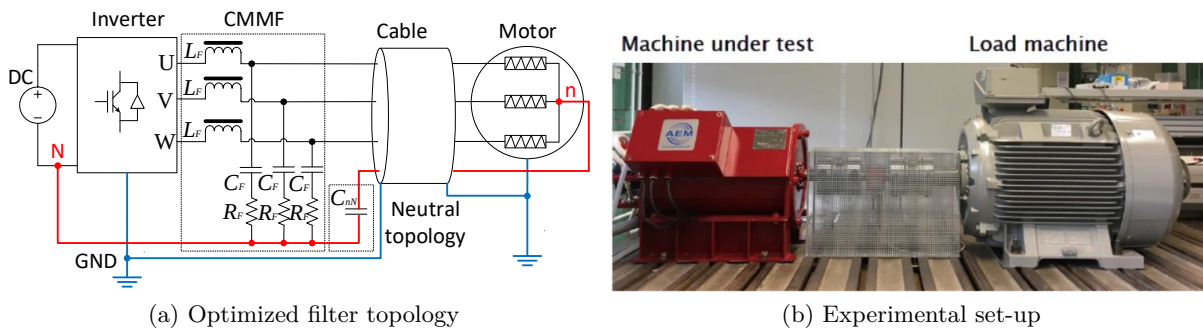


Figure 3.20: Optimized filter topology and experimental set-up for the analysis of CM current

3.1.4 Veröffentlichungen

Zeitschriften- und Konferenzbeiträge

- [1] R. Tempelhaagen, A. Gerlach, S. Benecke, K. Klepatz, R. Leidhold, and H. Rottengruber, „Investigations for a trajectory variation to improve the energy conversion for a four-stroke free-piston engine“, *Applied Sciences: open access journal - Basel: MDPI, Bd. 11*, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11135981>.
- [2] S. Benecke, A. Gerlach, and R. Leidhold, „Comprehensive design method and experimental examination of an electrical machine for a free piston linear generator“, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021. DOI: 10.1109/TIE.2021.3104577.
- [3] H. S. Vogt, B. Horn, and R. Leidhold, „Verbrennungsmotorstart durch resonanzanregung mit der elektromaschine eines hybrid-antriebs“, *Elektrotechnik und Informationstechnik: - Wien [u.a.]: Springer . - 2021;*, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00502-021-00868-3>.
- [4] J. Schäfer and R. Leidhold, „Steer-by-wire: Eine analytische beurteilung von unterschiedlichen zahnstangenkraftschätzungen im fahrzeug“, *Automatisierungstechnik: AT - Berlin: De Gruyter - AT, Bd. 69 (2021), 1, S. 65-72;*, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1515/auto-2020-0100>.
- [5] O. Duniev, A. Yehorov, A. Masliennikov, M. Stamann, and O. Dobzhanskyi, „Finding the optimal size of permanent magnets for a transverse magnetic flux generator with a disk rotor“, *Moldawisches Journal Nr.2 (50) 2021 Probleme der regionalen Energien*, 2021. DOI: 10.52254/1857-0070.
- [6] S. Abbazsadeh, R. Leidhold, and S. Hoerner, „A design concept and kinematic model for a soft aquatic robotic with complex bio-mimicking motion“, *Journal of Bionic Engineering*, 2021. DOI: 10.1007/s42235-021-00126-4.

Dissertationen und Bücher

- [1] A. Gerlach, „Regelung von direktangetriebenen elektrischen Maschinen für Verbrennungsmotoren“, Ph.D. dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2021.
- [2] A. Kiselev, „Modellbasierte prädiktive Regelung und Fehlererkennung für permanenterregte Synchronmaschinen“, Ph.D. dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2021.
- [3] Z. Zhao, „Common-mode current reduction technologies in four-wire inverter-fed motors“, Ph.D. dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2021.

Beiträge zu Kolloquien u. a. Vorträge

- [1] T. Schallschmidt, „Und was machst du so? Ansichten eines Beobachters“, in *8. Hörsaalslam der Ingenieure ohne Grenzen*, OVGU Magdeburg, Nov. 2021. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=8dbdjRynzhQ>.

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

Amprion-Projekt⁷

In diesem Projekt wurde bisher eine Methode entwickelt mit der partielle Leistungsflüsse von HGÜ-Leitungen berechnet werden können. Weiterhin wird das Tool der OVGU zur Berechnung partieller Leistungsflüsse erweitert, sodass weitere Dateiformate für Netzdaten verwendet werden

⁷ von M. Sc. Eric Glende

können und neben dem Half-Tie-Line-Ansatz auch der Full-Tie-Line-Ansatz verwendet werden kann.

Außerdem gibt es eine neue Berechnungsmethode für PST-Flows. Bisher haben alle Methoden gemeinsam, dass die PST-Flüsse über PSDF abgebildet werden, die aufgrund der Linearisierung nicht das exakte AC-Lastflussergebnis abbilden können. Die Idee der eigenen Methodik besteht darin, den PST als eine serielle Spannungsquelle zu modellieren, die einen zusätzlichen Strom im System einprägt. Der komplexe Wert der eingepprägten Spannung hängt dabei direkt von der Stufung des PST ab.

Die Verteilung des eingepprägten Stromes im gesamten Netz kann anschließend verfolgt werden, sodass der Einfluss jedes PST auf jede Leitung abgebildet ist. Da die Methodik auf dem vollständigen AC-Lastflussergebnis mit gestuften PST aufbaut und anschließend die eingepprägten PST-Ströme aus dem Ergebnis herausrechnet ist der Linearisierungsfehler der PSDF nicht gegeben und das AC-Lastflussergebnis wird möglichst genau abgebildet. Da die Methodik vor der eigentlichen PFD-Methode ansetzt, kann sie in das PPF-Tool auch als allgemeingültige Methode zur PST-Flussbestimmung implementiert werden und in Kombination mit der FLD- und PFC-Methode verwendet werden.

UMZUG⁸

Um die Ausbauziele erneuerbarer, stromrichterbasierter Erzeugungsanlagen nicht zu gefährden, müssen diese die Netze in allen Situationen stabilisieren. Hierzu soll eine technisch tiefgreifende Analyse anhand der deutschen und europäischen Netzsituation zeigen, ob und wie das Stromnetz, dominiert von stromrichterbasierten Erzeugern, stabil betrieben werden kann. Dabei werden im vom BMWi geförderten Projekt UMZUG – Netzstabilität durch Momentanreserve in stromrichterdominierten Netzen (Umbruch zwischen stromrichter- und generatorbasiertem Energiesystem) folgende Arbeitsbereiche bearbeitet: Bereitstellung von Momentanreserve mittels virtueller Synchronmaschinen (VSM), angepasste Anlagen- und Schutzkonzepte, DC-seitig gekoppelte Speicher, Schwarzstart, Inselbetrieb, Netz- und Marktanalysen und die Erprobung der erarbeiteten Konzepte in einem Reallabor.

Der Lehrstuhl LENA konzentriert sich im Rahmen des Projektes auf eine gesamtheitliche Systemanalyse der Bereitstellung von Momentanreserve. Dies beinhaltet sowohl technische Aspekte hinsichtlich der Systemstabilität und des Bedarfs an stromrichterbasierten Erzeugungsanlagen mit VSM-Funktionalität als auch ökonomische Aspekte hinsichtlich der Integration dieser VSM-Funktionalität in bestehende Märkte und die Entwicklung neuer Märkte. Aus den Analysen werden im letzten Schritt Handlungsempfehlungen für die Anpassung von Grid Codes abgeleitet.

Das Projekt UMZUG ist zum 01.02.2021 gestartet und im ersten Projektjahr steht der Aufbau einer Simulationsumgebung zur dynamischen Simulation des europäischen Verbundnetzes im Vordergrund. Diese Simulationsumgebung umfasst im ersten Schritt den Aufbau unterschiedlicher Szenarien hinsichtlich des vorhandenen Kraftwerksparks und der Verteilung von Erzeugungsanlagen und Lasten im elektrischen Netz. Aus dem vorhandenen Kraftwerkspark, Profilen von Wetterdaten (Windgeschwindigkeit und solare Einstrahlungsdichte) und Lastprofilen lassen sich anschließend mit Hilfe eines Fundamentalmodells die Arbeitspunkte der Kraftwerke ableiten. Die Arbeitspunkte der konventionellen und regenerativen Erzeugungsanlagen bilden die Grundlage für die dynamische Simulation. Einen Überblick über den generellen Aufbau des Simulink-Modells gibt Abbildung 3.21. Grundsätzlich handelt es sich dabei um eine RMS-Simulation mit der Netzfrequenz als maßgebliche Untersuchungsgröße. Im Modell selbst sind bereits die Regelungen von konventionellen Kraftwerken und Windkraftanlagen hinterlegt.

⁸von M. Sc. Christian Klabunde

Im Laufe der weiteren Projektlaufzeit wird die Simulationsumgebung um weitere Anlagenmodelle erweitert, die z. T. von den am Projekt beteiligten Projektpartnern bereitgestellt werden und die VSM-Eigenschaft regenerativer Energien enthalten.

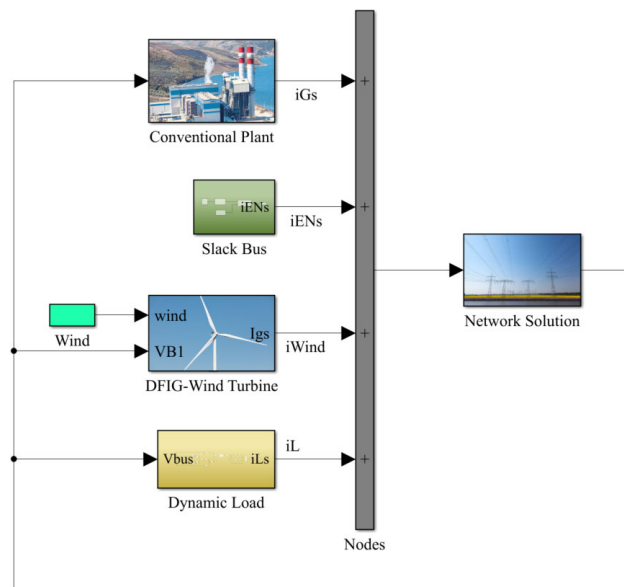


Abbildung 3.21: Aufbau des Simulink-Modells

Indien-Projekt⁹

In diesem Projekt wurde eine Übertragungsleitung für elektrische Energie von Indien nach Deutschland theoretisch untersucht. Bei einer Distanz von 6000 km wird eine sehr hohe Spannung benötigt um die Verluste gering zu halten. Die größte Übertragungsleitung bisher befindet sich in China mit 3300 km Länge und einer Spannung von einmaligen 1100 kV. Sie wird als Referenz für dieses Projekt angenommen.

Nach einer technischen Bewertung zeigt sich eine Machbarkeit einer HGÜ-Leitung mit einer Länge von 6000 km. Die LCC-Technologie wird verwendet, da mit dieser Technologie sehr hohe Spannungen erreicht werden, die bei VSC-Konvertern technisch nicht möglich. Ein weiterer Grund für LCC ist die hohe Übertragungsleistung, die mit diesen Konvertern möglich ist. In dieser Studie wird eine Übertragungsleistung von 12 GW angenommen. Als Übertragungsmedium wird eine Freileitung als technisch und ökonomisch sinnvollste Variante angenommen. Andere Übertragungsmedien, wie unterschiedliche Kabelsysteme, sind mit Vor- und Nachteilen aufgezeigt.

Eine ökonomische Bewertung ist ebenfalls erfolgt um die Kosten für solch ein System abzuschätzen. Aufgrund von vielen Unsicherheiten und der Tatsache, dass es kein vergleichbares System dieser Länge durch mehrere Staaten gibt, ist es schwer zuverlässige Informationen zu bekommen. Kosten für die einzelnen Systemkomponenten sind anhand von Referenzprojekten, einigen Artikeln von Nachrichtendiensten sowie Gesprächen mit Experten von Siemens und ABB zusammengekommen. Das Ergebnis ist eine große Bandbreite für die Kosten, besonders für die Freileitung. Die operativen Kosten für die Konverter und Freileitung sind anhand von typischen Prozentwerten errechnet, die in technischen Artikeln zu HGÜ-Systemen entnommen sind.

⁹von M. Sc. Eric Glende

Technisch und ökonomisch ist eine Übertragungsleitung in dem genannten Ausmaß denkbar. Es gibt allerdings viele Faktoren, die zusätzlich mitberücksichtigt werden sollten. Dazu zählen unter anderem die nicht vorhandene $n - 1$ -Sicherheit. Wenn das System ausfällt, fallen große Energiemengen auf einen Schlag vom Netz und dafür sind die Stromnetze in den Ländern nicht ausgelegt. Eine denkbare Lösung ist ein interkontinentales Overlay-Netz mit HGÜ-Technologie mit mehreren parallelen Verbindungen. Weiterhin müssen die politischen Aspekte betrachtet werden, die nicht Teil dieser Studie sind.

IDI^{NA}¹⁰

Informationen sind der zentrale Treiber der Digitalisierung und stellen damit eine neue Währung in der heutigen Zeit dar. Auf dieser Basis haben sich zahlreiche neue Geschäftsmodelle entwickelt, deren Wertschöpfung sich ausschließlich auf der Erhebung und dem Vertrieb von Daten stützt. Zum Schutze vor Datenmissbrauch und dem Unwissen über die konkrete Verwendung der Daten hat sich in der Bevölkerung aber auch ein größeres Bewusstsein für die Wahrung der eigenen Privatsphäre entwickelt. Ungeachtet dieses Spannungsverhältnisses sind jedoch Praktiken wie Vorteilskarten (Payback, Club-Karten, etc.) kaum noch aus unserem Alltag wegzudenken. In ihnen zeigt sich, wie die Erhebung und Nutzung von Informationen zusammenwirken: ein Tauschgeschäft. Die Menschen sind bereit Zugriff auf ihre Daten zu erlauben, sofern ein mindestens gleichwertiger Nutzen für sie erkennbar ist.

Übertragen auf den Bereich der Stromversorgung als kritische Infrastruktur (KRITIS) kann dies bedeuten, dass Informationen im Allgemeinen ein wesentlicher Treiber für den Fortschritt und die Weiterentwicklung sowie Generierung technischer und ökonomischer Betriebskonzepte sein können. So kann durch die Berücksichtigung weiterer Messinfrastruktur wie intelligente Messsysteme (iMSys), dem Zubau dedizierter Messstellen oder der Ableitung von Pseudomesswerten beispielsweise eine Beobachtbarkeit der Nieder und Mittelspannungsnetze erreicht werden. Dies stellt eine potenzielle Optimierung des Netzbetriebs, der Netzplanung und sogar des Gesamtsystems in Aussicht. Der zweckmäßige Austausch dieser Informationen, der die genannte Wertschöpfung unterstützt, ist ebenso bedeutend wie die Erhebung selbst und wird durch die sukzessive Erweiterung der Datenaustauschprozesse gefördert. Als aktuelle Beispiele für Datenaustauschprozesse im Netzbetrieb sind u. a. der ERRP-Prozess und die *Generation and Load Data Provision Methodology* (GLDPM) zu nennen.

Das Zusammenspiel zwischen dem Wert einer Information, deren Erhebung sowie ihrer Akzeptanz ist von großer Bedeutung. Der konkrete Wert einer Information basiert auf der Nutzenstiftung in bestehenden und zukünftigen Prozessen der Netzbetriebsführung, der Energiemärkte oder in einem veränderten Konsumentenverhalten von Privatpersonen und Unternehmen. Insbesondere letzteres birgt die Möglichkeit den Ausstoß klimaschädlicher Gase zu reduzieren, um so nachhaltig Wert für unsere Gesellschaft und zukünftige Generationen zu bieten.

Zu den Projektzielen von IDiNA gehört die Ableitung von Strategien und Empfehlungen zur Erhöhung des (funktionalen) Kundennutzens (z. B. sicherer Systembetrieb), des betriebswirtschaftlichen Nutzens (OPEX/CAPEX-Optimierung, neue Geschäftsmodelle, Innovationen), des volkswirtschaftlichen Nutzens (Reduktion des Netzausbaus, Senkung von Netzentgelten) sowie der Nachhaltigkeit (Reduktion des CO₂-Ausstoßes). Ferner werden die Auswirkungen der Neugestaltung von Datenaustauschprozessen auf den Prozess der Netzzustandsidentifikation untersucht. Dieser bildet die Grundlage für weitere Betriebs- und Planungsprozesse, sodass eine Verbesserung der Netzzustandsidentifikation in der Nieder- und Mittelspannungsebene weitreichende Einflüsse hat. Die wirtschaftlich geprägte Untersuchung wird um eine sozioökonomische Betrachtung ergänzt. Diese hat zum Ziel eine höhere Akzeptanz für die steigende Informationserhebung und

¹⁰von M. Sc. Eric Glende

den zugehörigen Austausch zu schaffen, nicht zuletzt, um die kommende Entwicklung in Harmonie mit der Endkundschaft fortführen zu können.

RE-FLEX – Unitäre reversible PEM-Brennstoffzellen für die flexible Energiespeicherung¹¹

Das Verbundforschungsvorhaben RE-FLEX hat zum Ziel, einen Beitrag zur Sicherung der Versorgungsqualität in einem zukünftigen elektrischen Netz mit einem hohen Anteil erneuerbarer Erzeugungsanlagen zu leisten. Der Fokus des Vorhabens liegt in der Weiterentwicklung und Erforschung des Einsatzpotentials von unitären reversiblen PEM-Brennstoffzellen (URFC, engl.: Unitized Regenerative Fuel Cell). Eine PEM-URFC ist ein Energiewandler, welcher die Eigenschaften von Brennstoffzellen und Elektrolyseuren in einem System kombiniert. Im Erzeugerbetrieb nutzt eine PEM-URFC Wasserstoff und Sauerstoff und generiert elektrische und thermische Energie. Dabei agiert das System vollständig emissionsfrei und liefert als einziges Nebenprodukt Wasser. Im Speicherbetrieb kehrt die URFC die Reaktion um. Unter Zufuhr von elektrischer Energie wird Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff aufgespalten. Der erzeugte Wasserstoff kann anschließend gespeichert oder in ein Verteilnetz eingespeist werden (siehe Abbildung 3.22).

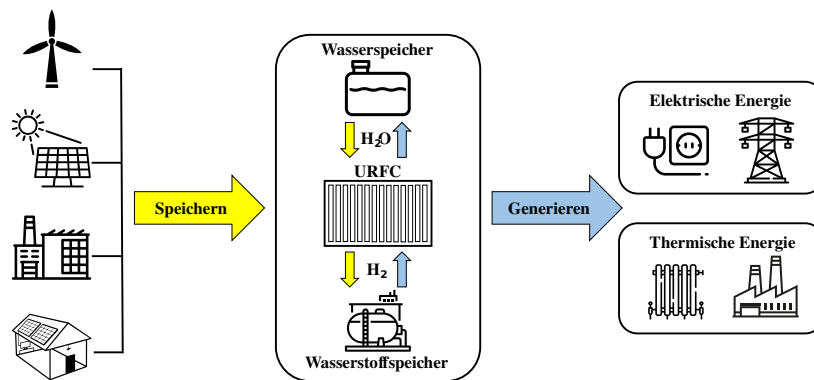


Abbildung 3.22: Funktionsprinzip einer URFC als Zwischenspeicher

Das Verbundvorhaben RE-FLEX wird durch das BMWi für einen Zeitraum von 3 Jahren und 7 Monaten (Start: 11/2018) gefördert. Innerhalb der ersten beiden Projektjahre, wurden verschiedene Konzepte und Betriebsführungsstrategien für den Teststand erarbeitet und bewertet. Weiterhin wurden geeignete Komponenten für den Aufbau des URFC-Stacks identifiziert und innerhalb umfangreicher Einzelzellentests in Hinblick auf ihren Einsatzzweck im Teststand validiert und optimiert. Die Ergebnisse konnten genutzt werden, um abgestimmte Komponenten für die Gas-Diffusionslagen, für die Bipolarplatten bzw. Flowfields und die Membran-Elektrodeneinheit zu entwickeln. Auf Grundlage dessen wurde in diesem Jahr ein 5-zelliger URFC-Stack entworfen und aufgebaut (siehe Abbildung 3.23).

Nach Finalisierung des endgültigen Anlagenkonzeptes und Beginn der Beschaffung bzw. des Aufbaus der Teilkomponenten, wurde der Teststand und der zu untersuchende URFC-Stack in diesem Jahr fertiggestellt. Die umfangreiche installierte Sensorik und die verschiedenen Regel- und Einstellungsmöglichkeiten erlauben es, den URFC-Stack erschöpfend zu untersuchen und zu bewerten. Der Teststand (siehe Abbildung 3.24) beinhaltet zwei Speichermodule, welche auf Grundlage eines Metallhydrids bei geringem Druck (6 bar) bis zu 800 NI Wasserstoff vorhalten können. Damit ist das System in der Lage ohne externe Wasserstoffzufuhr Lade- und Entladezyklen durchzuführen. Der notwendige Druck für den Speicherprozess wird während der Elektrolyse chemisch erzeugt und über parallel gesteuerte Proportionalventile auf beiden Zellkammern

¹¹ von M. Sc. Philipp Kühne

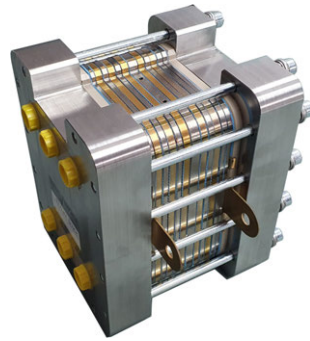


Abbildung 3.23: Entwickelter URFC-Stack als 5-Zeller

dynamisch auf das gewünschte Druckniveau gehalten. Da während der Elektrolyse der Druck auf der Wasserstoffseite stärker steigt als auf der Sauerstoffseite, kann mit dieser Anordnung eine mechanische Belastung der Membran aufgrund der entstehenden Druckdifferenz verhindert werden. Ein weiterer Schwerpunkt war die Versorgung mit druckerhöhtem Elektrolysewasser während des Betriebs. Dazu wurde ein Konzept mit einer verschleißarmen, pulsationsfreien Zahnradpumpe in Verbindung mit einem hochgenauen Massendurchflussmesser für Minimaldurchflussmengen auf Grundlage des Coriolis-Effektes entwickelt.



Abbildung 3.24: Teststand für die Untersuchung des URFC-Stacks

Nachdem alle Komponenten eingebaut und die Verbindungen, die Steuerungselektronik und die Programmierung der SPS bzw. der Nutzerschnittstelle abgeschlossen war, wurde der Teststand in Betrieb genommen. Dazu wurden im ersten Schritt Dichtheitsprüfungen aller Verbindungselemente und Rohrleitungen durchgeführt. Anschließend wurden die Regelstrecken mit Hilfe von aufgenommenen Sprungantworten kalibriert und auf die auszuführenden Betriebsstrategien angepasst. Jede geforderte Einstellung wurde zunächst ohne die Einbindung des zu untersuchenden URFC-Stacks getestet und gegebenenfalls optimiert.

Zum Zeitpunkt der Berichterstellung wird die Einbindung des URFC-Stacks in den Teststand vorbereitet und anschließend durchgeführt. Der Stack wird dann nach einem Aktivierungsprotokoll hochgefahren und erste Begin-of-Life-Auswertungen erstellt. Es folgt eine umfangreiche Testphase auf Grundlage von vorher festgelegten möglichen Anwendungsszenarien und verschiedenen Belastungs- und Langzeituntersuchungen. Zusammen mit der abschließenden Post-Mortem-Untersuchung der Komponenten mit Hilfe von u. a. der Elektronenmikroskopie und der energiedispersiven Röntgenspektroskopie, bilden die bei der Untersuchung gewonnen Erkenntnisse die Grundlage für die Bewertung des Einsatzpotentials des entwickelten URFC-Stacks.

InKoLa¹²

Das Forschungsprojekt InKoLa „Infrastrukturkopplung – Platzierung und Betrieb von Ladestationen aus Verkehrs- und Energienetztsicht“ steht die infrastrukturübergreifende Planung und der Betrieb für Verkehr- und Energiesysteme und wurde in diesem Jahr abgeschlossen.

Das Ziel war es, zusammen mit dem Lehrstuhl für Logistische Systeme der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg und der Stadt Burg ein anwendungsorientiertes Konzept zur optimalen Platzierung, Versorgung und Betrieb von Ladeinfrastruktur aus Netz- und Verkehrssicht unter Einbindung erneuerbarer Erzeugung zu entwickeln und an ausgewählten Standorten in der Stadt Burg Ladeinfrastruktur zu installieren. Durch die Analyse des elektrischen Netzes, einer Last- und Erzeugungsverteilung sowie einer Lastflussberechnung wurde das Niederspannungsnetz der Stadt Burg durch LENA nachgebildet.

Der Lehrstuhl für Logistische Systeme analysierte parallel dazu den Verkehrsfluss auf Quartierebene, um den Verkehrsfluss zwischen den definierten Verkehrszellen und die Auslastung des Verkehrs bestimmen zu können. Auf Basis von Verteilungs- und Optimierungsalgorithmen konnte Ladeinfrastruktur zufällig in der Stadt verteilt werden, um die zukünftige Szenarien 2025 und 2030 nachzubilden und den Einfluss der Elektromobilität darzustellen. Im Anschluss wurden Ansätze entwickelt, mit denen Ladeinfrastruktur auf Basis der Mobilitätsdurchdringung und der Auslastung des elektrischen Netzes platziert werden konnte. Ein weiteres Projektziel war es Versorgungskonzepte für die Kopplung von Erneuerbaren Energie und Ladeinfrastruktur zu erstellen, um ebenfalls an kritischen Netzknoten Ladeinfrastruktur platzieren zu können.

IZI – Innovative Investitionsplanung zur intelligenten ökonomisch, ökologischen Prosumer- und Netzoptimierung¹³

Seit dem 1. Juli 2019 arbeitet der Lehrstuhl LENA in enger Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Betriebswirtschaftslehre, insbesondere Innovations- und Finanzmanagement (IFM) am Projekt IZI. Das Projekt läuft bis zum 30. Juni 2022 und ist ein EFRE-gefördertes Projekt.

Die Fragestellung des Projektes beschäftigt sich mit der Investition in Strom-Erzeugungs- und -Speichertechnologien. Dabei stellt sich diese Frage insbesondere für Einfamilienhausbesitzer und Mehrfamilienhausbesitzer sowie kleine und mittlere KMU, da dort eine Investition ein relativ großes finanzielles langfristiges Wagnis darstellt. Zudem besteht zunehmend die Schwierigkeit der Auswahl einer geeigneten Technologie, in die investiert werden soll.

Ziel des Projektes ist die Entwicklung einer Methodik für die komplexe Investitionsentscheidungen unter Unsicherheit sowie unter dem Aspekt der Eigenverbrauchsdeckung bzw. Energievermarktung. Dabei soll eine praxis-optimale Systemlösung gefunden werden. Diese Systemlösung muss basierend auf einem großen Technologiepool für Erzeugung, Speicherung und Konversion identifiziert werden und zugleich die kritischen Aspekte Wirtschaftlichkeit, Effizienz, Umweltverträglichkeit und Sicherheit erfüllen. Darüber hinaus soll diese Optimierung für Zeitschritte unterhalb der ¼ h betrachtet werden.

Im aktuellen Projektstand wurden Messpartner gefunden und sowohl Strom- als auch Wärmemessgeräte mit einer sekundlichen Auflösung installiert. Die Messungen werden dabei für mindestens ein Jahr durchgeführt und zeigen das Verbrauchsverhalten der EFH, MFH und KMU Besitzer, welche im nächsten Schritt in der Optimierung verwendet werden. In Abbildung 3.25 werden exemplarisch erste Messdaten vorgestellt. Parallel dazu wurde die Softwareentwicklung

¹²von M. Sc. Sebastian Helm

¹³von M. Sc. André Richter

vorangetrieben und aufbauend auf den Messungen wird eine öffentlich zugängliche Datenbank initiiert werden.

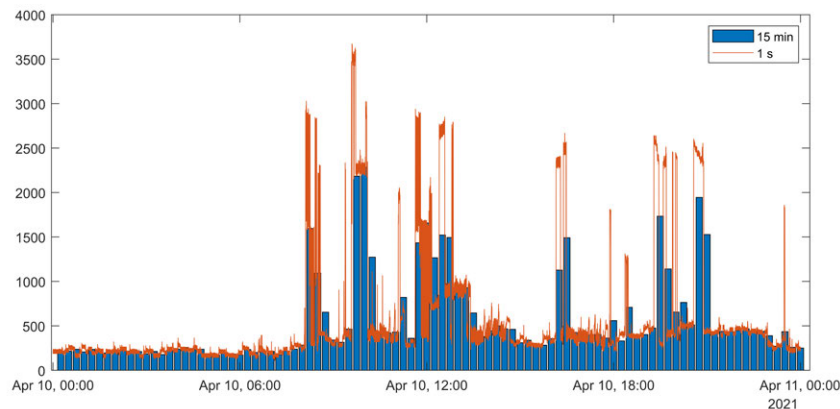


Abbildung 3.25: 4-Personenhaushalt, exemplarische Leistungsmesswerte in W als Sekundenwerte und 15 min-Mittelwert

ILEP Entwicklung einer dynamischen Integrierten Last- und Erzeugungs-Prognose¹⁴

Seit dem 1. Oktober 2018 arbeitet der Lehrstuhl Lena in enger Zusammenarbeit mit dem Übertragungsnetzbetreiber 50Hertz Transmission GmbH, der Forschungseinrichtung Fraunhofer IFF und der Siemens AG an dem Projekt ILEP Entwicklung einer dynamischen Integrierten Last- und Erzeugungs-Prognose.

Die Veränderungen im deutschen Strommix erfordern neue Konzepte zur Planung und Führung des Energieversorgungssystems. Neben dem nur langsam voranschreitenden Netzausbau sind operative Maßnahmen zur Wahrung der Systemsicherheit verfügbar, allen voran Markteingriffe im Rahmen von § 13 Abs. 1 EnWG (Redispatch) und Einspeisemanagement im Rahmen von § 13 Abs. 2 EnWG. Beide Eingriffe sind mit hohen Kosten verbunden, die im Rahmen der Netznutzungsentgelte bzw. der EEG-Umlage von den Endverbrauchern zu tragen sind. Um die erzeugte Erneuerbare Energie effizient nutzen zu können und die Netzüberlastungen zu reduzieren, müssen die vorhandenen Flexibilitätsoptionen optimal eingesetzt werden. Dazu ist eine gute Vorhersage unerlässlich.

Eine gesamtheitliche Verbesserung der Prognose von Erzeugung und Verbrauch wird die Anzahl systemsichernder Eingriffe und den Regelleistungsbedarf verringern und zu besseren Vermarktungsstrategien und zur Verringerung von Pöinalen führen. Das Ziel dieses Projektes besteht somit in einer ganzheitlichen Untersuchung, um eine dynamische Kombinationsmethodik für die integrierte Erzeugungs- und Verbrauchsvorhersage zu entwickeln, die bereichsübergreifende Einflussfaktoren berücksichtigt. Dazu wird sowohl die Erzeugung – als auch die Lastprognose weiterentwickelt, als auch deren Korrelation ermittelt.

Innerhalb des zweiten Projektjahres wurden Methoden zur sowohl globalen (regelzonenscharf) als auch lokalen (umspannwerksscharf) Einspeise- und Lastprognose identifiziert und implementiert. Die Verifizierung dieser Methoden unter Einsatz realer Daten führte zu erfolgreichen Resultaten. In Abbildung 3.26 ist die durch Einsatz der in ILEP entwickelten Methode erzielte Verbesserung der Erzeugungsprognosen für 6 Beispielumspannwerke dargestellt.

¹⁴von M. Sc. André Richter

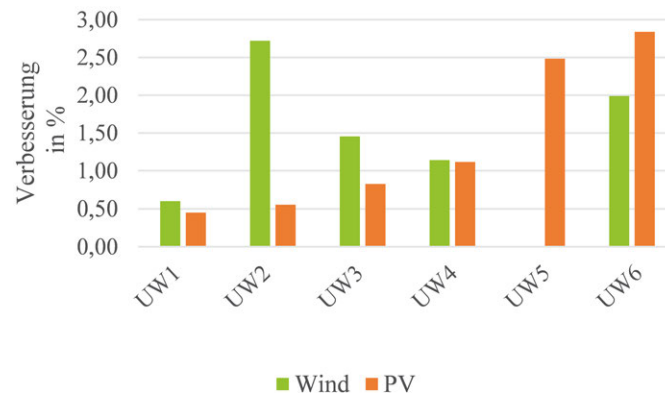


Abbildung 3.26: Verbesserung der Erzeugungsprognose durch Einsatz des in ILEP entwickelten Methode.

Weiterhin wurde eine Speicherprognose entwickelt, welche die Auswirkung von Haushaltsspeichern auf die Last- und Erzeugungskurve an Umspannwerken auf Übertragungsnetzebene abbildet. Aufbauend auf diese Methoden, kann im nächsten Schritt eine Zusammenführung der Prognosen zu einer ganzheitlichen integrierten Last- und Erzeugungsprognose fokussiert werden. Abschließend wird ein Demonstrator entwickelt, um die Methoden sowie Ergebnisse adäquat präsentieren zu können.

GridBatt¹⁵

Ziel des Projekts GridBatt ist es, die besonderen Anforderungen bei der Verwendung eines Batteriespeichers zur Sicherstellung eines stabilen Netzbetriebes herauszuarbeiten, um den Speicher schon beim Entwurf (Auswahl Zellchemie, Technologie, Geometrie, Umgebungsbedingungen, etc.) an die Anforderungen anzupassen, das Speichersystem daraufhin optimal zu dimensionieren und auszulegen sowie dessen Betriebsführung zu optimieren. Nur eine ganzheitliche Betrachtung von der Zellchemie über die Schnittstelle zum System (üblicherweise der Umrichter), den Systemanforderungen und der jeweiligen Rückkopplungen ermöglichen es, das volle Potential von Speichertechnologien auszuschöpfen. Besonders dynamische Anforderungen, die typischerweise eine hohe Leistung bei kleinem Energiedurchsatz und hoher Fluktuation erfordern, mit den vorhandenen aktuell wirtschaftlich nutzbaren Speichertechnologien zeigt, dass hier ein Defizit technischer Lösungen besteht.

Vielversprechend sind die Ansätze der Aluminium-Ionen-Batterie (AIB) mit Aluminium und Graphit als Elektrodenmaterial, für die Energiedichten im Bereich von 50 bis 60 $\frac{\text{Wh}}{\text{kg}}$ gezeigt werden. Darüber hinaus wurde bei einer Laderate von 100 C eine Zyklenstabilität von 500 000 Zyklen erreicht.

Aktuell wurden die Anforderungen der Anwendungen im elektrischen Netz betrachtet und werden nun kategorisiert. Parallel zur Erarbeitung der Anforderungen erfolgt die Modellierung eines Übertragungsnetzes sowie die dynamische Netzberechnung. Der Lehrstuhl für Leistungselektronik entwickelt aktuell ein angepasstes Umrichter Modell, um die Gesamtwirkungskette vollständig untersuchen zu können. Die TU-Clausthal erarbeitet ein angepasstes Simulationsmodell für die AIB, um die speziellen Eigenschaften nachbilden zu können.

Das Fraunhofer Institut in Freiberg hat, im Anschluss an die GAP-Analyse, ein geeigneten Prototyp für die AIB-Zelle im Pouch-Format entwickelt und führt die ersten Tests durch. In den nächsten Schritten werden die Simulationsmodelle miteinander gekoppelt, eine Virtuelle

¹⁵ von M. Sc. Sebastian Helm

Synchronmaschine zur Bereitstellung von Momentanreserve simulativ nachgebildet und Tests zur Zyklenstabilität durchgeführt.

EMo4GS¹⁶

Das Projekt EMo4GS wird aus dem Klima II Richtlinie des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung finanziert und wurde bis zum 30.11.2021 verlängert. Projektpartner sind der EMV-Lehrstuhl, das Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF sowie Krebs'engineers GmbH. Der Lehrstuhl LENA hat eine Berechnung von elektrischen Netzen mit Hilfe einer unsymmetrischen Lastflussberechnung durchgeführt und eine Prognose zum Ausbau der Erneuerbaren Energien sowie der Elektromobilität gegeben. Im Anschluss wurde der Einfluss von einphasig angeschlossenen Verbraucher auf das Niederspannungsnetz betrachtet und die Ausbreitung der Unsymmetrie bewertet.

Im zweiten Schritt sollten netzstützende Algorithmen entwickelt werden, um das Speicherpotenzial in den Elektrofahrzeugen, im Sinne vom Grid Services (Vehicle for Grid – V4G), einzusetzen. Dabei sind lokale (E-Kfz agiert eigenständig ohne Netzdaten) und zentrale (E-Kfz wird durch Leitwarte gesteuert mit vorhandenen Netzdaten) Ansätze betrachtet wurden.

Auf Grundlage von Optimierungsansätzen konnten Betriebsstrategien abgeleitet und in Kooperation mit dem Fraunhofer IFF und den Krebs'engineers GmbH eine Ladeinfrastruktur mit der nötigen Kommunikationstechnik ausgerüstet werden. Zur Validierung der entwickelten Methoden wurde ein Smart Home Demonstrator aufgebaut, um Vehicle-to-Home-Ansätze im Feld testen zu können und die Produktentwicklung abzuschließen.

Low-Cost-Teilentladungsmessung¹⁷

Seit dem 01.07.2019 arbeiten Mitarbeiter des LENA in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für technische Thermodynamik am Forschungsprojekt Low-Cost-Teilentladungsmessung. Die Versorgung mit elektrischer Energie wird in Deutschland, vor allem in dicht besiedelten Gebieten, vorrangig mit Energiekabeln sichergestellt. Deren dielektrische Feststoffisolierung ist einem stetigen Alterungsprozess unterworfen. Entwickeln sich in diesem Zuge Fehlstellen, z. B. durch Hohlraum- oder Rissbildung, ist die elektrische Festigkeit der Isolierung den Spannungsbelastungen oft nicht mehr gewachsen.

Es setzen örtlich beschränkte elektrische Entladungen ein, sogenannte Teilentladungen (TE). Diese sind meist persistent und fördern die weitere Degradation der organischen Isolierstoffe, wodurch sich wiederum die TE-Aktivität intensiviert. In letzter Konsequenz führt dieser Prozess zum Kurzschluss von Innen- und Außenleiter bzw. der thermischen Zerstörung des Kabels. TE sind somit Vorboten eines herannahenden Totalversagens. Die Messung der TE-Aktivität stellt daher einen wichtigen Indikator für Defekte der elektrischen Isolierung dar. Das Ziel dieses Projektes ist die Entwicklung eines möglichst preiswerten Sensors zur TE-Detektion für Energiekabel. Dies soll eine Online-Überwachung ermöglichen, welche heutzutage noch nicht üblich ist. Auf diese Weise kann die Lebensdauer der Betriebsmittel erheblich verlängert und Kosten für die Netzinstandhaltung reduziert werden.

Während des letzten Projektjahres wurde vorrangig ein Sensor zur Messung der transienten Teilentladungssignale am Kabelende entwickelt. Hierzu wird ein Hochfrequenz-Stromwandler genutzt der um das Mittelspannungskabel herum installiert werden kann (siehe Abbildung 3.27). Der gewählte Sensor koppelt das Signal induktiv aus. Durch das induktive Übertragungsprinzip

¹⁶ von M. Sc. Sebastian Helm

¹⁷ von M. Sc. Martin Fritsch

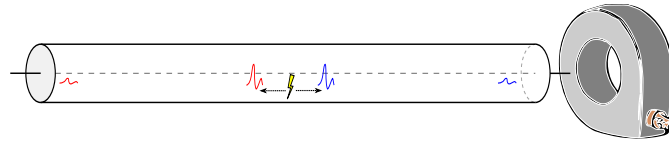


Abbildung 3.27: Schematische Signalübertragung einer Teilentladung auf einem Energiekabel zwischen Ort der Entstehung und dem Kabelende, an dem das Signal induktiv ausgekoppelt und gemessen werden kann.

wird die galvanische Trennung zwischen Sensor und Hochspannungskreis gewährleistet. Die notwendige Bandbreite der Sensoren wurde simulativ bestimmt und sollte bei kabelgebundenen Teilentladungen etwa 10 MHz betragen. Um die Sensitivität innerhalb dieser Bandbreite zu optimieren, wurden diverse Prototypen gebaut und vermessen. Als nächstes Teilziel soll der entwickelte Stromsensor auf mögliche Sättigungseffekte bei 50 Hz untersucht und eventuelle Gegenmaßnahmen analysiert werden. Dazu soll auch ein Hochspannungsteststand eingerichtet werden, um realitätsnahe Teilentladungen erzeugen zu können.

QUEST-IES (Integrated quasi-steady-state energy flow algorithms and flow distribution factors for future integrated energy systems)¹⁸

Der zunehmende Anteil volatiler erneuerbarer Energien in der Stromversorgung, das Abschalten konventioneller Kraftwerke und fehlende Stromleitungen führen zu großen Herausforderungen im Stromnetz. Immer häufiger fehlt dem Netz Flexibilität, was in eine Gefährdung der Netzstabilität mündet. Zur Erhöhung der Flexibilität wird häufig das integrierte Energiesystem (IES, hier: Strom, Gas, Wärme) als Lösung gesehen. Jedoch führt die Kopplung der Netze zu Wechselwirkungen im Netzbetrieb. So wirkt sich eine Änderung in einem Netz auf andere Netze aus. Werden solche Systeme unabhängig voneinander betrieben, wie es heute der Fall ist, und sind die Auswirkungen einer Änderung in einem Netz für das Gesamtsystem nicht bekannt, steigt die Wahrscheinlichkeit, dass Gefährdungen der Netzstabilität nur zwischen den Netzen verschoben werden. Deshalb ist es erforderlich den Einfluss von Anlagen auf die Lastflüsse im gesamten IES detailliert zu analysieren. Hierfür ist eine geeignete Methodik zur Bestimmung der Auswirkungen einzelner Anlagen auf alle Energieflüsse im IES notwendig.

Methoden, die den Einfluss einer Leistungsänderung auf die Lastflüsse bestimmen, gibt es jedoch nur für das Stromnetz (hier: Sensitivitäten). Diese basieren auf Lastflussalgorithmen. Somit existiert keine Methodik, die den Einfluss von Anlagen auf das IES bestimmt und somit den Anforderungen zukünftiger IES entspricht. Deshalb wird in diesem Projekt eine Methodik entwickelt, die auf dem Ansatz der Sensitivitäten aufbaut und diesen für das gesamte IES erweitert.

Im Zuge dessen müssen vorhandene integrierte Strom-, Gas- und Wärmefluss-Algorithmen erweitert werden, sodass in diesem von der DFG geförderten Projekt folgende vier Punkte in den nächsten drei Jahren bearbeitet werden. Erstens, der Algorithmus wird um das transiente Verhalten des Gas- und Wärmenetzes erweitert. Zweitens, Power-to-X-Technologien (z. B. Wärmepumpe, Elektrolyseur) werden integriert. Drittens, im Gasfluss-Algorithmus wird eine Wasserstoffeinspeisung ermöglicht, sodass variable Brennwerte im Gasnetz betrachtet werden können. Viertens basierend auf dem integrierten Lastfluss-Algorithmus wird die Methodik entwickelt, mit der die Sensitivitäten des IES abgeleitet werden können.

¹⁸von M. Sc. Jonte Dancker

Daraus folgt, dass das Projekt einen Algorithmus bereitstellt, der eine umfassende und flexible Lösung für die Analyse zukünftiger IES ermöglicht. Des Weiteren wird der Ansatz der Sensitivitäten weiterentwickeln, sodass dieser in den gleichen Anwendungsfällen jedoch für ein IES eingesetzt werden kann.

3.2.3 Promotionen

Dr.-Ing. Yonggang Zhang: Analysis and Control of Resonances in HVDC Connected DFIG-based Offshore Wind Farms

Gutachter:

- Prof. Martin Wolter, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
- Prof. Krzysztof Rudion, Universität Stuttgart

verteidigt am 26. Mai 2021 an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (siehe Abbildung 3.29)

Wechselwirkungen zwischen den weit verbreiteten wechselrichtergekoppelten Netzkomponenten und den passiven Netzkomponenten können einen breiten Frequenzbereich von Resonanzen aufweisen, wodurch massive harmonische Verzerrungen hervorgerufen und sogar die Systemstabilität gefährdet werden. Ihre Folgen könnten die Trennung erneuerbarer und konventioneller Stromerzeuger vom Netz oder die physische Beschädigung empfindlicher Netzanlagen sein. Motiviert durch die Resonanzereignisse der letzten Jahre in windintegrierten Stromversorgungssystemen, untersucht diese Dissertation die resonanzinduzierten harmonischen Verzerrungs- und Stabilitätsprobleme in einem Offshore-Windpark (OWF) mit doppelt gespeisten Asynchrongeneratoren (DFIG) und Netzanschluss mittels Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ). Ziel dieser Dissertation ist es, die Resonanzen genau zu charakterisieren, ihre Risiken zu bewerten und Lösungen für die Gestaltung der Minderungsstrategie bereitzustellen (Siehe Abbildung 3.28).

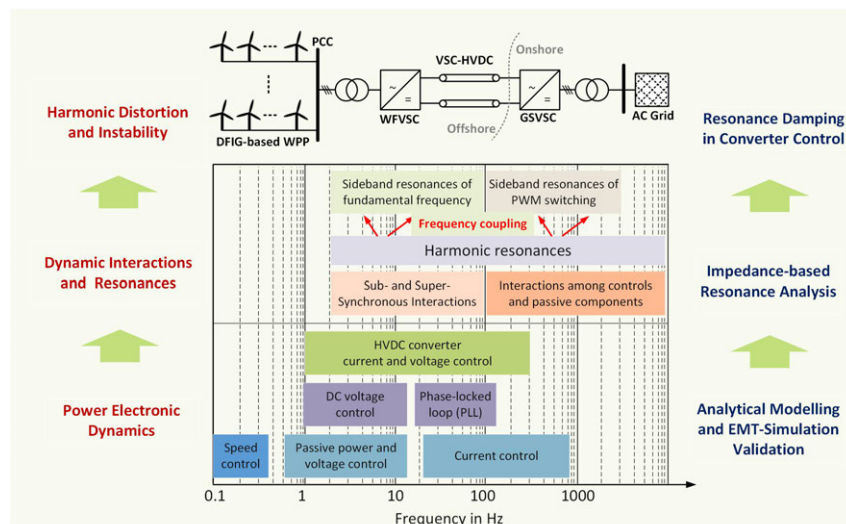


Abbildung 3.28: Schwingungen in OWF mit HGÜ-Anschluss: Modellierung, Analyse und aktive Dämpfung

Um die dynamischen Eigenschaften eines DFIG-basierten Windparks genau zu erfassen, wird eine umfassende Impedanz-Modellierung unter Berücksichtigung des detaillierten PI-Regelkreises und der Gleichstromdynamik der Windkraftanlage sowie der Kabelverbindungen des Mittelspannungskollektorsystems (MV) durchgeführt. Durch schrittweise Simulationsüberprüfungen hat

sich die aggregierte Modellierung des MV-Kollektorsystems für die Breitbandresonanzanalyse als geeignet erwiesen.

Auf dieser Grundlage wurden sowohl die Bode-Plot-Methode als auch der Ansatz der Resonanz-Modus-Analyse (RMA) angewendet, um die Resonanzprobleme unter Berücksichtigung verschiedener Betriebsbedingungen des Windparks und Änderungen der Netz-Topologie anzugehen. Ihre Auswirkungen auf die Resonanzfrequenz, die harmonische Verzerrungen und die Dämpfungen zu Resonanzen werden untersucht. Die Orte, an denen Resonanzen am einfachsten angeregt werden können, werden durch die Busbeteiligungsfaktoranalyse identifiziert. Darüber hinaus wird der Einfluss der Frequenzkopplungseffekte von Steuerungs- und Schaltvorgängen für asymmetrische Wandler auf subsynchrone Resonanz (SSR), Mittel- und Hochfrequenzresonanzen unter Verwendung der aggregierten Modelle analysiert, die aus einem praktischen HGÜ-verbundenen DFIG-basierten OWF abgeleitet wurden. Für den Frequenzbereich von mehreren Hz bis zu einigen kHz werden große harmonische Verzerrungs- und Stabilitätsprobleme gezeigt.

Um den negativen Einfluss von Resonanzen auf die Stromqualität und die Systemstabilität zu verhindern, wurde eine Reihe aktiver Dämpfungsmöglichkeiten untersucht und in das untersuchte windintegrierte Stromnetz implementiert, und es wird eine koordinierte Dämpfungsstrategie vorgeschlagen, mit der Breitbandresonanzen effektiv gedämpft werden können. Schließlich validieren Simulationen in MATLAB/Simulink die Ergebnisse der Impedanz-Modellierung, der Resonanzanalyse sowie die Wirksamkeit der aktiven Dämpfungen.



Abbildung 3.29: Gratulation an Yonggang Zhang am Otto-von-Guericke-Denkmal

3.2.4 Veröffentlichungen

Zeitschriften- und Konferenzbeiträge

- [1] J. Dancker, C. Klabunde und M. Wolter, „Sensitivity factors in electricity-heating integrated energy systems“, in *Energy*, Bd. 229, Elsevier BV, Aug. 2021. DOI: 10.1016/j.energy.2021.120600.

- [2] J. Dancker und M. Wolter, „Improved quasi-steady-state power flow calculation for district heating systems: A coupled Newton-Raphson approach“, in *Applied Energy*, Bd. 295, Elsevier BV, Aug. 2021. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.116930.
- [3] M. Fritsch und M. Wolter, „Transmission Model of Partial Discharges on Medium Voltage Cables“, in *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, 2021, S. 1. DOI: 10.1109/TPWRD.2021.3061201.
- [4] M. Gebhardt und M. Wolter, „Application concepts of phase-shifting transformers for the targeted control of power flows between the transmission and distribution grid“, in *ETG Congress 2021*, Online: VDE, März 2021, S. 1–6, ISBN: 978-3-8007-5549-3.
- [5] M. Gebhardt und M. Wolter, „Nachbildung von Phasenschiebereffekten durch Stromquellen“, in *at - Automatisierungstechnik*, Bd. 69, Walter de Gruyter GmbH, Apr. 2021, S. 409–416. DOI: 10.1515/auto-2021-0011.
- [6] S. Helm, M. Tayyab, I. Hauer, M. Wolter, S. Balischewski und P. Komarnicki, „Potential analysis of EV and PHEV in weak low-voltage grids“, in *NEIS Conference 2021*, Online: VDE, 2021, ISBN: 978-3-8007-5549-3.
- [7] N. Könneke, C. Klabunde und M. Wolter, „Layout of a Scientific Control Center Environment to develop future Grid Operation Methods“, in *International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME 2021)*, Online, Okt. 2021.
- [8] A. Richter, T. Schröter und M. Wolter, „Importance of TSO Forecast in Power System Processes – Challenges in Load, Generation, Storage and Sector Coupling Forecast“, in *ETG Congress 2021*, Online: VDE, März 2021, ISBN: 978-3-8007-5549-3.
- [9] M. Tayyab, S. Helm, I. Hauer, J. Brinken und N. Schmidtke, „Infrastructure linking for placement of Charging stations using Monte Carlo simulation“, in *International Conference on Information Science and Technology (ICIST)*, IEEE, Juni 2021. DOI: 10.1109/cist49399.2021.9357172.
- [10] M. Tayyab, S. Helm, I. Hauer und L. N. da Silva, „New sizing methodology of energy storage and PV systems for electric vehicle charging stations considering voltage compensation in a low voltage grid“, Online: VDE, 2021, ISBN: 978-3-8007-5549-3.
- [11] J. Wortelker, M. Heuer und I. Hauer, „Optimal operation of charging infrastructure and sector coupling technologies to supply residential units“, in *NEIS Conference 2021*, Online: VDE, 2021, ISBN: 978-3-8007-5549-3.
- [12] Y. Zhang, C. Klabunde und M. Wolter, „Study of resonance issues between DFIG-based offshore wind farm and HVDC transmission“, in *Electric Power Systems Research*, Bd. 190, Elsevier BV, Jan. 2021. DOI: 10.1016/j.epsr.2020.106767.
- [13] C. Ziegler und M. Wolter, „Voltage Stability Enhancement by Reactive Power Changes based on Voltage Stability Index PTSI“, in *ETG Congress 2021*, Online: VDE, März 2021, S. 1–6, ISBN: 978-3-8007-5549-3.
- [14] C. Ziegler, T. Woldu und M. Wolter, „Estimating Load Margins in Long-term Voltage Stability Analysis“, in *NEIS Conference 2021*, Online: VDE, 2021, ISBN: 978-3-8007-5549-3.

Dissertationen und Bücher

- [1] Y. Zhang, „Analysis and control of resonances in HVDC connected DFIG-based offshore wind farms“, Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Magdeburg, 2021, ISBN: 978-3-948749-05-7. Adresse: <https://d-nb.info/1238105513/04>.

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,
- Netzrückwirkungen 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. Außerdem ist der Lehrstuhl aktiv in den Forschungscampus Medizintechnik eingebunden.

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

3.3.2 Forschungsprojekte

Towards an Energy Monitoring System for an MRI Hybrid RF Ablation System ¹⁹

Motivation The MRI hybrid ablation system is an innovative approach for performing RF ablation inside an MR environment. For this procedure, an electrode is directly connected to the coil port of the MR scanner. Thus, it is possible to gain access to the MR-internal RF power amplifier. While executing MR pulse sequences, the electromagnetic energy from the RF pulses is absorbed inside the tissue. Monitoring the absorbed energy inside the patient can provide information about the ablation status. In this abstract, a low cost energy monitoring system for an MRI hybrid RF ablation system will be presented.

Materials and Methods The energy monitoring system is based on an ADL5511 True Power RMS detector. An RF signal is applied to the RF_{in} port of the power sensor. The RMS signal is then sampled via an analog to digital converter of an STM32 Nucleo board. On the microcontroller, the energy input is calculated via numerical integration of the measured power. The current energy value is then forwarded to a host PC every second via a serial interface. For testing the setup, a Gaussian amplitude modulated signal is applied to the RF_{in} port, as shown in Fig. 3.30a. The signal had a carrier frequency of 123 MHz and a bandwidth of 500 Hz.

Results Figure 3.30b shows the measurement results of the energy monitoring system and compares them with the theoretically calculated data of the known signal. While switching on the sequence, the measured energy increases linearly. Between the measured and theoretically calculated signal, a relative deviation of the energy of 1.5 % was calculated.

Discussion It has been shown, that the ADL5511 can be used in combination with an STM32 board to measure the energy of an MRI RF pulse sequence. In combination with a dual directional coupler, this energy measurement system could be applied for an MRI hybrid ablation system.

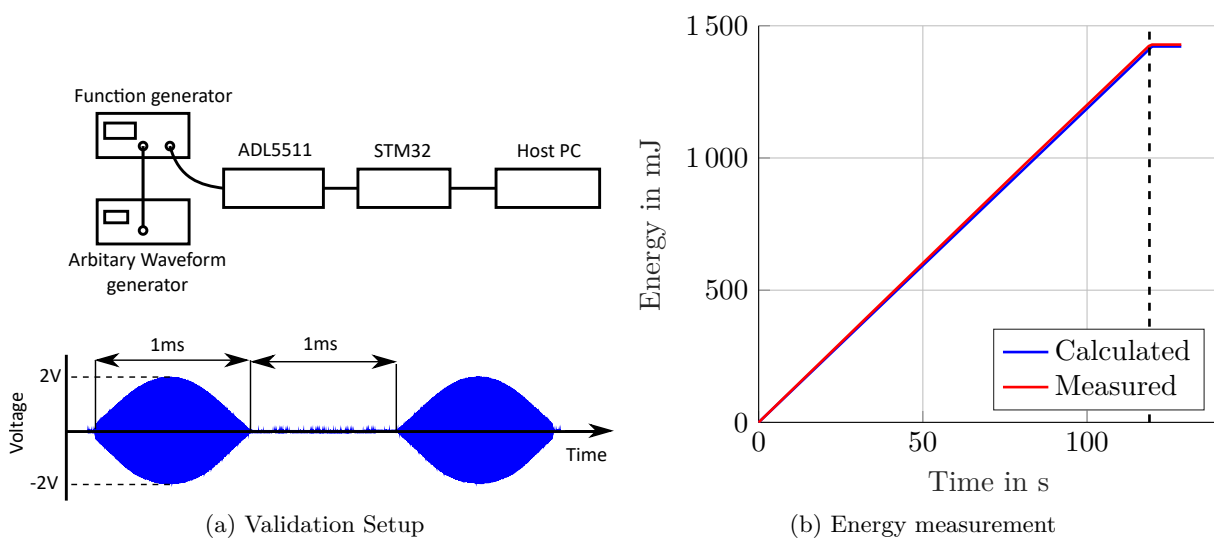


Figure 3.30: Measurement setup and validation of the energy monitoring system.

¹⁹by M.Sc. Nashwa Shaik, M.Sc. Thomas Gerlach and Dr.Ing. Enrico Pannicke

Electromagnetic-Thermal Simulations of Electrodes for Radiofrequency Ablation in an MR Hybrid System Imaging ²⁰

Motivation Radiofrequency ablation (RFA) is a thermal ablative method in which electromagnetic energy is converted into heat to annihilate tissue thermally. Monitoring of the temperature development during this hyperthermal procedure is crucial for therapy success. The MRI hybrid ablation system is an intuitive approach to use the MR internal RF amplifier for performing RF ablation inside an MR environment. Hereby an electrode is directly connected to the coil port of the MRI scanner to acquire the RF power for RF ablation. This eliminates the need for an external ablation generator, which interferes with MR imaging. At the same time, the electrode can also be used for MR imaging. The study aims to numerically design different electrode types for usage with the MRI hybrid ablation system.

Materials and Methods Simulations were performed in a homogeneous cylindrical liver phantom using CST Studio Suite for a frequency of 123 MHz (at 3 T). A bipolar umbrella electrode and a bipolar spherical-shaped electrode were designed for this study. At the tip of the electrode shaft, multiple expandable wires with a diameter of 0.5 mm were outward-facing for the umbrella electrode and inward-facing for the spherical-shaped electrode. The bipolar electrodes were then placed inside the cylindrical liver phantom. Multi-tined active electrodes and an electrode segment of the electrode shaft had direct electric contact with the phantom tissue. For the simulation of ablation efficiency and MR imaging capabilities, specific absorption rate (SAR) and B_1+ field distributions were calculated and compared for the two different electrode combinations respectively.

Results Figure 3.31a compares the SAR distributions of the umbrella and the spherical electrode. The umbrella electrode shows an inhomogeneous SAR distribution, whereas the spherical electrode shows a spherical loss distribution with very sharp boundaries. Figure 3.31b shows the B_1+ field distribution, where umbrella electrode can cover a larger field of view, compared to spherical-shaped electrode.

Discussion Different electrode types can be used for different shapes and sizes of tumors. Significantly, the spherical electrode has the possibility to achieve spherical ablation zones with sharp boundaries to protect healthy tissue. MR validation measurements are concluded to determine the imaging capabilities with these types of electrodes.

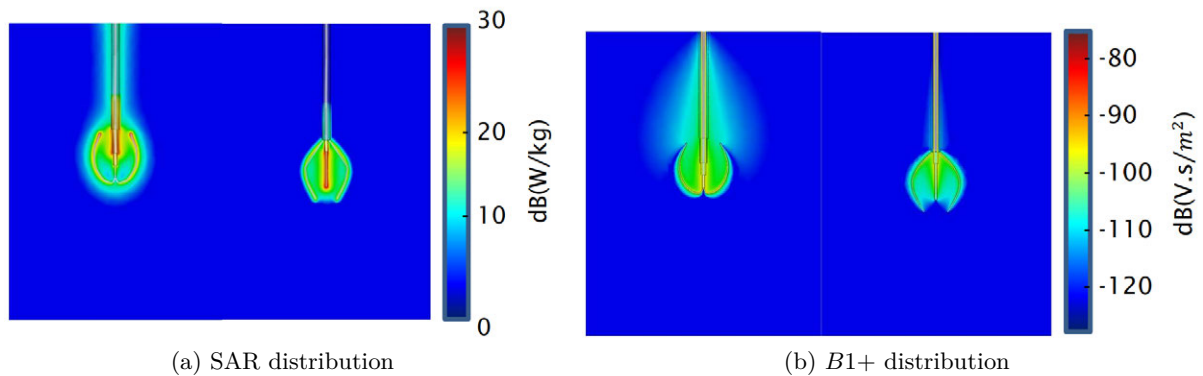


Figure 3.31: Comparing the field distributions of an umbrella electrode (left) and a spherical electrode (right)

²⁰by B. Sc. Mishuk Mitra and M. Sc. Thomas Gerlach

Implementierung eines Prüfverfahrens zur Evaluierung von Störeinkopplungen in der Magnetresonanztomographie ²¹

Externe Therapiegeräte in der Schirmkabine eines Magnetresonanztomographen (MRT) können Hochfrequenz-Bildartefakte (HF) verursachen, die das Bild für die Diagnose, die Bildführung von Instrumenten oder die Therapieüberwachung unbrauchbar machen.

Ein großes Hindernis bei der Bewertung von EMV-Kompatibilität mit dem MRT ist das Fehlen von Standardverfahren. Da die Beeinträchtigung des Bildes durch HF-Emissionen von Geräten in hohem Maße von der Position und der Verlegung von Kabeln abhängt, wird das Konzept der Überführung einer Modenverwirbelungskammer (MVK) in einer MR-Umgebung vorgeschlagen.

Bei dieser Prüfmethode sorgt der sogenannte Modenrührer für eine statistisch isotrop und homogene Feldverteilung. Zudem kann die abgestrahlte Leistung der Geräte direkt gemessen werden. Das Setup wurde dabei auf die speziellen Anforderungen einer MR-Schirmkabine angepasst, weshalb der Antrieb der Rührer pneumatisch betrieben wird. Die Messprinzipien und Berechnungen basieren auf dem bandbreitenreduzierten Zeitbereichsverfahren nach Krauthäuser. In Abbildung 3.32 ist das Setup zur Gütebestimmung einer Schirmkabine zu sehen.

Um zu zeigen, dass das Setup geeignet ist, um die Emission eines Therapiegerätes reproduzierbar und übertragbar zu messen wurden die einzelnen Komponenten validiert. Unter anderem wurde gezeigt, dass eine MR-Schirmkabine ähnliche Rahmenbedingungen wie eine MVK aufweist (siehe Abbildung 3.33).

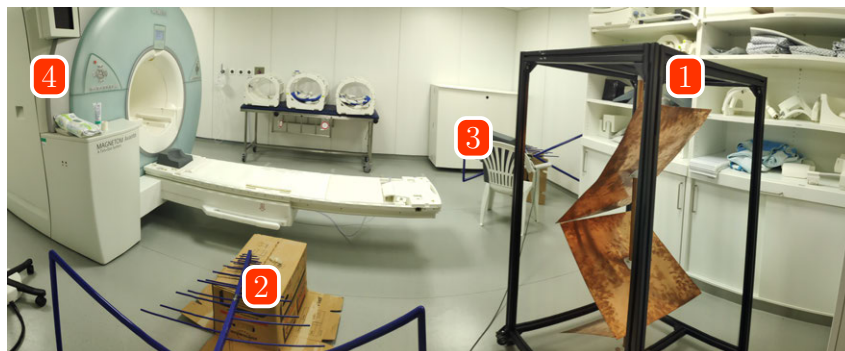


Abbildung 3.32: Messaufbau der Gütemessung: 1 Rührer; 2 Empfangsantenne; 3 Sendeanenne; 4 MRT Magnetom Avanto

Entwicklung eines Demonstrators für die magnetresonanz-geführte irreversible Elektroporation²²

Minimal-invasive Tumorthherapieverfahren ermöglichen es, Tumore patientenschonend und lokal zu therapieren. Eines dieser Therapieverfahren ist die irreversible Elektroporation (IRE), die sich als nicht-thermisches Therapieverfahren durch einen nicht vorhandenen Heat-Sink-Effekt, scharfe Ablationsränder und nur geringen Effekt auf Bindegewebe auszeichnet. Zur Therapie werden 2 oder mehr Elektroden in die Zielregion eingebracht und starke, gepulste elektrische Felder auf das Gewebe gegeben. Die Platzierung der Elektroden ist hierbei für den Therapieerfolg entscheidend, diese ist allerdings für den Arzt unter Umständen sehr anspruchsvoll. Aus diesem Grund kann eine Echtzeitüberwachung der Elektrodenposition während der Platzierung und während der Ablation einen entscheidenden Einfluss auf den Therapieerfolg besitzen. Hierbei bietet sich der

²¹ von B. Sc. Bodo Gambal und Dr.-Ing. Enrico Pannicke

²² von M. Sc. Max Joris Hubmann, M. Sc. Thomas Gerlach und Dr.-Ing. Enrico Pannicke

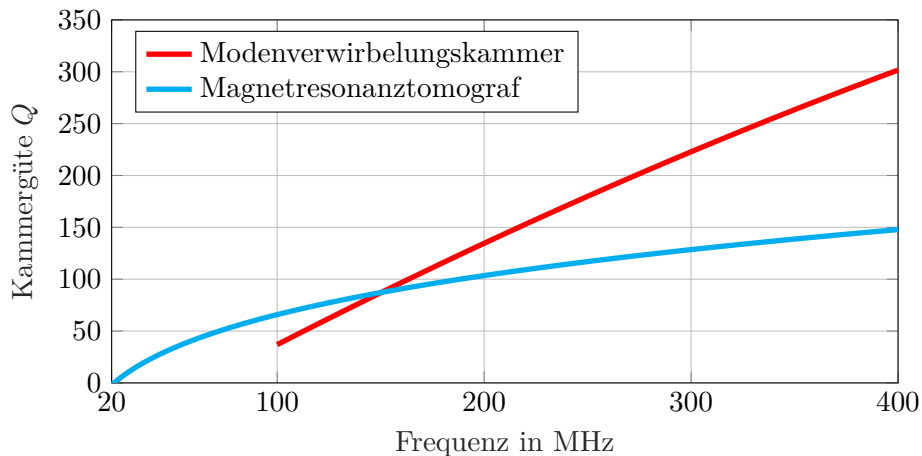


Abbildung 3.33: Vergleich der Gütemessung

Magnet-Resonanz-Tomograf (MRT) aufgrund seines hohen Weichteilkontrastes, der freien Wahl von Bildebenen und der Möglichkeit der Überwachung des elektrischen Feldes an.

Aktuell gibt es allerdings kein speziell zur Verwendung im MRT entwickeltes, kommerziell erhältliches IRE System. Daher wurde in diesem Projekt ein Prototyp eines IRE Systems mit Blick auf die harten Anforderungen einer MRT-Umgebung entwickelt und getestet. Der entwickelte Prototyp ist so designet, dass möglichst wenig Radiofrequenz-Rauschen (RF-Rauschen) im Arbeitsbereich des MRTs erzeugt wird. Hierfür werden die IRE Pulse ausschließlich durch Schalten von nur einem Transistor erzeugt. Gleichzeitig ist das Gehäuse geschirmt, sodass die Rauschemission minimiert wird. Um die Wirksamkeit der Maßnahmen und somit die MRT-Kompatibilität zu untersuchen, wurden Rauschspektren für drei Arbeitspunkte aufgenommen, für ein ausgeschaltetes, aber verbundenes System, für ein sich im Stand-by befindliches System und während einer IRE-Sequenz.

Die aufgenommenen Rauschspektren zeigen, dass es trotz der Maßnahmen zu Interferenzen zwischen IRE System und MRT kommt (siehe Abbildung 3.34). Vielmehr treten ganz spezielle Peaks auf, die auf Schaltprozesse innerhalb des Systems zurück zu führen sind. Das Spektrum während der Therapie zeigt, dass auch die Pulse selbst in den Scanner einkoppeln. Trotz dieser Interferenzen ist kein signifikanter Anstieg der Grundlinie erkennbar. Es lässt sich somit sagen, dass mithilfe des entwickelten IRE-Systems MR-geführte IRE möglich ist. In weiteren Iterationen des Prototypen sollte allerdings eine Synchronisation zwischen MRT und IRE-System implementiert werden. So kann möglichen Artefakten durch Schaltprozesse entgegen gewirkt werden.

Simulative Abschätzung des Einflusses eines Höhenscans in Vollabsorberhallen auf die maximale gemessene Feldstärke²³

Die CISPR 16-2-3 schreibt für gestrahlte Störaussendungsmessungen mit Bodenabsorbern in einem bevorzugten Abstand von 3 m für den Frequenzbereich > 1 GHz eine feste Messantennenhöhe vor. In einer Aktualisierung der Norm wird eine Höhenvariation der Messantenne diskutiert, welche die Wahrscheinlichkeit der Maximumsfindung bei der Emissionsmessung steigern würde. Das zugrundeliegende Messverfahren von CISPR 32 sieht eine solche Antennenhöhenvariation von 1 m bis 4 m vor, wobei die Antenne aber nicht auf den Prüfling gerichtet wird, sondern immer horizontal ausgerichtet bleibt, so dass bei kleinen Prüflingen in 1 m Prüflingshöhe die Antenne bei zunehmender Antennenhöhe den Prüfling immer weniger sieht. Außerdem nimmt der Abstand

²³von Dr.-Ing. Dipl.-Phys. Jörg Petzold

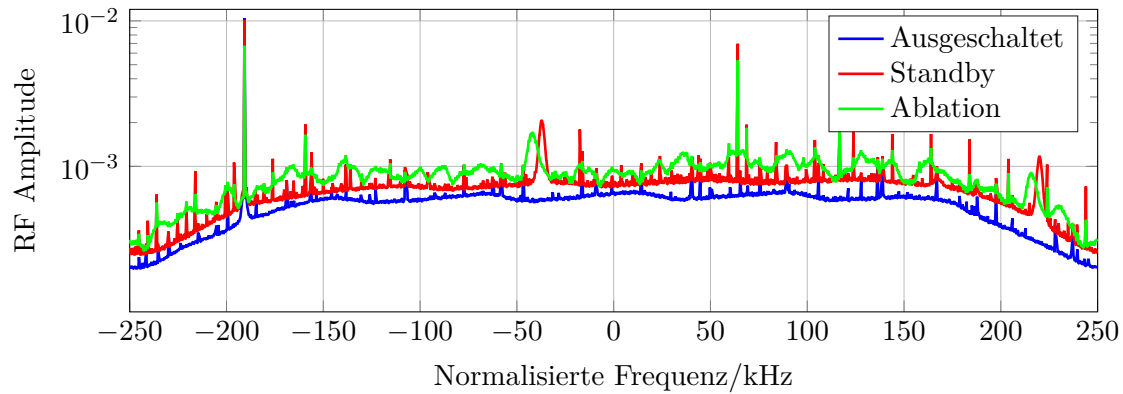


Abbildung 3.34: Auswirkung des IRE-Generators auf das für die MR-Bildgebung relevante RF-Spektrum

zum Prüfling mit zunehmender Antennenhöhe zu. Die Frage ist nun, um welchen Faktor bzw. welches Maß in dB die maximale gemessene Feldstärkeemission zunimmt.

Simulationsmodell Ziel ist eine effiziente Simulation gestrahlter Störaussendungsmessungen nach CISPR 16-2-3. Dazu wird eine numerische Monte-Carlo-Simulation mit einem statistischen Strahler durchgeführt. Um die Messung in einer Vollabsorberhalle nach CISPR 16-2-3 mit Hilfe des Modells nachzubilden, wurde ein hochaufgelöstes Abstrahldiagramm mit einer Winkelauflösung von $0,5^\circ$ für die jeweils betrachtete Frequenz bestimmt. Der dabei auftretende maximale Betrag des Feldes wurde als *wahres Maximum* bezeichnet. Anschließend wurde dasselbe Abstrahldiagramm mit der in CISPR 16-2-3 festgelegten Winkelauflösung in der Azimutebene ($\theta = 90^\circ$) abgetastet. Das so ermittelte Maximum wird in Abb. 3.35 als *Standard* bezeichnet. Um den Effekt eines zusätzlichen Höhenscans zu untersuchen, wurde der abgetastete Bereich in der Polarrichtung auf $\theta = 45^\circ$ bis 90° erweitert. Um den Einfluss des dabei zunehmenden Abstands zwischen dem Strahler und der Messantenne zu berücksichtigen, wurde ein Korrekturfaktor bei der Berechnung des Feldes eingeführt, der die Fehlauseinrichtung der Antenne berücksichtigt.

Dieses Prozedere wurde dann für 150 verschiedene elektrische Größen im Intervall $ka = 0,5$ bis 100 für eine einzelne Realisierung durchgeführt, wobei a der Radius der kleinsten, den Prüfling umschließenden Kugel ist und k die Wellenzahl bezeichnet. Der gesamte Prozess wurde anschließend für 1000 zufällige Realisierungen wiederholt, um abschließend die Mittelwerte der bestimmten maximalen Feldstärken, die in Abb. 3.35 dargestellt sind, zu bestimmen. Dabei wurde ein Kugelradius von $a = 0,25$ m gewählt, um die Ergebnisse auf der leichter interpretierbaren Frequenzachse darstellen zu können.

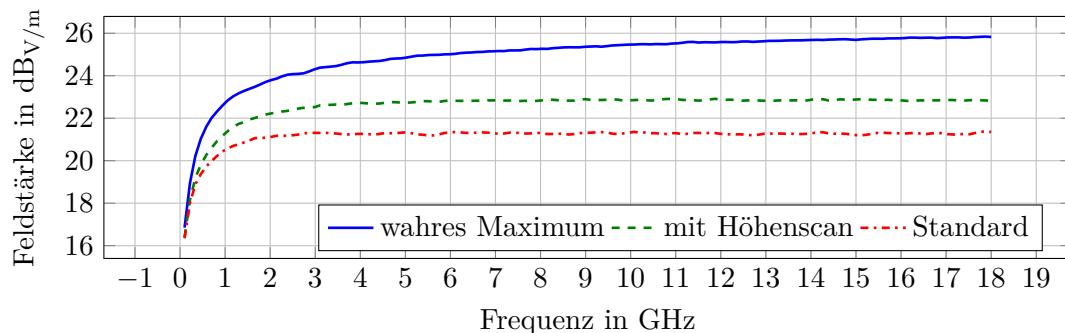


Abbildung 3.35: Mittelwerte der nach verschiedenen Verfahren bestimmten Maximalwerte der Beträge der abgestrahlten Feldstärke im Fernfeld statistischer Strahler

Ergebnis Ab 2 GHz ist durch den Höhenscan eine mögliche Grenzwertverletzung von ca. 1,5 dB begründbar. Das wahre Emissionsmaximum wird allerdings auch dann noch um mehrere dB unterschätzt, wobei dieser Fehler mit der Frequenz ansteigt. Aus den Simulationsergebnissen lässt sich schließen, dass die maximale Feldstärke für elektrisch große Prüflinge keine aussagekräftige Messgröße ist, weil die Abstrahldiagramme sehr schmale Keulen bekommen, die aufwendig zu finden sind. Gleichzeitig sinkt natürlich auch die Wahrscheinlichkeit, dass sich eine Störsenke genau in einer solchen schmalen, aber starken Abstrahlkeule befindet.

Statt eines zeitaufwendigen Höhenscans, der in kleinen FARs auch unmöglich ist, wäre es als Ergebnis der Simulationen empfehlenswerter, den Prüfling auf die Seite zu legen und per Drehtisch zwei weitere Schnittebenen zu vermessen, um auch zu ermitteln, was der Prüfling nach oben sowie unten strahlt und somit näher an das tatsächliche Maximum der Abstrahlung heranzukommen. Außerdem wäre es wünschenswert, alle Messwerte abzuspeichern, um aus dem Verhältnis von Mittelwert und Maximalwert eine Direktivität bzw. statistische Messunsicherheit durch die Unterabtastung des Abstrahldiagramms abzuschätzen.

Schaltungsmodelle für abgeschirmte Kabel²⁴

Geschirmte Leitungen werden in vielen elektrischen Systemen verwendet, um den Innenleiter vor leitungs- und feldgebundenen Störungen zu schützen. Geflochtene Schirme bieten dabei eine höhere Flexibilität bei der Kabelführung als durchgehende Metallzylinder und werden daher häufiger verwendet. Durch die sich durch die Verflechtung ergebenden Öffnungen in der Abschirmung können Felder bis zu dem Innenleiter vordringen und das System stören. Diese Kopplungsmechanismen können in Schaltungssimulationsprogrammen nur in sehr begrenztem Umfang untersucht werden, da ihre Bibliotheken noch keine Modelle abgeschirmter Kabel über einer Masseebene aufweisen. Dies schränkt die EMV-Analyse geschirmter Systeme maßgeblich ein.

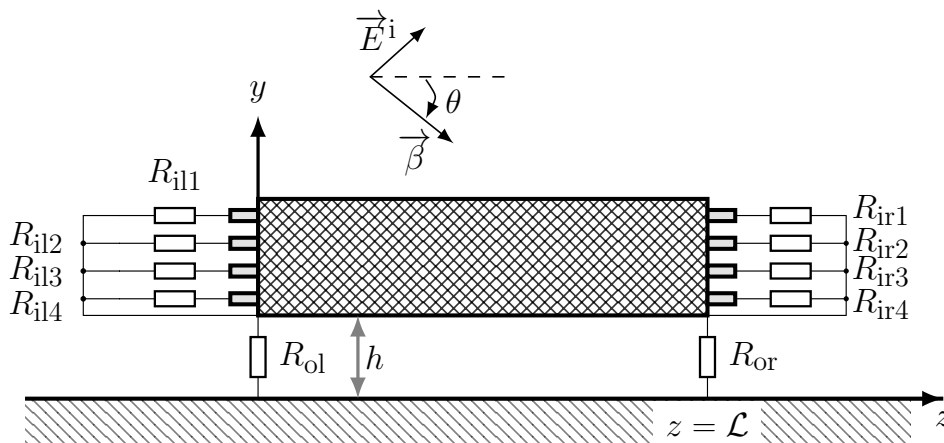


Abbildung 3.36: Simulationsbeispiel für eine geschirmte Mehrfachleitung

Im Rahmen dieses Projektes wurden auf Basis der Leitungstheorie Schaltungsmodelle für geschirmte Leitungen entwickelt, die die Kopplung zwischen äußerem und innerem Schirmbereich berücksichtigen. Die entworfenen Modelle können die induzierten Spannungen durch einfallende elektromagnetische Wellen berechnen und eine EMV-Analyse im Frequenz- und Zeitbereich durchführen. Basierend auf den aktuellen Ergebnissen des Projekts konnten Schaltungsmodelle für geschirmte Mehrfachleiter durch Kaskadierung des Kabels in vielen Abschnitten entworfen werden.

²⁴von M. Sc. Moustafa Raya

Ein Simulationsbeispiel für ein abgeschirmtes Kabel unter Berücksichtigung der Feldkopplung ist in Abbildung 3.36 dargestellt. Eine gepulste ebene Welle mit dem Einfallswinkel θ und dem elektrischen Feld $\vec{E}^i$ bestrahlt das Kabel. Die über R_{ill} induzierte Störspannung bei der Aufteilung des Kabels in eine unterschiedliche Anzahl von Abschnitten N_s ist in Abbildung 3.37 dargestellt. Die Validierung erfolgt durch Vergleich der Ergebnisse mit der Simulationssoftware CST.

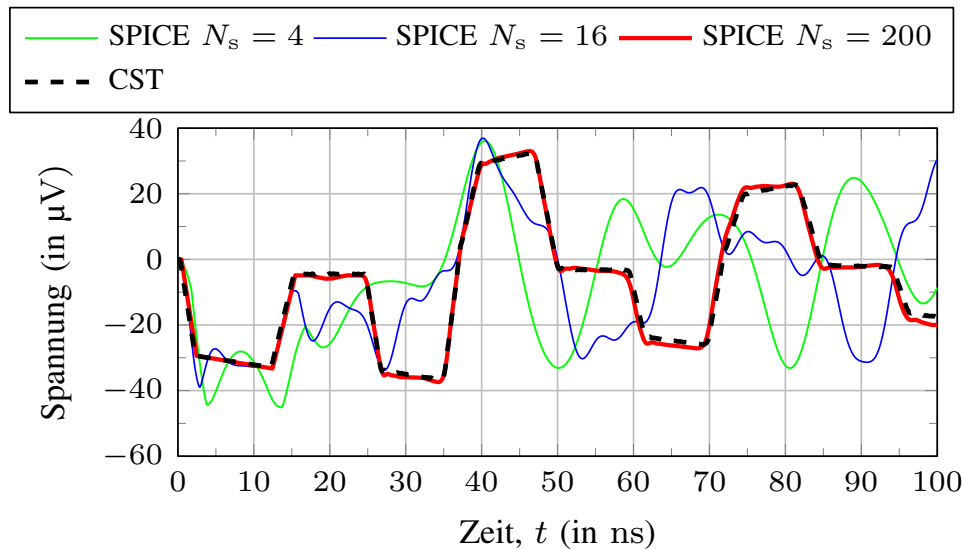


Abbildung 3.37: Simulationsergebnisse der geschirmten Leitung

Kompetenzzentrum eMobility – Gesamtfahrzeug²⁵

Hierbei konzentrieren sich die Arbeiten auf die Entwicklung und Erprobung einer wartungsfreundlichen Energiespeichertechnologie in Modulbauweise, neue, einfache Systemarchitekturen für Fahrzeugsteuerungen und die systemische Gestaltung von Spezialanwendungen rund um die Batteriekonfektionierung.

Im Rahmen des Teilprojektes „Energieeffizientes, sicheres Hochvoltnetz für Elektrofahrzeuge“ wird eine Architektur für eine modulare Fahrzeugbatterie erarbeitet. Die aus vielen Modulen zusammengesetzte Batterie ist über eine Leistungselektronik an das Hochvolt-Bordnetz angeschlossen. Die Leistungselektronik stellt das erforderliche Klemmenverhalten ein und ist für das Lade-/Entlademanagement verantwortlich.

Bereits im Entwurfsstadium auf Baugruppen- und Systemebene soll durchgängig die elektromagnetische Verträglichkeit berücksichtigt werden. Dazu werden u. a. die Impedanzen bei hohen Frequenzen für die Traktionsbatterie gemessen. Die Messungen werden bereits für einzelne Module durchgeführt, wie in Abbildung 3.38 zu sehen ist. Hier wird eine Impedanzmessung mit einem Impedanzanalysator durchgeführt

Prüfumgebung für automatisierte und autonome Elektrofahrzeuge²⁶

In diesem Projekt werden die Grundlagen für den Aufbau einer Testumgebung für autonome Fahrzeuge geschaffen. Es werden die notwendigen Kompetenzen im Bereich Testen und Prüfen

²⁵ von M. Sc. Moustafa Raya

²⁶ von Dr.-Ing. Dipl.-Phys. Jörg Petzold, M. Sc. Moustafa Raya

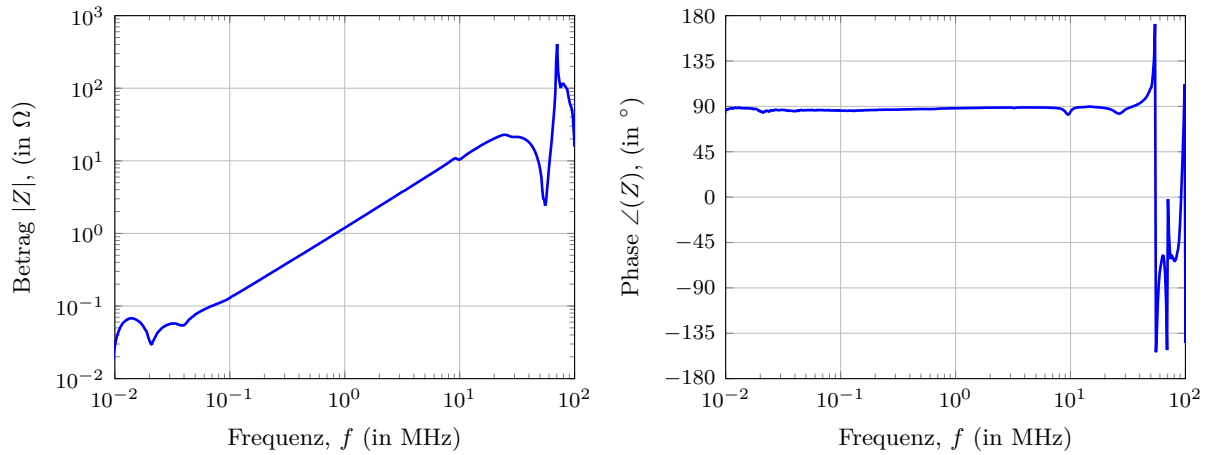


Abbildung 3.38: Impedanzmessung eines Batteriemoduls

von Komponenten und Systemen für das autonome Fahren aufgebaut. Das Fernziel ist es, die Funktionalität des gesamten Fahrzeugs als *Hardware in the Loop* zu demonstrieren.

Das Teilprojekt „Prüfumbgebung für automatisierte und autonome Elektrofahrzeuge“ wird vom Lehrstuhl für Elektromagnetische Verträglichkeit und dem Lehrstuhl für Messtechnik betreut. Hier wird eine Testplattform zur Radarzielsimulation mit Implementierung der notwendigen Steuerungssoftware aufgebaut.

Die Hardware, die aus einem MIMO-Radar, HF-Frontend sowie einer analogen und digitalen Signalverarbeitung zur Erzeugung von Echosignalen besteht, wurde aufgebaut. Dies ermöglichte Zielsimulationen mit einer Bandbreite von 160 MHz und die Visualisierung von 5 Zielen gleichzeitig, wodurch die Position und Geschwindigkeit der Ziele gemessen werden konnte, wie in Abbildung 3.39 gezeigt.

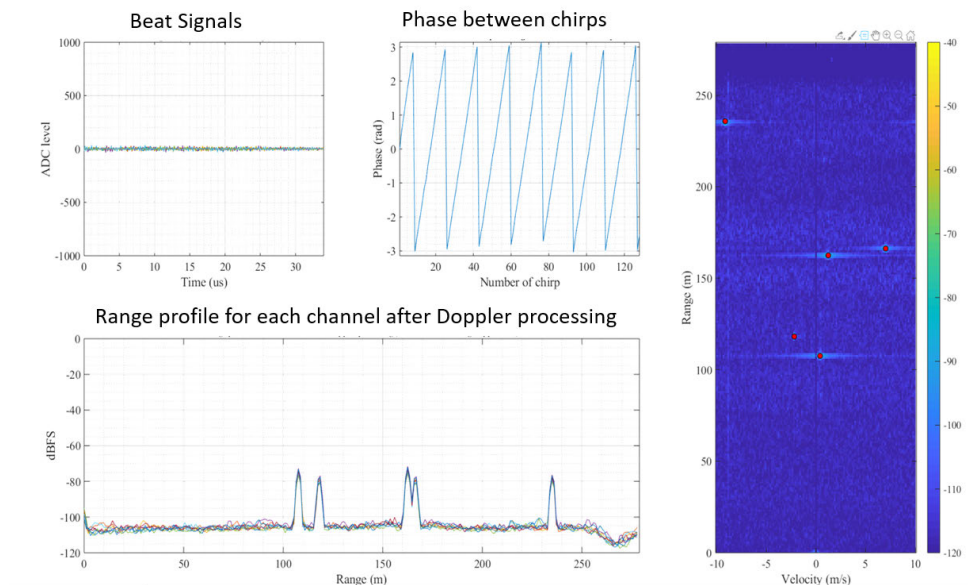
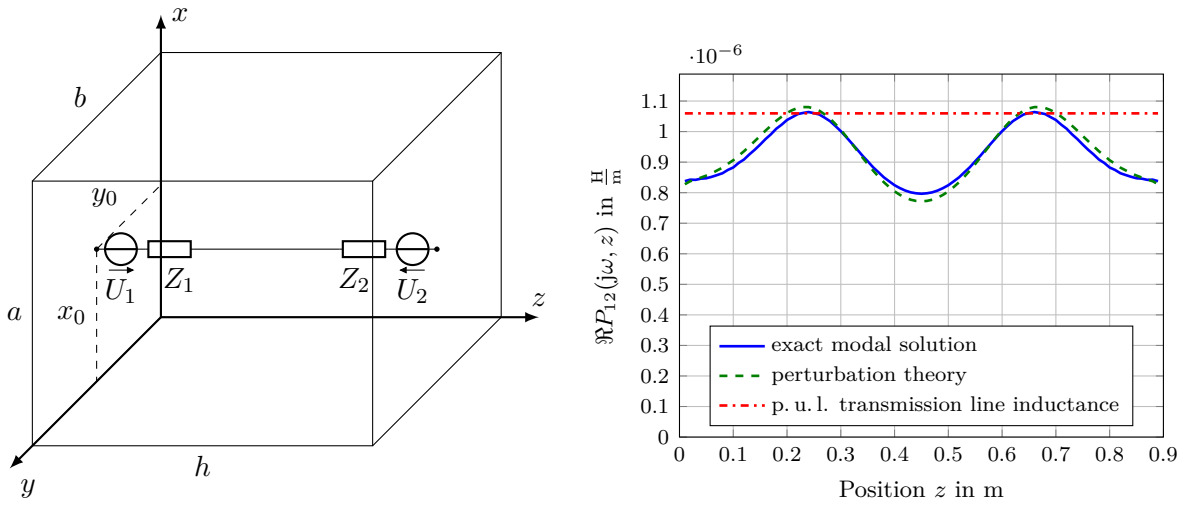


Abbildung 3.39: Simulationsergebnisse für autonomes Fahren

Full-Wave Transmission Line Theory (FWTLT) for a Thin-Wire Transmission Line inside a Rectangular Resonator²⁷

The coupling of high-frequency electromagnetic field to transmission lines is one of the main problems in electromagnetic compatibility. Often the transmission lines are arranged in resonator-like objects, such as computer cases, aircraft fuselages, cars, etc. A change in the geometric environment can radically affect the coupling. The most used numerical methods like MoM, TLM, etc. to solve the problem consider only specific cases and do not provide a general physical understanding. On the other hand, if the wavelength at low frequencies is much greater than the transverse dimension of a transmission line in free space the so-called classical transmission line approximation (CTLA) is applicable. This approximation provides an analytical solution for the coupling problem and allows a qualitative analysis of the solutions.

The CTLA has been generalized at high frequencies by the so-called full-wave transmission line theory (FWTLT), which can be derived from the exact system of mixed-potential integral equations (MPIE) that, in turn, can be derived from the Maxwell equations. The scattered current and the potential along the line are described by a system of first order differential equations, which is similar to the telegrapher equation system of CTLA. However, the corresponding parameter matrix $\mathbf{P}(j\omega, l)$ has complex values, is length-dependent and contains diagonal elements. The non-classical parts of the parameter matrix, here the diagonal elements and the imaginary parts of the non-diagonal elements, define the radiation of the system. These parameters can be obtained, e. g., from the solutions of the current and the potentials that are excited by the left and right lumped voltage sources (admittance functions) or by a perturbation theory.



(a) Loaded thin-wire line with symmetrical geometry in a rectangular resonator (Resonator: $a = 1.5$ m, $b = 1.2$ m, $h = 0.9$ m; Transmission line: $x_0 = 9$ cm, $y_0 = 37$ cm, $r_0 = 1$ mm) (b) Length dependence of the real part of the element $P_{12}(j\omega, z)$ (inductance-like) of the parameter matrix for the high-frequency case far from the cavity resonances at a wave number of $k = 8.6 \frac{1}{\text{m}}$

Figure 3.40: Full-Wave Transmission Line Theory (FWTLT) for a Thin-Wire Transmission Line inside a Rectangular Resonator

In the present work, we derive an exact MPIE equation for the current and the potential along a thin wire located in an arbitrary geometric environment with known Green function, where the wire is excited by an EM field. In the case of a transmission line with a symmetrical geometry within a rectangular resonator (see Fig. 3.40a), the MPIE can be explicitly solved analytically by using the method of modal parameters, including the case of a lumped excitation with a loaded line.

²⁷von Dr. rer. nat. Sergey Tkachenko, Prof. Jürgen B. Nitsch†, M. Sc. Moustafa Raya and Prof. Dr.-Ing. Ralf Vick

Then we generally show that the exact MPIE equation for the current and potential along a thin-wire line excited by an arbitrary terminal lumped source(s) can be reduced to the FWTLT system of first-order differential equations. This system of equations is similar in form to the Telegrapher's equations. As in the case of free space, the parameter matrix of this system $\mathbf{P}(j\omega, l)$ can be built on the basis of the partial solutions of MPIE with lumped excitations and does not depend on their choice and amplitudes. This matrix is length dependent and contains diagonal elements. In contrast to a line in free space, in a lossless resonator, the non-diagonal elements are purely real and the diagonal elements are purely imaginary. Then we have introduced the perturbation theory for the parameters, investigated its application using the numerical examples (see Fig. 3.40b), and analyzed the results.

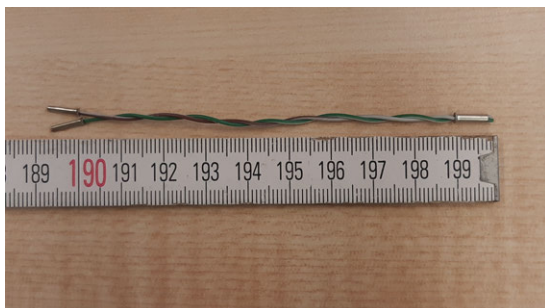
Einfluss verschiedener Datenformate auf frequenzabhängige mit Impedanzanalysatoren gemessene Impedanzen²⁸

Impedanzanalysatoren erlauben die einfache Messung von frequenzabhängigen Impedanzen an beliebigen Bauelementen über einen weiten Frequenzbereich und sind somit ein wichtiges und nützliches Werkzeug für die Erstellung von EMV-Modellen. Je nach Gerät und Hersteller sind verschiedene Datenformate zur Speicherung der Messwerte möglich:

- direkt als Betrag (in Ω) und Phasenwinkel (in $^\circ$) der Impedanz,
- indirekt durch Streuparameter $\underline{s}_{11}$ als Betrag (einheitenlos) und Phasenwinkel (in $^\circ$),
- indirekt durch Streuparameter $\underline{s}_{11}$ als dB-skaliertes Betrag und Phasenwinkel (in $^\circ$),
- indirekt durch Streuparameter $\underline{s}_{11}$ als Real- und Imaginärteil (einheitenlos).

Die Wahl des Datenformats erscheint zunächst beliebig. Im Forschungsprojekt wurde demonstriert, dass man aber je nach Datenformat signifikant unterschiedliche Ergebnisse für sehr große oder sehr kleine Impedanzen erhält, in denen der Betrag des Reflexionsfaktors nahezu 1 ist und kleine Rundungsfehler einen entsprechend großen Einfluss haben. Die gleiche Problemstellung tritt auch auf, wenn man Impedanzen mit einem Vektornetzwerkanalysator indirekt über Streuparameter statt direkt mit einem Impedanzanalysator messen würde.

Entsprechende Beispielmessungen wurden im Forschungsprojekt durchgeführt, z. B. die experimentelle Bestimmung des Kapazitätsbetrags einer 10 cm langen leerlaufenden Zweidrahtleitung mit einem Impedanzanalysator E4990A von Keysight, siehe Abbildung 3.41.



(a) 10 cm lange leerlaufende Zweidrahtleitung



(b) Impedanzmessung mit einem Impedanzanalysator E4990A von Keysight

Abbildung 3.41: Beispielhafte experimentelle Bestimmung des Kapazitätsbetrags einer Leitung

²⁸ von Dr.-Ing. Mathias Magdowski und Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Volksw. Matthias Hampe, Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften – Hochschule Braunschweig/Wolfenbüttel, Deutschland

Die zugehörigen Messergebnisse für den frequenzabhängigen Betrag der Impedanz sind in Abbildung 3.42 für verschiedene Datenformate dargestellt. Insbesondere im durch Messunsicherheiten verrauschten unteren Frequenzbereich treten auch die größten Abweichungen auf.

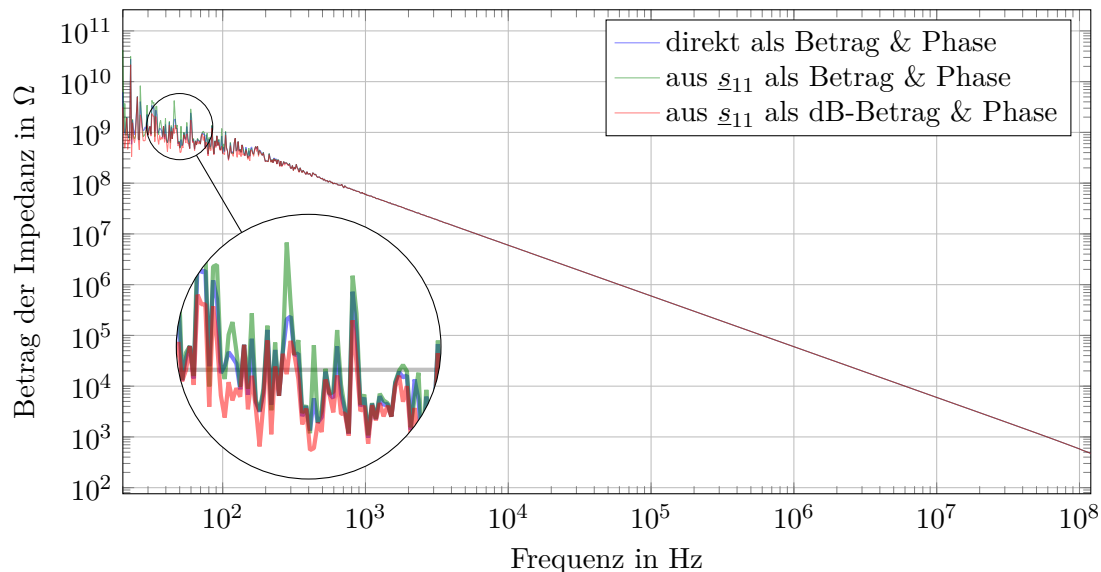


Abbildung 3.42: Betrag der einmalig gemessenen frequenzabhängigen Impedanz einer leerlaufenden 10 cm langen Zweidrahtleitung nach Speicherung in unterschiedlichen Datenformaten

Beobachtete Erkenntnisse und deren Anwendbarkeit Ähnliche Beobachtungen werden für weitere Beispielmessungen und andere Kennwerte der komplexen Impedanz ausgewertet, z. B. deren Phasenwinkel sowie den Real- und Imaginärteil.

Zur theoretischen Validierung werden auch entsprechende numerische Simulationen durchgeführt, in denen eine ohmsch-kapazitive Impedanz simuliert und in einen Reflexionsfaktor umgerechnet wird. Dieser wird dann auf eine bei Impedanzanalysatoren übliche Anzahl von Nachkommastellen gerundet und in eine Impedanz zurückgerechnet. Je nach Kapazität bzw. Widerstand sowie der Rundungsgenauigkeit treten ähnliche Artefakte wie bei den Messdaten auf.

Die Ergebnisse des Forschungsprojekts bieten so eine fundierte Entscheidungsgrundlage, um bei Impedanzmessungen ein geeignetes Datenformat auszuwählen. Den Geräteherstellern werden zudem entsprechende Handlungsempfehlungen zur Implementierung bereit gestellt.

Messung und Simulation der Eigenresonanzen durch Mehrfachreflexionen in einem Leitungsnetzwerk im Frequenz- und Zeitbereich²⁹

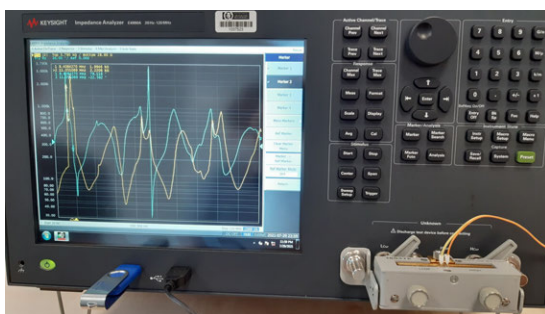
Feldbusse aus dem Automobilbereich wie CAN, EtherCAT, LIN oder FlexRay können die Bus Teilnehmer bzw. Steuergeräte in verschiedenen Verkabelungstopologien wie Bus, Ring, Stern oder Baum miteinander verbinden. Verschiedene Topologien benötigen abweichende Kabellängen und bieten unterschiedliche Ausfallsicherheit oder Erweiterbarkeit. Auch die maximal erreichbare Übertragungsrate bzw. das EMV-Verhalten des Feldbusses wird durch die Topologie bestimmt, da eventuelle Mehrfachreflexionen durch fehlangepasste Leitungsenden und Knotenpunkte zu unerwünschten Signalüberlagerungen führen. Im Zeitbereich äußert sich das durch ein Einschwingverhalten mit gedämpften Schwingungen und entsprechenden Zeitkonstanten. Im

²⁹von Dr.-Ing. Mathias Magdowski, M.Sc.. cand. Peter Markgraf und M.Sc.. cand. Phillip Schulz

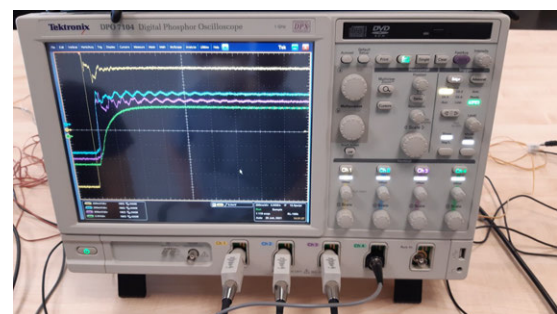
Frequenzbereich weisen solche fehlangepassten Leitungsnetzwerke scharfe Resonanzstellen mit entsprechend hoher Güte auf.

Messung von Netzwerkresonanzen im Frequenz- und Zeitbereich Zur experimentellen Untersuchung solcher Feldbusnetze bieten sich im Frequenzbereich Impedanzanalysatoren an, mit denen die frequenzabhängige komplexe Eingangsimpedanz an den Leitungsenden bzw. an Knotenpunkten gemessen und auf Resonanzstellen bzw. Extremwerte des Betrags oder schnelle Phasenänderungen untersucht werden kann, siehe das Beispiel in Abbildung 3.43a.

Für transiente Untersuchungen lassen sich Oszilloskope nutzen, um z. B. das Einschwingverhalten bzw. die Sprungantwort nach einer Schaltflanke zu messen, siehe das Beispiel in Abbildung 3.43b. Als Anregung können einfache Signalgeneratoren zur Erzeugung von Rechteckpulsfolgen bzw. Taktsignalen genutzt werden.



(a) Eingangsimpedanzmessung im Frequenzbereich



(b) Sprungantwortmessung im Zeitbereich

Abbildung 3.43: Messungen an einem konkreten Beispielleitungsnetzwerk

Vergleich von Mess- und Simulationsergebnissen für ein Beispielleitungsnetzwerk Im Forschungsprojekt wurden entsprechende Messergebnisse für ein konkretes Beispielleitungsnetzwerk aus vier Leitungen sowie vier Steuergeräten (nachgebildet durch verschiedene Lastwiderstände) diskutiert und mit zugehörigen Simulationsergebnissen aus MATLAB und LTspice verglichen. Das gewählte Netzwerk stellt dabei eine Art Worst-Case-Szenario mit besonders schlechter Anordnung der Leitungen und Steuergeräte dar, das aufgrund starker Fehlanpassungen viele Mehrfachreflexionen und hohe Resonanzgüten erwarten lässt.

Mit solchen Messungen können zeit- und frequenzbereichsbasierte Simulationsmodelle für Leitungsnetzwerke validiert werden. Außerdem lässt sich abschätzen, welchen Einfluss die typischen Vereinfachungen in den Simulationsmodellen (z. B. verlustlose Leitungen, konzentrierte und rein ohmsche Abschlusswiderstände, frequenzunabhängige Wellenimpedanzen, dispersionsfreie Signalausbreitung, etc.) auf die Gültigkeit und Genauigkeit der Ergebnisse haben. Dementsprechend sind die im Forschungsprojekt erarbeiteten Ergebnisse sehr nützlich für die Weiterentwicklung von Simulationsmodellen und -verfahren für die Abschätzung der erreichbaren Übertragungsrate und Signalintegrität sowie des EMV-Verhaltens in Feldbussen.

Method of Modal Parameters for the Thin-Wire Open-Circuit Wiring Structures and the Regge Method³⁰

Different numerical methods (MoM, FDTD, etc.) can be used to calculate currents and voltages induced in wiring systems by external EM fields, but they are not very helpful to gain insight

³⁰von Dr. rer. nat. Sergey Tkachenko, M. Sc. Felix Middelstädt and Prof. Dr.-Ing. Ralf Vick

into the physics of coupling phenomena. Analytical methods do not have such disadvantage. One of such methods – the Method of Modal Parameters (MoMP) – was developed earlier in our chair. In this method the system of exact Mixed Potential Integral Equations (MPIE), which is obtained directly from Maxwell equations for thin wires, describing induced current and potential along the line, can be reduced to matrix equations with modal parameters: infinite matrixes of inductance and capacitance. These parameter matrixes are calculated by Fourier transformation of the kernels of the first and the second of MPIE, correspondingly, by using as basic functions the eigen functions of the system of wires for infinitesimal radius of the wire.

The solution of this system with further inverse Fourier transformation yields induced current and potentials. The eigen frequencies of the system is given by the poles of the resolving matrix, which is an inverse to the impedance per-unit-length matrix. For the finite system of wires with symmetrical geometry, i. e. a circular wire and its symmetrical combinations, e. g., a semi-circular wire perpendicular to a perfect conducting ground, all modal parameter matrix become diagonal and the solution is reduced to a single sum. This gives a possibility to consider an excitation of such systems by a lumped voltage source using so named Regge method, which is known in scattering theory in quantum mechanics.

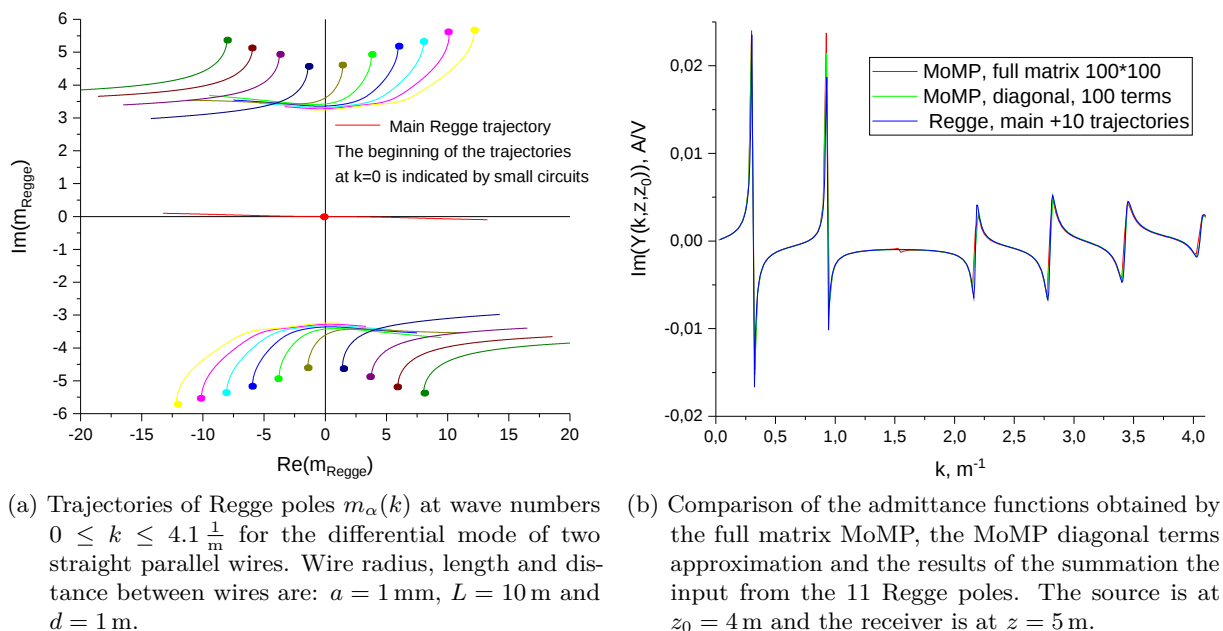


Figure 3.44: Method of Modal Parameters for the Thin-Wire Open-Circuit Wiring Structures and the Regge Method

In this work, we consider single and double finite wires with symmetrical geometry: straight wire, circular wire and helix wire, which are important for EMC practice. For such geometries corresponding MPIE systems are reduced to the separate uncoupled MPIE for differential and common current modes. For each mode we have solved these equations by the MoMP. Due to the fact, that the kernels of the MPIE for such systems of wires depend on the difference of arguments, during the calculation of corresponding matrix elements one can carried out a single integration instead of double one in the general case of arbitrary wires, which essentially reduce time of calculation. Moreover, we have found that to describe the current induced by a lumped voltage source in these thin symmetrical wires, it is sufficient to take into account only the diagonal terms of the corresponding matrices of modal parameters, i. e., the solution is approximately reduced to a single summation, as in the case of a circular wire (see Fig. 3.44b).

This circumstance gives a possibility to apply powerful Regge method for the summation of such

series. In this method, the summation index m is considered as a complex variable. Then, we use the Watson-Regge transformation and represent the Fourier sum as an integral in the complex plane of the parameter m . The integral is defined by the zeros of the modal impedance per-unit length in the complex plane of the parameter m , which zeros define the so called Regge poles. The positions of the poles on the complex plane depend on the frequency and form so called Regge trajectories (see Fig. 3.44a). Our approach reduced summation over m , which require several hundred terms, to summation over Regges poles, which requires about ten terms (see Fig. 3.44b). By this way, one can obtain Green's function for pair „lumped voltage source $\rightarrow$ induced current“, or, admittance function $Y(l, l')$, which is essential in electrical engineering.

Sicherung der Versorgungsqualität durch optimierten Einsatz verteilter, aktiver OberschwingungsfILTER in Verteilnetzen (SiQuaNetz)³¹

Das sich im Wandel befindende elektrische Energienetz steht durch den Umbau großer Kraftwerksleistungen hin zu kleineren, verteilten Erzeugungsklustern sowie der rasanten Veränderung von Verbrauchern und Verbrauchsverhalten vor großen Herausforderungen. Dieser Wandel geht aufgrund zunehmender Verwendung leistungselektronischer Schaltungen bei gleichzeitiger Abnahme der Kurzschlussleistung des elektrischen Netzes mit Netzzrückwirkungen einher, die sich auf alle am Netz befindlichen Betriebsmittel negativ auswirken können. Eine etablierte Möglichkeit zur Reduktion von nicht-sinusförmigen (auch überschwingungsbehafteten) Strömen stellt die Kompensation dieser mithilfe von parallel zum Verursacher angeschlossenen aktiven Filtern dar. Dabei wird der Verbraucherstrom gemessen und dessen Oberschwingungsanteil vom Filter eingespeist. Dies führt zur Entlastung des Netzes. Durch ungünstige Konstellationen von Verbrauchern kann eine Stromkompensation jedoch auch zu einer Verschlechterung der Spannung am Anschlusspunkt des Verbrauchers/Filters führen.

In dem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten und mit mehreren Partner durchgeführten Verbundprojekt *SiQuaNetz* wird ein neuartiger Ansatz zur Eindämmung von Netzzrückwirkungen verfolgt. Hierbei sollen nicht Stromharmonische einzelner Lasten, sondern auf Basis derer Rückwirkungen auf die Netzspannung gemessen und kompensiert werden. Ziel soll es sein, die gemessene Netzspannung zu stabilisieren, Oberschwingungen zu kompensieren und Resonanzen zu minimieren. Von Vorteil dabei ist, dass auf etablierte Hardwaretopologien wie einer 6- oder 12-Pulsbrückenschaltung zurückgegriffen werden kann. Letztere wird aufgrund ihrer geringeren Ripplestörungen des Ausgangsstromes im Projekt *SiQuaNetz* als T-Type-Ausführung verwendet und ist in Abbildung 3.45 dargestellt.

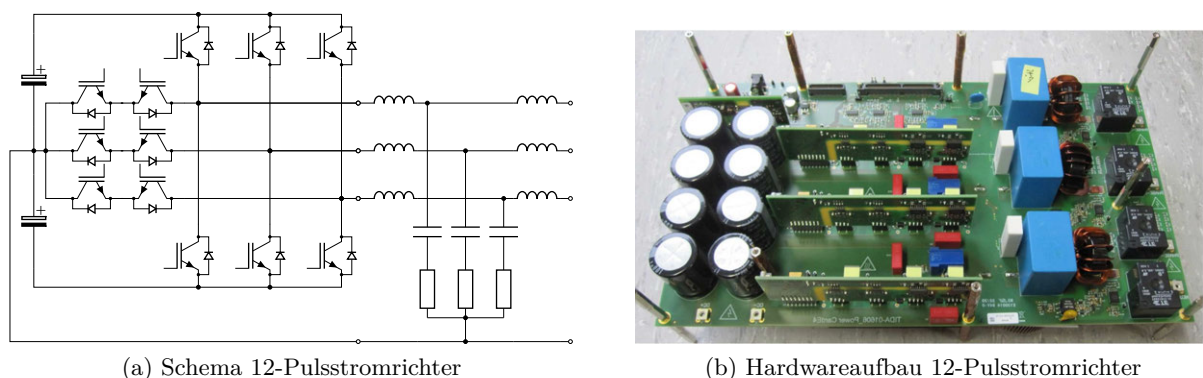


Abbildung 3.45: Prinzipdarstellung und Hardwareaufbau des Netzfilters

³¹ von M. Sc. Benjamin Hoepfner

Danksagung Diese Arbeit wurde unter dem Kennzeichen 0350052A vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Identifikation von zivilen Drohnen anhand von Eigenfrequenzen ³²

Der Fortschritt in Elektronik und Sensorik hat zu einem preisgünstigen Aufbau von unbemannten elektromotorisch betriebenen zivilen Luftfahrzeuge (UAV) geführt. Die Preisentwicklung führt zu einer Vielzahl an verfügbaren Flugmodellen, die auch bei schwierigen Witterungsbedingungen gut fliegen. Mit diesem Trend nimmt auch die Möglichkeit von kriminellen oder terroristischen Zwischenfällen an kritischen Infrastrukturen wie z. B. Flughäfen zu. Effiziente Schutzkonzepte existieren gegenwärtig nicht. Für zukünftige Sicherheitskonzepte spielt neben der Störung bzw. Zerstörung, die automatische Identifikation und Lokalisierung der UAVs eine wichtige Rolle.

Die von Carl Baum begründete *Singularity Expansion Method* (SEM) beschreibt, dass sich die transiente elektromagnetische Systemantwort von Objekten aus einer Impulsantwort (*early-time*), die sich aus der direkten Reflexion der einfallenden Welle an der Objektoberfläche und einer Summe von gedämpften Oszillationen (*late-time*), die auf das Resonanzverhalten des Objekts zurückzuführen sind, zusammensetzt. Die Eigenfrequenzen des Objekts sind unabhängig von der Anregung und hängen nur von dessen Geometrie ab, wodurch sie geeignete Klassifikatoren für automatische Objekterkennung darstellen. Für die numerische Bestimmung der Eigenfrequenzen aus verrauschten Simulationsdaten haben sich das *Vector Fitting* (VF) im Frequenzbereich und die *Matrix Pencil Method* (MPM) im Zeitbereich etabliert.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der messtechnischen Bestimmung des rückgestreuten elektromagnetischen Feldes mithilfe eines Vektornetzwerkanalysators und eines mono-statischen Radaraufbaus in einer Absorberhalle. Anhand einfacher resonanter Modelle wird die Extraktion der Eigenfrequenzen durch das VF und der MPM mit Simulationsdaten validiert und auf UAVs erweitert. Abbildung 3.46 zeigt Ergebnisse eines Dipols mit der Länge $L = 15$ cm. Die Ergebnisse zeigen, dass mit den verwendeten Methoden die Eigenfrequenzen aus der gemessenen Frequenzantwort in guter Näherung zur Simulation extrahiert werden konnten.

3.3.3 Promotionen

Dr.-Ing. Johanna Kasper: Analysis of the Stochastic Electromagnetic Field Coupling to Single and Multiconductor Transmission Line Structures

Gutachter:

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

verteidigt am 10. September 2021 an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (siehe Abbildung 3.47)

In dieser Dissertation werden Übertragungsleitungen und ihr Verhalten in einer Modenverwirbelungskammer analysiert. Zu diesem Zweck wird eine zeiteffiziente semianalytische Lösung zur Berechnung der Einkopplung stochastischer elektromagnetischer Felder in ein- und mehradrige

³²von Dipl.-Ing. Max Rosenthal

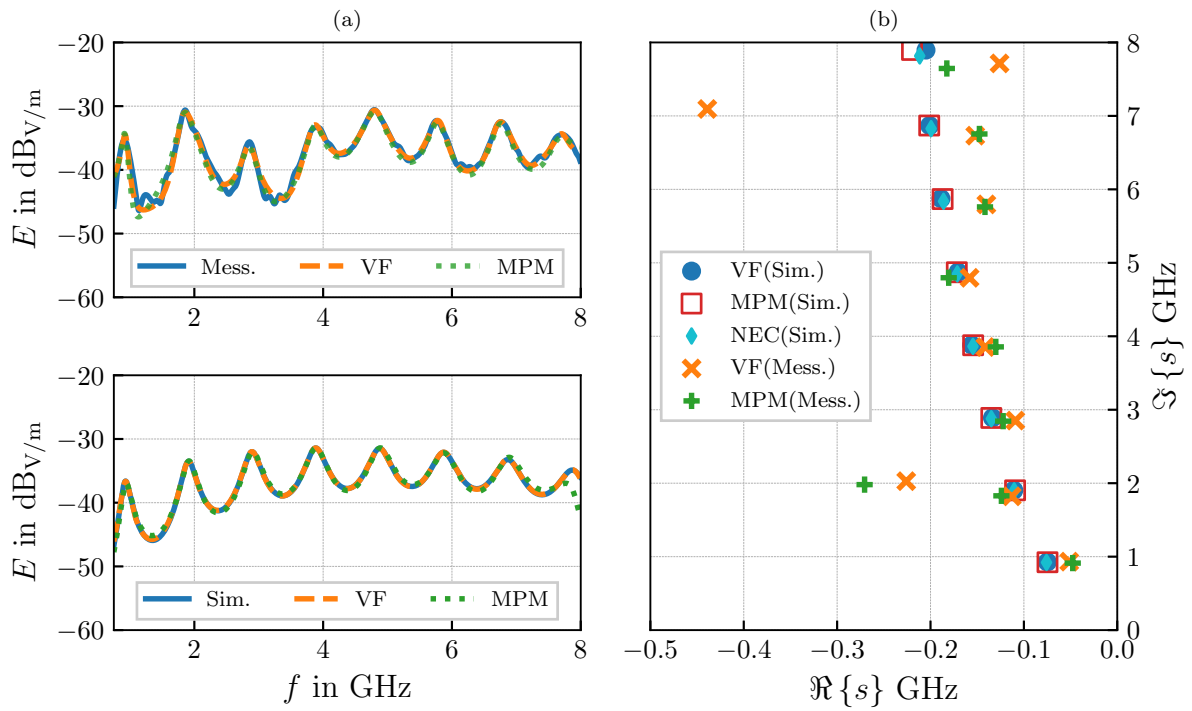


Abbildung 3.46: (a) Gemessene, simulierte und aus den extrahierten Polstellen rekonstruierte Frequenzantwort; (b) mithilfe des VF und der MPM extrahierte Polstellen aus den gemessenen und simulierten Frequenzantworten eines Dipols



Abbildung 3.47: Gratulation an Johanna Kasper am Otto-von-Guericke-Denkmal

Übertragungsleitungsstrukturen vorgestellt. Das Simulationsmodell basiert auf den Baum-Liu-Tesche-Gleichungen. Diese Arbeit geht über die Untersuchung der Einkopplung einer einzelnen ebenen Welle hinaus und untersucht die Anregung durch ein stochastisches Feld. Die Übertragungsleitungen werden dabei analytisch mit Hilfe der Leitungstheorie beschrieben und zusätzlich werden Leitungsbeläge definiert. Basierend auf den Maxwell-Gleichungen wird eine verallgemeinerte Leitungstheorie vorgestellt, die jedoch in ihrer Struktur der klassischen Leitungstheorie ähnelt. Für die Leitungsparameter wird ein Hochfrequenz-Modell abgeleitet, sodass die Parameter frequenzabhängig werden.

Das semianalytische Modell wird mit der Momentenmethode und durch Messungen in der Modenverwirbelungskammer verglichen und validiert. Verschiedene Konfigurationen der Leitungsstrukturen werden analysiert und die eingekoppelten Spannung an den Enden der Leitungen berechnet, gemessen und diskutiert. Darüber hinaus wird der Einfluss von gebogenen und geknickten Übertragungsleitungen und der Einfluss des Knicks auf die Einkopplung untersucht.

Dr.-Ing. Xiaowei Wang: Estimation of Radiated Emissions from Electrically Large EUTs

Gutachter:

- Prof. Dr.-Ing. Ralf Vick, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
- Prof. Dr.-Ing. Heyno Garbe, Leibniz Universität Hannover

verteidigt am 30. März 2021 an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

With the increasing application of faster switching electronics and digital computers with high clock frequencies, a PC-size enclosure becomes electrically large, in comparison with the wavelength. The concept of „electrically large“ is characterized by the geometrical size and the considered frequency. Such devices radiate unintentional electromagnetic waves through slots, sockets and ventilation vents, which could be considered as „unintentional radiators“. The focus of this work is to determine the radiated emission of an electrically large equipment under test (ELEUT), see Fig. 3.48. A rectangular slotted metallic enclosure was considered to be an ELEUT, which is comparable to personal computers or other electronic devices. Another configuration with connecting wires attached to the ELEUT has been also investigated.

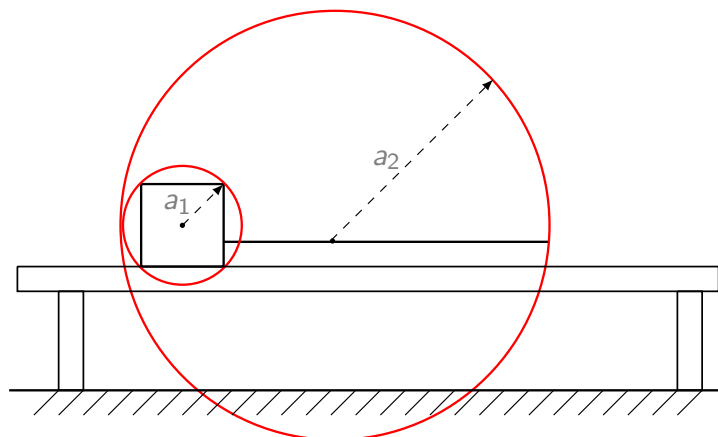


Figure 3.48: Electrically large equipment under test (ELEUT with the electrical size $ka > 1$)

In order to reduce the risk of interferences from these devices, the radiated emission can be measured via different EMC test methods. In general, these emission measurement methods can be classified to electric-field-based or total-power-based methods. The electric-field-based

measurement method is denoted as the classical method, the corresponding measurement environments are e. g., open area test sites, semi-anechoic chambers and fully anechoic rooms. Typical total-power-based measurement methods are conducted in mode-stirred chambers (MSC) and gigahertz transverse electromagnetic cells. The relation between these two methods is connected by the directivity, which allows the conversion of the total radiated power to the electric field strength.

The motivation in this work is to apply the MSC as the alternative test method (ATM) to measure the total radiated power of the ELEUTs, which is irrelevant to the radiation patterns of the ELEUTs. The enhanced robustness of measurements in the MSC makes it a rigorous EMC test environment, which has been recognized as a suitable alternative measurement technique. The maximum electric field strength of ELEUTs can be determined by the combination of the total radiated power measurement in the MSC and the estimated directivity of the EUTs. The maximum directivity of the ELEUTs can be achieved by an analytical approximation or a numerical simulation.

In order to determine the radiated emission of ELEUT, three variants will be applied in this work. In variant 1, the conversion procedure introduced in CISPR 16-4-5 is applied to the ELEUTs, which can be compared with the existing limit of the FAR. In variant 2, the total radiated power can be converted to an equivalent electric field strength, with the help of the directivity. These two methods depends on the number of EUTs and could not be directly compared with the measured total radiated power, which is not very practical. Based on variant 3, the new power limit of the MSC is derived, which could directly be compared with the measured total radiated power. This method is very helpful and could be applied for further research.

Dr.-Ing. Enrico Pannicke: Empfangsspulen für bildgeführte Eingriffe mittels Magnetresonanztomographie

Gutachter:

- Prof. Dr.-Ing. Ralf Vick, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
- Prof. Dr. rer. nat. habil. Oliver Speck, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
- Prof. Dr. Harald Möller, Max-Planck-Institut für Kognitions- und Neurowissenschaften, Leipzig

verteidigt am 21. September 2021 an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (siehe Abbildung 3.49)

Die Magnetresonanztomographie bietet einen überragenden Weichteilkontrast, die Möglichkeit Schichten beliebig ausrichten zu können und eine nicht invasive Thermometrie. Zur Durchführung minimal invasiver bildgeführter Eingriffe stellen diese Eigenschaften einen unschätzbaren Vorteil gegenüber anderen bildgebenden Verfahren, wie der Computertomographie (CT) dar. Denn der überragende Weichteilkontrast ermöglicht es auch kleine Zielstrukturen darzustellen und damit eine zuverlässige Punktion zu ermöglichen. Die Auswahl auch obliquer (d. h. schräger) Schichten ermöglicht es, etwaige Risikostrukturen sicher zu umgehen.

Dennoch konnten sich die Durchführung solcher Eingriffe unter MR-Bildgebung in den vergangenen 20 Jahren nie in der Breite durchsetzen. Ein wesentlicher Grund hierfür ist der komplexe Arbeitsablauf solcher Eingriffe, die aufgrund fehlender standardisierter Instrumente und Prozeduren nur an wenigen Zentren durchgeführt werden. Die dort etablierten Lösungen sind durch eine hohe Individualität und schlechte Übertragbarkeit gekennzeichnet.

Die sogenannten „MR-Empfangsspulen“ sind für die sichere Durchführung solcher Eingriffe von enormer Bedeutung – bestimmten sie doch wesentlich die Bildqualität. Ziel dieser Dissertation ist



Abbildung 3.49: Gratulation an Enrico Pannicke am Otto-von-Guericke-Denkmal

es daher ein Konzept für eine dedizierte interventionelle MR-Empfangsspule in ihren Grundzügen zu untersuchen. Dieses hat zum Zweck, die Platzierung und Vorbereitung einer für den Eingriff notwendigen MR-Empfangsspule wesentlich zu vereinfachen. Dazu werden neue Ansätze zur sogenannten „Leistungsanpassung“ und „Aktiven Entkopplung“ vorgestellt. Diese ermöglichen es die bisher üblichen Topologien von MR-Empfangsspulen neu zu definieren und weitere Freiheitsgrade in der Implementierung zu gewinnen. Dieses Vorgehen unterscheidet sich grundlegend von vergleichbaren Studien, die konsequent auf die Substitution von Komponenten setzen z. B. zur Erhöhung der Flexibilität.

Die vorgestellten Ansätze werden eingehend analysiert und entsprechende Verfahren zur korrekten Dimensionierung erarbeitet. Letztere dienen damit als Grundlage für ein ingenieurtechnisches Vorgehen und werden experimentell validiert. Beide Teilansätze wurden in dem Demonstrator einer dedizierten interventionellen Spule integriert und anhand von Labor- und MR-Messungen evaluiert, siehe Abbildung 3.50. Dabei konnte aufgezeigt werden, dass die neu eingeführten Ansätze vergleichbare Ergebnisse zu dem im Stand der Technik etablierten Methoden liefern.

Zusammenfassend kann somit festgehalten werden, dass die in dieser Arbeit dargelegten Beiträge die Implementierung interventioneller „Einweg“-Spulen ermöglicht.

3.3.4 Veröffentlichungen

Zeitschriften- und Konferenzbeiträge

- [1] M. Magdowski, „Personalisierbare Aufgaben und anonymer Peer Review in den Grundlagen der Elektrotechnik“, in *Greifswalder Beiträge zur Hochschullehre – Hochschullehre im digitalen Zeitalter*, K. Marx, J. Kiesendahl, S. Borukhovich-Weis u. a., Hrsg., Universität Greifswald, BMBF-Projekt interStudies_2 (Qualitätspakt Lehre), Domstraße 58a in 17489 Greifswald, Okt. 2020, S. 75–85, ISBN: 978-3-86006-480-1. Adresse: <https://www.uni-greifswald.de/gbzh>.

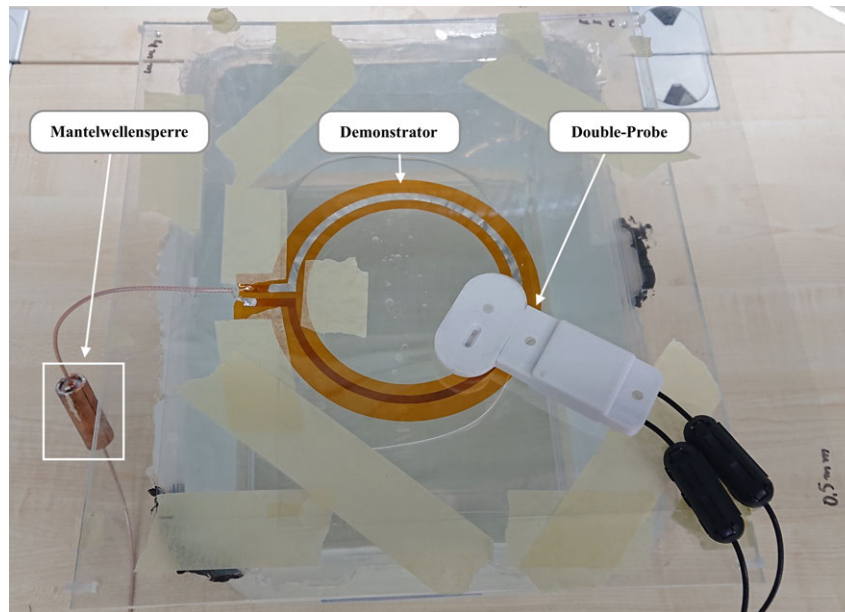


Abbildung 3.50: Setup zur Messung der aktiven Entkopplung mittels einer Double-Probe an dem Demonstrator der entwickelten Empfangsspule

- [2] S. V. Tkachenko, F. Middelstädt und R. Vick, „Method of Modal Parameters for the Straight Wire and Singularity Expansion Method“, *IEEE Letters on Electromagnetic Compatibility Practice and Applications*, Nr. 4, S. 152–155, Dez. 2020. DOI: 10.1109/LEMCPA.2020.3020751.
- [3] S. V. Tkachenko, F. Middelstädt und R. Vick, „The Method of Modal Parameters for the single and double segments of the wires with symmetrical geometry and the Singularity Expansion Method“, in *IEEE International Joint EMC/SI/PI and EMC Europe Symposium*, Raleigh, NC, USA, Aug. 2021, S. 157–157, ISBN: 978-1-6654-4888-8. DOI: 10.1109/EMC/SI/PI/EMCEurope52599.2021.9559215.
- [4] S. V. Tkachenko, J. B. Nitsch, M. Raya und R. Vick, „Full-Wave Transmission Line Theory (FWTLT) for a Thin-Wire Transmission Line inside a Rectangular Resonator“, in *United States National Committee of URSI National Radio Science Meeting (USNC-URSI NRSM)*, 2021, S. 12–13. DOI: 10.23919/USNC-URSINRSM51531.2021.9336473.
- [5] F. Middelstädt, S. V. Tkachenko und R. Vick, „The Induced EMF Method as an Alternative to the Iterative Method for the Approximation of the Reflection Coefficient on Thin Wires“, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Nr. 8, S. 4781–4788, Aug. 2021. DOI: 10.1109/TAP.2021.3060091.
- [6] M. Raya, M. Magdowski und R. Vick, „SPICE-Based Lumped Circuit Model of Shielded Multiconductor Cables“, in *2021 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Bali/APEMC)*, 2021. DOI: 10.1109/EMCEUROPE48519.2020.9245792.
- [7] M. Raya, S. V. Tkachenko und R. Vick, „A SPICE Model for a Field-Coupled Conductor Based on the Scattered Voltage Formulation“, in *2021 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Bali/APEMC)*, 2021. DOI: 10.1109/EMCEUROPE48519.2020.9245792.
- [8] M. Mitra, T. Gerlach, R. Kowal u. a., „Electromagnetic Simulations of Different Electrode Shapes for an MRI Hybrid Ablation System“, in *5th Conference on Image-Guided Interventions*, 2021.

- [9] M. Ehses, K. Meyer zu Hartlage, T. Gerlach u. a., „3D-Printed Floating Cable Traps for MRI guided Microwave Ablation“, in *43rd International Engineering in Medicine and Biology Conference*, 2021.
- [10] J. J. Löning Caballero, T. Gerlach, M. Gutberlet u. a., „Reduced electromagnetic interferences of a microwave ablation system by an external shielding enclosure for improved real time magnetic resonance guided monitoring of percutaneous thermal tumour therapy“, in *5th Conference on Image-Guided Interventions*, 2021.
- [11] J. Hubmann, „Feasibility study of MRI-guided IRE“, in *5th Conference on Image-Guided Interventions*, 2021.
- [12] J. Hubmann, „Design of a System for Magnetic-Resonance-Guided Irreversible Electroporation“, in *43th Annual International Conference*, 2021.
- [13] J. J. Löning Caballero, „Verbesserungen der MR-Verträglichkeit eines Mikrowellengenerators durch Etablierung eines Schirmgehäuses für Mikrowellengeneratoren“, Bachelorarbeit, Medical School Hannover, Hannover, Juli 2021.
- [14] B. Gambal, „Design and Implementation of a Test Procedure for the Evaluation of Interference Coupling in Magnetic Resonance Imaging“, in *43th Annual International Conference*, 2021.
- [15] N. Shaik, T. Gerlach, J. Hubmann u. a., „Towards an Energy Monitoring System for an MRI Hybrid RF Ablation System“, in *5th Conference on Image-Guided Interventions*, 2021.
- [16] E. Pannicke, „Distributed Capacitors for MR Receive Coils: Theory and Method“, in *2021 43th Annual International Conference*, 2021.
- [17] E. Pannicke, „Analytical Model of a „Split-Coil“ for the Implementation of a Novel Type of the Receive Coil in Magnetic Resonance Imaging“, in *43th Annual International Conference*, 2021.
- [18] T. Gerlach, E. Pannicke, B. Hensen, F. Wacker, O. Speck und R. Vick, „An Ex-Vivo Study of an MRI Hybrid Ablation System“, in *5th Conference on Image-Guided Interventions*, 2021.
- [19] M. Magdowski und I. Siegert, „Experience with an Online Assessment in a Lecture about Fundamentals of Electrical Engineering“, in *Proceedings of the Innovating Higher Education Conference*, G. Ubachs, S. Meuleman und A. Antonaci, Hrsg., Bari, Italien: European Association of Distance Teaching Universities (EADTU), Nov. 2021, ISBN: 9789079730483. Adresse: <https://www.slideshare.net/MathiasMagdowski/experience-with-an-online-assessment-in-a-lecture-about-fundamentals-of-electrical-engineering>.
- [20] B. Eugster, S. Fath-Keiser, S. Leist, M. Magdowski und J. F. May, *Kapitel „Digitale Open-Book- und Take-Home-Prüfungen“ im Buch „Digitale Prüfungen in der Hochschule – Whitepaper einer Community Working Group aus Deutschland, Österreich und der Schweiz“*, M. Bandtel, M. Baume, E. Brinkmann u. a., Hrsg., 62. Hochschulforum Digitalisierung (HFD), Sep. 2021, Version 1.1.

Dissertationen und Bücher

- [1] X. Wang, „Estimation of Radiated Emissions from Electrically Large EUTs“, Diss., 2021.
- [2] E. Pannicke, *Empfangsspulen für bildgeführte Eingriffe mittels Magnetresonanztomographie*, 1. Aufl., Ser. Res Electricae Magdeburgenses 85. Magdeburg: Lindemann, A. u. a., 2021, ISBN: 978-3-948749-12-5. DOI: 10.24352/UB.OVGU-2021-096.

- [3] J. Kasper, „Analysis of the Stochastic Electromagnetic Field Coupling to Single and Multiconductor Transmission Line Structures“, Diss., 2021.

Beiträge zu Kolloquien u. a. Vorträge

- [1] S. Ziethen, M. Magdowski, N. Wagenknecht und J. Panke, „Feedback als wechselseitiger Prozess für eine studierendenzentrierte Lehre“, in *Sechste Folge des [Insights] Podcasts Approaching the Digital Turn*, Hochschulforum Digitalisierung (HFD), Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft e.V., Barkhovenallee 1, 45239 Essen, Nov. 2020. Adresse: <https://hochschulforumdigitalisierung.de/de/news/folge-6-approaching-digital-turn>.
- [2] H. Steinbeck und M. Magdowski, „Bit-Gespräch Folge 4 – Hagener Manifest 9 bis 12, Semester so weit, so gut & digitale Sprechstunden“, in *gudeEducation*, Dez. 2020. Adresse: https://youtu.be/_3Jv58is324.
- [3] H. Steinbeck und M. Magdowski, „Bit-Gespräch Folge 5 – Neues Jahr, neue digitale Lehre und Online-Sprechstunden als Lehrformat“, in *gudeEducation*, Jan. 2021. Adresse: <https://youtu.be/ZE5oHEEX7L4>.
- [4] H. Steinbeck und M. Magdowski, „Bit-Gespräch Folge 6 – Prüfungen, überall Prüfungen (Online, Open Book, Take Home, No Proctoring)“, in *gudeEducation*, Feb. 2021. Adresse: <https://youtu.be/10ulxq8KVeQ>.
- [5] H. Steinbeck und M. Magdowski, „Bit-Gespräch Folge 7 – Unproctored Exams & freier Lauf bei Klausuren, Auswertung PotsBlitz-Befragung“, in *gudeEducation*, Feb. 2021. Adresse: <https://youtu.be/LVoXNGXDQ08>.
- [6] H. Steinbeck und M. Magdowski, „Bit-Gespräch Folge 8 – Ein Byte ist voll! Untertitel in Vorlesungen und Kosten von digitaler Lehre“, in *gudeEducation*, März 2021. Adresse: <https://youtu.be/8I4RocSYx8U>.
- [7] H. Steinbeck und M. Magdowski, „Bit-Gespräch Folge 9 – Digitale Lehre, Overleaf, OER, Monitorsetup, YouTube & überlange Erklärvideos“, in *Bits & Bytes*, Apr. 2021. Adresse: <https://youtu.be/B4gu3HWNong>.
- [8] H. Steinbeck und M. Magdowski, „Bit-Gespräch Folge 10 – Eine Außenwand zum Lehren, es werde (LED-)Licht und bitte keine Plagiate“, in *Bits & Bytes*, Apr. 2021. Adresse: <https://youtu.be/eC3pxUptY98>.
- [9] H. Steinbeck und M. Magdowski, „Bit-Gespräch Folge 11 – Grundlagen-der-Elektrotechnik-Vorlesung bei Twitch, Sidekicks in Streams“, in *Bits & Bytes*, Juni 2021. Adresse: <https://youtu.be/0K1Gw7uhMJE>.
- [10] H. Steinbeck und M. Magdowski, „Bit-Gespräch Folge 12 – Für mehr Barcamps in der Lehre und mehr Open-Book-Prüfungen in Präsenz!“, in *Bits & Bytes*, Juli 2021. Adresse: <https://youtu.be/-FbkhlyMb3Y>.
- [11] H. Steinbeck und M. Magdowski, „Bit-Gespräch Folge 13 – Tutoren als Co-Hosts in Streams, Outdoor-Askathon und Prüfungen mit Laptops“, in *Bits & Bytes*, Juli 2021. Adresse: https://youtu.be/X5S7glJ7k_o.
- [12] H. Steinbeck und M. Magdowski, „Bit-Gespräch Folge 14 – Neuer heißer Scheiß für dein hybrides Lehrsetting“, in *Bits & Bytes*, Sep. 2021. Adresse: <https://youtu.be/BQ0Ff04Rrfw>.
- [13] H. Steinbeck und M. Magdowski, „Bit-Gespräch Folge 15 – Hybride Lehre(n) – Winter(semester) ist da!“, in *Bits & Bytes*, Okt. 2021. Adresse: <https://youtu.be/JOYOHb-RrkW>.

- [14] M. Magdowski und C. Bade, „Neue Wege in der Hochschullehre mit Instagram & Co. – Man kann nicht, nicht lernen!“, in *Trafohaus//Lehre*, Hochschuldidaktisches Zentrum Sachsen der Universität Leipzig, Dez. 2020. Adresse: <https://trafohauslehre.podigee.io/>.
- [15] M. Magdowski, „Wozu brauchen wir eine 8 m x 6 m x 4 m große Mikrowelle?“, in *Science Slam beim Sommerpicknick der OVGU Magdeburg*, OVGU Magdeburg, Juli 2021. Adresse: <https://www.ovgu.de/sommerpicknick.html>.
- [16] M. Magdowski, „Zoom für Teilnehmer*innen – Grundlagen, Bildschirmeinstellungen, Chat & Handzeichen nutzen, etc.“, in *Workshopreihe „Zoomkompetenz“ erweitern*, Personalentwicklung/Recruiting der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Online-Workshop über Zoom, Dez. 2020. Adresse: <https://www.slideshare.net/MathiasMagdowski/zoom-fr-teilnehmerinnen-grundlagen-bildschirmeinstellungen-chat-handzeichen-nutzen-etc>.
- [17] M. Magdowski, „Zoom für Hosts – Bildschirm teilen, ein- und austreten lassen, in Kleingruppen einteilen, Whiteboard nutzen, Begrüßung und Verabschiedung etc.“, in *Workshopreihe „Zoomkompetenz“ erweitern*, Personalentwicklung/Recruiting der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Online-Workshop über Zoom, Dez. 2020. Adresse: <https://www.slideshare.net/MathiasMagdowski/zoom-fr-hosts-bildschirm-teilen-ein-und-austreten-lassen-in-kleingruppen-einteilen-whiteboard-nutzen-begrung-und-verabschiedung-etc>.
- [18] M. Magdowski, „Zoom für Besprechungs- und Workshopleiter*innen – aktivieren, einbinden, abfragen, Methoden nutzen, angrenzende Werkzeuge kennenlernen“, in *Workshopreihe „Zoomkompetenz“ erweitern*, Personalentwicklung/Recruiting der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Online-Workshop über Zoom, Dez. 2020. Adresse: <https://bit.ly/Zoom4Workshops>.
- [19] M. Magdowski, „Personalisierte Aufgaben und passende Musterlösungen zu den Grundlagen der Elektrotechnik automatisiert mit L^AT_EX, PGFPLOTS und CircuiTikZ erstellen“, in *Frühjahrstagung der Deutschsprachigen Anwendervereinigung T_EX e. V.*, Online-Konferenz über Zoom, März 2021. Adresse: <https://www.slideshare.net/MathiasMagdowski/dante-ev-frhjahrstagung-2021-personalisierte-aufgaben-und-passende-musterlosungen-zu-den-grundlagen-der-elektrotechnik-automatisiert-mit-latex-pgfpplots-und-circuitikz-erstellen>.
- [20] M. Magdowski, „Theoretische und physikalische Grundlagen der EMV“, in *EMV Stuttgart – Fachmesse mit Workshops zum Thema elektromagnetische Verträglichkeit*, Mesago Messe Frankfurt GmbH, Rotebühlstraße 83-85, 70178 Stuttgart, März 2021. Adresse: <https://emv.mesago.com/stuttgart/de/workshops/programm-referenten/programm-detail.html/101/102.html>.
- [21] M. Magdowski, „Weiterentwicklung kompetenzorientierter Prüfungen“, in *Workshop bei der 7. Lehre-hoch-N-Netzwerkkonferenz*, Apr. 2021. Adresse: <https://www.slideshare.net/MathiasMagdowski/weiterentwicklung-kompetenzorientierter-prfungen-workshop-bei-der-7-lehrehochnnetzwerkkonferenz>.
- [22] M. Magdowski, „Generate Personalized Tasks and Sample Solutions for Anonymous Peer Review in Electrical Engineering“, in *TUG 2021 – Presentations covering the T_EX world. Typography & typesetting, fonts & design, publishing and more. The 42nd Annual Conference of the T_EX Users Group*, Präsentationsfolien: <https://www.slideshare.net/MathiasMagdowski/how-to-generate-personalized-tasks-and-sample-solutions-for-anonymous-peer-review-in-electrical-engineering-using-latex-pgfpplots-and-circuitikz>, Aug. 2021. Adresse: <https://www.youtube.com/watch?v=BQP3qnKfcU>.

- [23] M. Magdowski, „Ist das hybrid oder kann das weg?“, in *Erstes Online-Seminar im WiSe 2021/22 im Themenbereich "Didaktische Settings und Kommunikation in Webkonferenzsystemen" der Adobe Connect DACH Nutzergruppe Forschung & Lehre*, DKFZ Heidelberg, Nov. 2021. Adresse: <https://blogs.fu-berlin.de/dachadobeconnect/2021/11/18/ruckblick-auf-erstes-online-seminar-im-wise-2021-22-am-17-11-2021/>.
- [24] M. Magdowski, „Erfahrungen mit hybriden Lernszenarien“, in *Hybridworkshop*, Georg-August-Universität Göttingen, Nov. 2021. Adresse: <https://www.slideshare.net/MathiasMagdowski/erfahrungen-mit-hybriden-lernszenarien-hybridworkshop-ander-georgaugustuniversitt-gttingen>.
- [25] M. Magdowski, „How to Generate Personalized Tasks and Sample Solutions for Anonymous Peer Review in Electrical Engineering using LaTeX, PGFPLOTS and CircuiTikZ“, in *Keynote Presentation at the Doctoral Student Meeting 2021 of the IEEE German EMC Chapter*, OVGU Magdeburg, Nov. 2021. Adresse: <https://www.slideshare.net/MathiasMagdowski/how-to-generate-personalized-tasks-and-sample-solutions-for-anonymous-peer-review-in-electrical-engineering-using-latex-pgfpplots-and-circuitikz-250617557>.
- [26] M. Magdowski und T. Schallschmidt, „Überblick über die Studienwerbungsaktivitäten der Fakultät für Elektro- und Informationstechnik“, OVGU Magdeburg, Nov. 2021. Adresse: <https://bit.ly/FEITStudienwerbung>.
- [27] M. Magdowski, „In weiter Ferne (und doch) so nah: Chancen und Herausforderungen hybrider Lehrformate“, in *Gesprächsforum „Digitales Lehren in geisteswissenschaftlichen Fächern“ (kurz: DL in G_)*, Ruhr-Universität Bochum, Nov. 2021. Adresse: <https://www.slideshare.net/MathiasMagdowski/in-weiter-ferne-und-doch-so-nah-chancen-und-herausforderungen-hybrider-lehrformate>.
- [28] M. Magdowski, „Zoom weiter gedacht – Videokonferenzen sinnvoll mit anderen Online-Werkzeugen ergänzen“, in *Digitale Woche der IT-Sicherheit*, OVGU Magdeburg, Nov. 2021. Adresse: <https://www.slideshare.net/MathiasMagdowski/zoom-weiter-gedacht-videokonferenzen-sinnvoll-mit-anderen-onlinewerkzeugen-ergnzen>.
- [29] M. Magdowski, „Digitale Prüfungen – Wo sind wir? Und wo möchten wir hin?“, in *Impulsvortrag zum Herbstforum der Lehre „Digitale Prüfungsformate“*, Videoaufzeichnung unter <https://youtu.be/vHZSpc0oue4>, TU München, Okt. 2021. Adresse: <https://www.slideshare.net/MathiasMagdowski/digitale-prfungen-wo-sind-wir-und-wo-mchten-wir-hin>.
- [30] M. Magdowski, „Evaluation (strukturiert und effizient zur Verbesserung von Studium und Lehre einsetzen)“, in *Hochschuldidaktischer Workshop*, Bergische Universität Wuppertal, Sep. 2021. Adresse: <https://www.slideshare.net/MathiasMagdowski/evaluation-strukturiert-und-effizient-zur-verbesserung-von-studium-und-lehre-einsetzen>.
- [31] M. Magdowski, „Feedback (strukturiert und effizient zur Verbesserung von Studium und Lehre einsetzen)“, in *Hochschuldidaktischer Workshop*, Bergische Universität Wuppertal, Sep. 2021. Adresse: <https://www.slideshare.net/MathiasMagdowski/feedback-feedback-strukturiert-und-effizient-zur-verbesserung-von-studium-und-lehre-einsetzen>.
- [32] M. Magdowski, „Alles was Sie schon immer über das Lernmanagementsystem Moodle wissen wollten“, in *Hochschuldidaktischer Workshop*, OVGU Magdeburg, Sep. 2021. Adresse: <https://www.slideshare.net/MathiasMagdowski/alles-was-sie-schon-immer-ber-das-lernmanagementsystem-moodle-wissen-wollten>.

- [33] M. Magdowski, „Online-Prüfungen – Wo stehen wir? Und wo wollen wir eigentlich mal hin?“, in *Impulsvortrag zur 65. Plenarversammlung des Fakultätentags für Elektrotechnik und Informationstechnik FTEI e.V.*, Videoaufzeichnung unter <https://youtu.be/93yUbUAK7Ro>, Juni 2021. Adresse: https://bitly.com/FTEI_Exams.
- [34] M. Magdowski, „Zoom for presenters – screen sharing, whiteboard usage, feedback tools, collaborative notes, questions and answers“, in *Workshop Series for the Graduate Academy*, OVGU Magdeburg, Juli 2021. Adresse: <https://bit.ly/Zoom4Presenters>.
- [35] M. Magdowski, „Zoom for video conference participants – basics, audio and video settings, chat and reactions“, in *Workshop Series for the Graduate Academy*, OVGU Magdeburg, Juli 2021. Adresse: <https://www.slideshare.net/MathiasMagdowski/zoom-for-video-conference-participants-basics-audio-and-video-settings-chat-and-reactions>.
- [36] M. Magdowski, „Erfahrungsaustausch zu einer Open-Book-Online-Prüfung mit individualisierten Aufgaben“, in *Digitale Tage der Lehre*, OVGU Magdeburg, Mai 2021. Adresse: <https://www.slideshare.net/MathiasMagdowski/erfahrungsaustausch-zu-einer-openbookonlineprfung-mit-individualisierten-aufgaben>.
- [37] M. Magdowski, „dailyGETquiz als tägliches Quiz zur Elektrotechnik bei Instagram“, in *Digitale Tage der Lehre*, OVGU Magdeburg, Mai 2021. Adresse: <https://www.slideshare.net/MathiasMagdowski/dailygetquiz-als-tgliches-quiz-zur-elektrotechnik-bei-instagram>.
- [38] M. Magdowski und T. Schallschmidt, „MINT-Mitmachaktionen und Tage der offenen Labortür“, in *Lehrpfad für Elektro- und Informationstechnik*, OVGU Magdeburg, März 2021. Adresse: <https://www.slideshare.net/MathiasMagdowski/mintmitmachaktionen-und-tage-der-offenen-labotr-245099292>.
- [39] M. Magdowski, „Mobilfunkmasten-Karneval: Strahlend schöne Verkleidungen“, in *8. Hörsaalslam der Ingenieure ohne Grenzen*, OVGU Magdeburg, Nov. 2021. Adresse: <https://www.youtube.com/watch?v=X2WKyA8yBX0>.
- [40] M. Magdowski, „Konzeption, Durchführung und Auswertung einer Online-Take-Home-Prüfung in den Grundlagen der Elektrotechnik“, in *e-Prüfungs-Symposium zum Thema „Elektronisches Prüfen in Pandemiezeiten“*, RWTH Aachen, Nov. 2021. Adresse: <https://e-pruefungs-symposium.de/wp-content/uploads/2021/11/Magdowski-Poster.pdf>.

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 neben weiterentwickelten MOSFETs, IGBTs und Dioden aus Silizium insbesondere 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 Zuverlässigkeitsuntersuchungen an modernsten Leistungshalbleiter-Bauelementen sowie auf Schaltungen und Systeme der Stromversorgungs- und Antriebstechnik für stationäre und mobile Anwendungen. 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 2021 bearbeiteten Themen mit Bezug auf leistungselektronische Bauelemente und Systeme werden im folgenden Abschnitt detaillierter erläutert.

3.4.2 Forschungsprojekte

Investigation of long-term drift effects of SiC MOSFETs under power cycling like gate conditions³³

Background Power cycling is an established test routine in the qualification process of power electronic devices. Applied to wide band gap devices, however, new challenges evolve which need to be considered: In case of SiC MOSFETs, the threshold voltage V_{th} is continuously shifting during the test execution affecting the on-state resistance $R_{DS,on}$ and thus the induced thermo-mechanical stress as well as a reliable failure indication. The impact of such drift effects — solely caused by the gate bias — is investigated in this work by applying similar gate conditions as would be applied during a power cycling test but at constant temperature without load

³³ von M. Sc. Carsten Kempiaak

current flow. This way, any influence of package degradations can be excluded. A test setup was developed for this investigation, allowing the in-line monitoring of ΔV_{th} and $\Delta R_{DS,on}$.

Approach and design of the experiment The simplified circuit diagram of the test setup developed for this investigation is shown in Fig. 3.51. Commercial 1200 V discrete SiC MOSFETs serve as exemplary devices under test (DUT) and were mounted on a heat plate. The gate driver S_1 and the low power switch S_2 are controlled by a microcontroller, where S_1 is used to apply the gate profile and S_2 to disconnect the driver from the DUT in order to sense V_{th} with a constant current measurement approach. Therefore, a small sense current I_{sense} of 200 mA is applied to the DUT in forward direction. This current needs to be small enough to avoid self heating of the DUT, hence, an amplifier circuit is added to sense $R_{DS,on}$. The data acquisition is realised by using a FPGA based measurement system with 16-bit of vertical resolution scaled at ± 10 V.

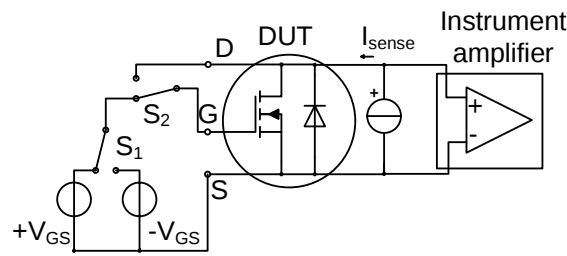


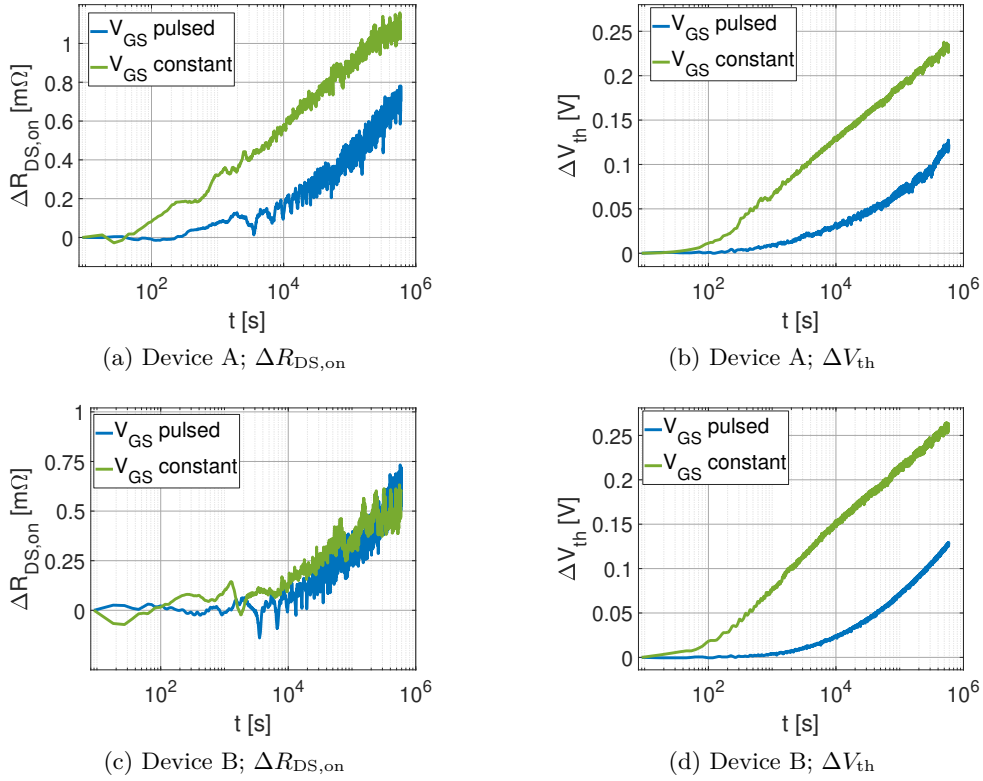
Figure 3.51: Simplified circuit diagram of the test setup for combined ΔV_{th} and $\Delta R_{DS,on}$ monitoring

As exemplary operating point, a gate turn-on time $t_{on} = 3$ s, a gate turn-off time $t_{off} = 6$ s, a turn-on gate voltage of $V_{GS,on} = 15$ V and a turn-off gate voltage of $V_{GS,off} = -10$ V were defined. The resistance difference $\Delta R_{DS,on}$ was measured each gate cycle ($t_{on} + t_{off}$) at the end of t_{on} and ΔV_{th} at the end of t_{off} by applying a V_{th} measurement pulse with a length of 100 ms or 500 ms before t_{on} , respectively. V_{th} sampled in the centre of this measurement pulse was defined as V_{th} of the recent cycle.

Results and discussion Measurement results of two DUTs by applying this pulsed gate conditions as well as the comparison with a constant gate bias of $V_{GS,on} = 15$ V and a similar data sampling — $\Delta R_{DS,on}$ and ΔV_{th} every 9 s — are shown in Fig. 3.52.

A constant positive gate stress yields a linear increase of V_{th} over a logarithmic time-scale for both DUTs. This slope, however, changes under pulsed gate conditions: V_{th} increases exponentially over a logarithmic time-scale, which is similar to the increase during application-like gate conditions. The number of bipolar switching events correlates with the V_{th} shift during application. Due to the typically low switching frequency and high test acceleration of power cycling tests, a relatively low number of switching events appears. Hence, the V_{th} shift during power cycling when using the $V_{SD}(T)$ -method is much lower compared to switching-mode applications over the device's lifetime.

An increase of V_{th} decreases the effective applied gate voltage and thus increases $R_{DS,on}$, which can be seen in Fig. 3.52 for both devices. In case of Device A, ΔV_{th} and $\Delta R_{DS,on}$ correlate under both test conditions. This, however, is not the case for Device B, where ΔV_{th} is much more pronounced at constant gate conditions but $\Delta R_{DS,on}$ does not differ. This observation may indicate that an additional drift effect, not covered by ΔV_{th} , is triggered when Device B is switched.

Figure 3.52: Results device A and device B; $T_{vj} = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$

Thermal Properties of Ga_2O_3 Schottky Diodes with Thinned Substrate³⁴

Motivation Power devices made of gallium oxide ($\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$) could potentially outperform SiC or GaN counterparts in high-power applications. With a theoretical breakdown field about three times higher than that of SiC, Ga_2O_3 power devices could exhibit up to eight times lower on-resistance at the same breakdown voltage. Furthermore, high-quality $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ bulk substrates can be grown from the melt using standard methods known from silicon, which is expected to enable low-cost vertical devices. One of the substantial challenges with gallium oxide, however, is its low thermal conductivity of only $0.1 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ to $0.3 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ (depending on the crystal direction), which is about ten times lower than that of GaN. The according high thermal resistance raises concerns about potential issues with thermal management. This aspect is addressed in the research project presented here.

Devices under Test State-of-the-art large-area $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ Schottky barrier diodes are analyzed regarding their thermal properties. While standard gallium oxide devices are fabricated on $500\text{ }\mu\text{m}$ thick native substrates (see Fig. 3.53a), the Ga_2O_3 substrate of the diodes studied here was mechanically ground down by the manufacturer to a thickness of only $200\text{ }\mu\text{m}$ (see Fig. 3.53b). As most of the heat is generated in the active area at the Schottky junction but extracted from the cathode-side of the device, the thinned substrate is expected to shorten the thermal path and thus reduce the thermal resistance. In order to enable first thermal measurements, the thinned chips were successfully assembled in standard TO-247 packages by soldering the cathode to the baseplate and connecting the anode with bondwires.

³⁴von M. Sc. Florian Wilhelmi, ZF

Procedure and Results All devices sustained temperature changes between 0 °C and 150 °C without any damage and can carry a DC current of several amperes. The change of forward voltage with temperature at a fixed measurement current of $I_{\text{meas}} = 10 \text{ mA}$ was found to be suitable for a determination of the junction temperature. This allows for measurements of the thermal resistance according to the JESD51-14 standard. In this procedure, the device is heated by a constant current until a steady state is reached. Then, the heating power is cut off and the junction temperature is recorded during the subsequent cooling phase by measuring the forward voltage at I_{meas} . The thermal resistance of the setup can then be calculated from this profile. By performing two separate measurements with different thermal interface materials (TIMs) between baseplate of the TO-247 package and the heatsink, the junction-to-case thermal resistance can be determined. The measurements and additional simulations with FloEFD show that the thermal resistance can successfully be reduced by more than half compared to standard devices with thick substrates.

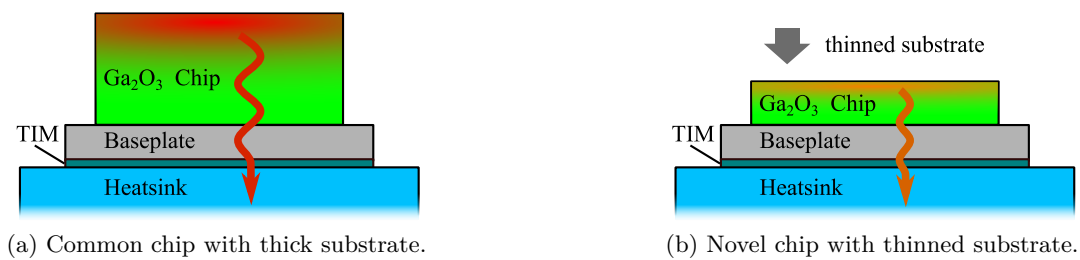


Figure 3.53: Common Ga_2O_3 devices are fabricated on a 500 μm thick substrate. For the Schottky diodes under test here, the substrate was thinned down to 200 μm in order to reduce the thermal resistance.

An embedded power section with GaN HEMTs³⁵

This work in cooperation with Fraunhofer IZM investigates the use of printed circuit board (PCB) embedding technology for commercial 600 V GaN-on-Si power devices and power integrated circuits (ICs). Embedding the power section including the phase-legs of transistors, control circuitry like driver ICs and the DC-link is a promising approach to realise a low-inductive system with high power density. A power section with GaN HEMTs for a three-phase drive inverter with a nominal power in the lower kW range is exemplarily developed. A conventional assembly has been designed for reference. The major electrical characteristics such as in Fig. 3.54 of this discrete — cf. Fig. 3.55 — and prospectively the embedded power section are studied.

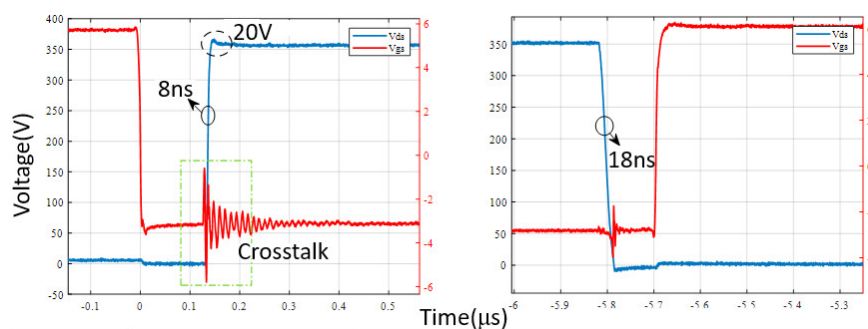
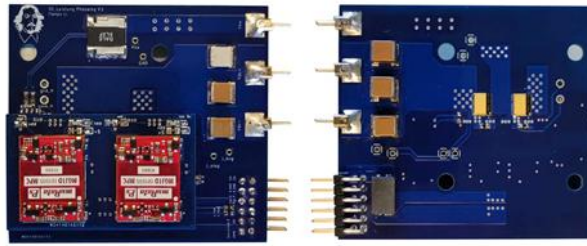


Figure 3.54: Waveforms captured in a power section with discrete GaN HEMTs

³⁵von M. Sc. Tianyu Li



(a) Phase board — top and bottom view



(b) Three-phase setup

Figure 3.55: Power section with discrete GaN HEMTs, heatsinks to be added

Hochvolt-DC-DC-Wandler mit SiC-MOSFETs³⁶

Es wird ein modulares Konzept für Elektrofahrzeuge vorgeschlagen, bei dem der elektrische Antrieb über einen DC-DC-Spannungswandler mit unterschiedlichen Traktionsbatterien koppelbar ist. Hierfür wird zunächst ein modularer bidirektionaler DC-DC-Wandler mit SiC-MOSFETs und einer Pulverkerndrossel für 4 kW untersucht, dessen Aufbau in Abbildung 3.56 gezeigt ist. Der Wandler wurde für Batteriespannungen von etwa 100 V bis 700 V bei bis zu 800 V Zwischenkreisspannung des zu speisenden Motorwechselrichters ausgelegt. Der Brückenweig ist mit SiC-MOSFETs ausgeführt.

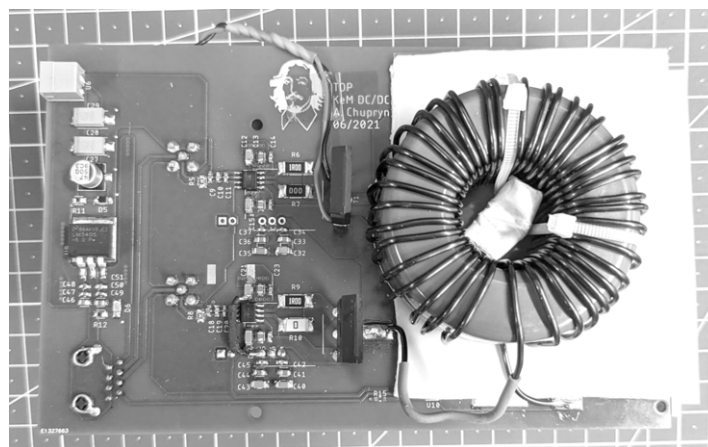


Abbildung 3.56: 4 kW-DC-DC-Wandlermodul

Um die Funktionalität des Wandlers zu bestätigen und die Schaltverlustenergie in einem Arbeits-

³⁶von M. Sc. Anton Chupryn

punkt zu untersuchen, wurden zunächst Doppelpuls-Messungen durchgeführt. Ergebnisse sind in den Oszillogrammen in Abbildung 3.57 dargestellt: Die Drain-Source-Spannung U_{DS} wurde auf 800 V eingestellt, die Gatespannung U_{GS} beträgt 20 V im leitenden und -5 V im sperrenden Zustand. Der Drosselstrom I_L und der Transistor-Source-Strom I_S erreichen beim zweiten Puls ca. 10 A.

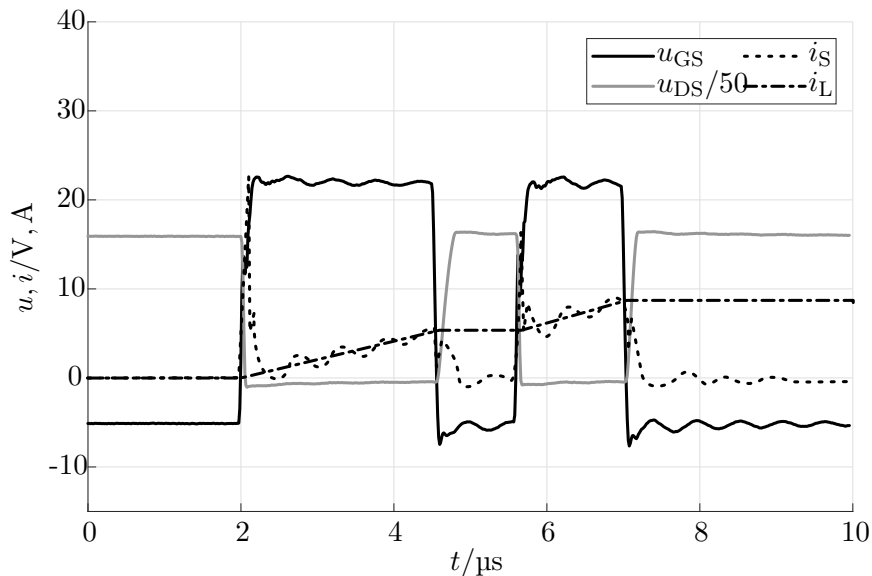


Abbildung 3.57: Messergebnisse

Die Schaltung wird gegenwärtig mit dem Ziel weiterentwickelt, einen mehrphasigen Gleichspannungswandler zu realisieren.

GridBatt

— in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl Elektrische Netze und Erneuerbare Energie, Jun.-Prof. Dr.-Ing. Ines Hauer, vgl. Abschnitt 3.2.2 —

3.4.3 Promotionen

Dr.-Ing. Yu Liu: Contribution to improve the EMI performance of electrical drive systems in vehicles with special consideration of power semiconductor modules

Gutachter:

- Prof. Andreas Lindemann, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
- Prof. Sibylle Dieckerhoff, Technische Universität Berlin

verteidigt am 21. April 2021 an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Diese Arbeit dient als Beitrag zur Verbesserung des EMV-Verhaltens elektrischer Antriebssysteme in Fahrzeugen, wobei der Fokus auf dem Leistungshalbleitermodul für die Automobilanwendung liegt.

Für ein besseres und tieferes Verständnis der Quelle von leitungsgebundenen Störungen werden die EMV-Mechanismen und -Effekte im Zusammenhang mit dem Leistungsmodul im Antriebssystem durch Simulationen und Messungen untersucht. Der Einfluss der Diode-Reverse-Recovery-Effekte auf das EMV-Verhalten wird quantitativ mit verschiedenen Lastströmen sowie mit verschiedenen

Diodentypen, wie z. B. SiC-Schottky-Dioden, analysiert. Durch Simulationen wird der Einfluss des Leistungsmoduls auf das System untersucht; auf dieser Basis wird die Bedeutung verschiedener Faktoren innerhalb und außerhalb des Leistungsmoduls für das EMV-Verhalten bewertet. Zur Validierung der Simulationsergebnisse wird der Messaufbau für eine konventionelle EMV-Messung für die Automobilanwendung vorgestellt. Die Messergebnisse belegen, dass die Simulationsmodelle unter bestimmten Randbedingungen für zukünftige Leistungsmodulkonstruktionen zur EMV-Vorhersage verwendbar sind.

Basierend auf dem Verständnis, wie es aus den Simulationen und Messergebnissen hergeleitet wurde, werden konkrete Optimierungskonzepte für ein inhärent störungsarmes Leistungsmodul entwickelt und realisiert, siehe Abbildung 3.58. Dessen EMV-Verhalten sowie der Aufwand des Musterbaus aus Sicht des Leistungsmodulherstellers werden anhand verschiedenen Kriterien verglichen und bewertet. Außerdem wird das dynamische und Kurzschlussverhalten der Prototypen einschließlich der Stromverteilung zwischen den Halbleiterchips charakterisiert.

In dieser Arbeit wird ein neuartiges Testverfahren vorgestellt, mit dem es möglich ist, das leitungsgebundene EMV-Verhalten von Leistungsmodulen abzuschätzen, ohne den gesamten Testaufbau wie bei einer konventionellen EMV-Messung zu erstellen. Diese Charakterisierung kann anschließend in der Phase der Inverterentwicklung verwendet werden, um ein geeignetes Modul auszuwählen und den erwarteten Aufwand zur Einhaltung der EMV-Standards zu bewerten.

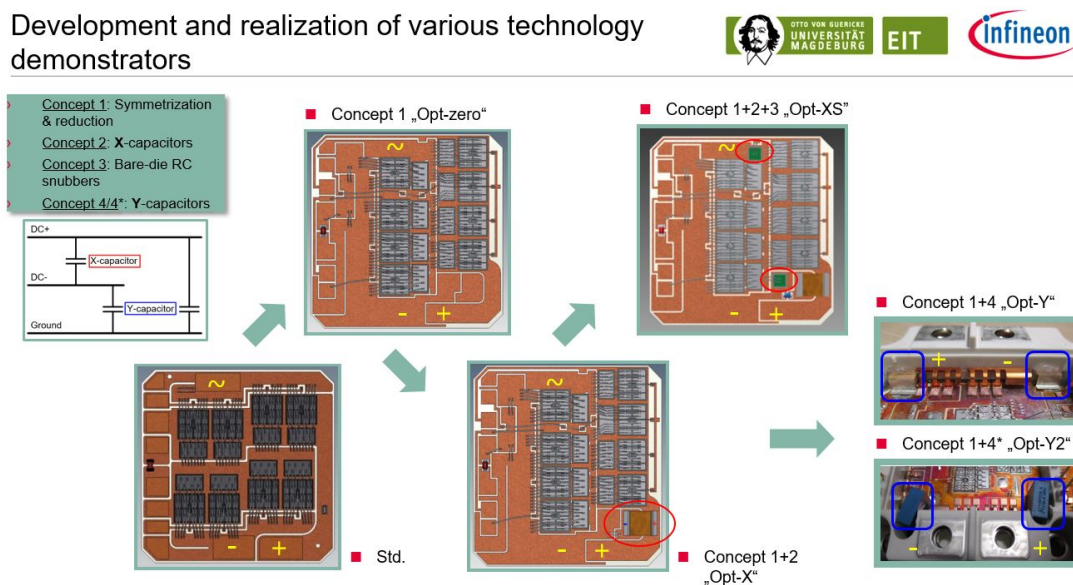


Abbildung 3.58: Demonstratoren für ein inhärent störungsarmes Leistungsmodul

Dr.-Ing. Alexander Lange: Steuerverfahren und direkte modellprädiktive Stromregelung eines vereinfachten Dreipunktstromrichters

Gutachter:

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

verteidigt am 14. April 2021 an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Dr.-Ing. Henry Barth: Einsatz von Siliziumkarbid-Bipolartransistoren in Antriebsstromrichtern zur Wirkungsgradsteigerung

Gutachter:

- Prof. Wilfried Hofmann, Technische Universität Dresden
- Prof. Andreas Lindemann, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

verteidigt am 20. Juli 2021 an der Technischen Universität Dresden

Dr.-Ing. Roberto Rosso: Stability analysis of converter control strategies for power electronics-dominated power systems

Gutachter:

- Prof. Marco Liserre, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
- Prof. Andreas Lindemann, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
- Prof. Christian Rehtanz, Technische Universität Dortmund

verteidigt am 25. August 2021 an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

3.4.4 Veröffentlichungen

Zeitschriften- und Konferenzbeiträge

- [1] C. Kempiaik und A. Lindemann, „A Method for the Measurement of the Threshold-Voltage Shift of SiC MOSEFTs During Power Cycling Tests“, in *IEEE Transactions on Power Electronics*, Bd. 36, Juni 2021, S. 6203–6207. DOI: 10.1109/TPEL.2020.3039424.
- [2] C. Kempiaik und A. Lindemann, „Impact of Threshold Voltage Instabilities of SiC MOS-FETs on the Methodology of Power Cycling Tests“, in *International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, Ser. PCIM, Mai 2021.
- [3] C. Kempiaik, A. Schiffmacher, A. Chupryn u. a., „Accelerated Qualification of Highly Reliable Chip Interconnect Technology by Power Cycling Under Thermal Overload“, in *International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, Ser. PCIM, Mai 2021.
- [4] F. Wilhelmi, S. Kunori, K. Sasaki, A. Kuramata, Y. Komatsu und A. Lindemann, „Temperature-Dependent Electrical Characteristics of a β -Ga₂O₃ Schottky Barrier Diode“, in *International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, Ser. PCIM, Mai 2021.
- [5] T. Li, C. Voigt, A. Lindemann, L. Böttcher und E. Erhardt, „An embedded power section with GaN HEMTs“, in *IEEE 12th Energy Conversion Congress & Exposition - Asia (ECCE-Asia)*, Piscataway, NJ: IEEE, 2021. DOI: 10.1109/ECCE-Asia49820.2021.9479226. Adresse: <https://doi.org/10.1109/ECCE-Asia49820.2021.9479226>.
- [6] A. Schiffmacher, D. Strahinger, S. Malasani, J. Wilde, C. Kempiaik und A. Lindemann, „In Situ degradation monitoring methods during lifetime testing of power electronic modules“, in *IEEE 71st Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, 1 June – 4 July 2021; virtual event, Ser. IEEE Xplore digital library, New York, NY: IEEE, 2021. DOI: 10.1109/ECTC32696.2021.00149. Adresse: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9501543>.

- [7] A. Lindemann, „Potential of Wide Bandgap Semiconductors in Power Electronic Applications“, in *Bodo's Power Systems*, Aug. 2021.
- [8] F. Wilhelmi, S. Kunori, K. Sasaki, A. Kuramata, Y. Komatsu und A. Lindemann, „Packaged β -Ga₂O₃ trench MOS Schottky Diode with Nearly Ideal Junction Properties“, in *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021. DOI: 10.1109/TPEL.2021.3122902.

Dissertationen und Bücher

- [1] Y. Liu, *Contribution to improve the EMI performance of electrical drive systems in vehicles with special consideration of power semiconductor modules*, 1. Auflage, Ser. Res electricae Magdeburgenses Band 82. Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2021, von M. Sc. Yu Liu ; Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Andreas Lindemann, Prof. Dr.-Ing. Sibylle Dieckerhoff, ISBN: 9783948749019.

Beiträge zu Kolloquien u. a. Vorträge

- [1] C. Kempia, „Thermisches Überfahren beim Lastwechseltest an Chips mit der BondBuffer Technik — wie man Testzeit deutlich reduziert“, Wissensforum, online, 2021.
- [2] C. Kempia, „Threshold Voltage Instabilities of Commercial SiC MOSFETs under Power Cycling Like Gate Conditions“, Power semiconductor reliability round table, online, 2021.
- [3] C. Kempia, „Variable Kompensation induktiver Übertragungssysteme mittels aktiver Blindleistungseinprägung“, OVGU, Magdeburg, Transfermesse Sachsen-Anhalt Innovation trifft Wirtschaft, 2021.
- [4] C. Voigt, T. Li, E. Erhardt, L. Böttcher und A. Lindemann, „3D Power Module Concept with GaN HEMTs“, 13th Expert Forum Electric Vehicle Drives, E-MOTIVE, FVA, online, 2021.
- [5] C. Kempia und A. Lindemann, „Untersuchung von Langzeit-Drifteffekten bei SiC MOSFETs unter lastwechseltypischen Gate-Bedingungen“, Halbleiter-Leistungsbaulemente und ihre systemtechnische Anwendung, Freiburg (Br.), 50. Kolloquium, 2021.
- [6] C. Kempia, A. Schiffmacher, J. Wilde und A. Lindemann, „Langzeitzuverlässigkeit Leistungselektronik“, Informationstagung, FVA, online/Video, 2021.

3.4.5 Auszeichnungen

Herr Carsten Kempia vom Lehrstuhl für Leistungselektronik wurde auf der diesjährigen PCIM mit dem Young Engineer Award für seinen Beitrag „Accelerated Qualification of Highly Reliable Chip Interconnect Technology by Power Cycling Under Thermal Overload“ ausgezeichnet. Mit dem vorgestellten Verfahren konnten mehrmonatige Lebensdauertests von hochzuverlässigen IGBT Leistungsmodulen erfolgreich beschleunigt werden, sodass diese innerhalb eines Tages abgeschlossen sind, ohne dass sich der zugrundeliegende Fehlermechanismus ändert, wie durchgeführte Testreihen und die nachgelagerten Fehleranalysen zeigten. Zusätzlich wurde ein vereinfachtes Lebensdauermodell erarbeitet. Der Vergleich mit bereits publizierten Lebensdauermodellen offenbart, dass die mittlere bzw. maximale Sperrschichttemperatur nur einen vergleichsweise geringen Einfluss auf die Lebensdauer von Modulen mit silber-gesinterten Chips hat. Dies ist zum einen bedeutend für zahlreiche Anwendungen – wie beispielsweise Antriebsinverter in hybridelektrischen Fahrzeugen – und bestätigt zum anderen den gewählten Modellierungsansatz nach Coffin-Manson.

Die Arbeit entstand im Rahmen des vom BMWi/AiF geförderten Forschungsprojektes „Langzeitzuverlässigkeit Leistungselektronik“ in Kooperation mit dem Institut für Mikrosystemtechnik der Universität Freiburg und Industriepartnern. Allen Beteiligten sei für die gute Kooperation herzlich gedankt.

3.4.6 Veranstaltungen

9th ECPE SiC & GaN User Forum: Potential of Wide Bandgap Semiconductors in Power Electronic Applications³⁷

Overview The biannual ECPE Wide Bandgap User Forum is dedicated to report and discuss state of the art and prospects of SiC and GaN devices in power electronic systems. Major progress has been achieved in the meantime: Today SiC transistors and diodes are available within a wide voltage range and from various manufacturers; they are used in a variety of products. Application-specific aspects gain importance, such as qualification when exposed to demanding mission profiles in electric vehicles. Of course research and development to optimise the devices continuously and extend their operational range continue in parallel. In a similar way GaN power transistors have matured and penetrated various applications while research and development are ongoing as well. In addition, R&D is dedicated to further devices based on other materials.

The ECPE wide bandgap user forum taking place in early summer 30 June-1 July 2021 was special since it had been postponed taking into account the pandemic situation, this way permitting to carry it out as one of the first hybrid events in the area of power electronics this year with some of the participants taking part on site in München and others remotely; the exchange which got possible again this way was highly appreciated. Some main contentual topics are summarised in the following paragraphs.

State of the Art and Trends From application point of view, 650 V GaN HEMTs are competing charge compensated silicon MOSFETs in particular in power supplies; in addition optimised 650 V SiC MOSFETs might replace the formers as well. This permits to increase the efficiency or the power density of the respective converters which are usually single phase off-grid versions with power factor correction, or DC-DC converters such as in the on-board grid of electric vehicles. Switching frequency may reach up to considerable 1 MHz in this voltage class. Similar aims — optimisation of efficiency or power density — can be realised with SiC MOSFETs for 1200 V or higher blocking voltages in converters connected to the three-phase grid, e. g. being part of wind generator systems. In this voltage range solutions with silicon transistors and SiC diodes may in addition still permit an optimisation compared to converters with silicon devices only.

The usage of SiC and GaN devices of course requires that they are qualified, reach an appropriate reliability under consideration of the the mission profile and also provide enough ruggedness. Major progress in device development, standardisation and qualification has been reported in this respect as well as ongoing work: E. g. bipolar degradation doesn't constitute a problem in today's SiC devices when operated in the range of nominal current, and their power cycling capability has been successfully optimised to reach a comparable level as conventional silicon devices, taking into account the different material properties. This has been reached with newly developed packages which often use sinter connections and partially permit double-sided cooling. Ongoing work e. g. refers to the methods for power cycling tests which need to cope with the known drift effects of SiC MOSFETs' threshold voltage. Their short circuit capability would be desirable in many applications but increasing it by device design turns out to be costly.

³⁷chaired by Prof. Dr.-Ing. Andreas Lindemann, Dr. Peter Friedrichs (Infineon Technologies) and Prof. Leo Lorenz (ECPE)

As an alternative, the devices may be monitored using e. g. dedicated driver circuits, allowing to turn short circuits off immediately and detect possible damages. While earlier mostly drivers for silicon MOSFETs have been used to control SiC and GaN transistors, the latter's increasing use has permitted the development of dedicated drivers. This is in particular promising for GaN HEMTs with their relatively low allowed gate voltage range; as the devices are lateral anyway, the integration of a driver circuit and also possibly of more circuit elements — like a complete phaseleg — constitutes a promising approach, which amongst others solves many issues related to inductive parasitics in conventional packages and circuit layouts.

This is directly related to the addressed aspect of circuit and system design: Electromagnetic compatibility plays an important role here and will be strongly influenced by oscillations triggered by the switching actions; recent methods to minimise these effects have been explained as well as the impact of voltage change rates on isolation systems. Obviously designers can use a variety of tools to investigate particular aspects, nevertheless their holistic knowledge and experience how to properly design a circuit with wide bandgap devices is of great importance.

As a further outlook, device and circuit optimisation for special requirements — like under high temperature conditions or exposed to cosmic ray — has been addressed. This may require measures concerning the semiconductor devices themselves as well as their packages. Probing even further, devices made of gallium oxide or diamond are under investigation.

Conclusion and Outlook The findings as briefly summarised above illustrate the fast development of wide bandgap power semiconductors and their successful use in industry. This is beneficial for power electronics as a key technology in various areas, such as energy efficiency, usage of renewable sources for electric energy supply, e-mobility or also automation. Both, SiC and GaN devices are available in continuously increasing production volumes. They are widely applied in commercial products and allow to optimise those with respect to e. g. efficiency or miniaturisation. Nevertheless, research, development and also standardisation are ongoing to further exploit the possibilities of wide bandgap devices in power electronics. The European Center for Power Electronics (ECPE) is a stakeholder in this area, bringing together industrial partners and research institutions. After the broad interest of far more than 200 international participants in this year, ECPE will announce the next SiC & GaN User Forum in 2023. There will be the occasion to report the progress achieved since today — and to celebrate the jubilee of the 10th event within this successful series.

3.5 Institutsebene

3.5.1 Technische Gremien und Verbände

- Prof. Leidhold:
 - VDE- und ETG-Mitglied
 - IEEE Member (Industrial Electronics Society, Industry Applications Society und Power Electronics Society)
- 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)
 - * Mitglied des Fachbereichs Q1 (Leistungselektronik und Systemintegration) der ETG
 - * Mitglied des VDE-Ausschusses Studium, Beruf und Gesellschaft
 - * Vorsitzender des Fakultätentages für Elektrotechnik und Informationstechnik e. V.
 - * Vorstandsmitglied der Fakultätentage der Ingenieurwissenschaften und der Informatik an Universitäten e. V. (4ING)
 - Herausgeberschaft, Redaktion
 - * Technical Programme Chair der International Conference on Integrated Power Electronics Systems CIPS, gemeinsam mit Prof. Kaminski
 - * 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
 - * Guest Associate Editor des IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics für die Special Issue on the Design and Testing Methods of Power Electronics Components and Circuits
 - * Mit-Herausgeber der Schriftenreihe „MAgdeburger FOrum zur Elektrotechnik/Res Electricae Magdeburgenses“
 - Der Lehrstuhl für Leistungselektronik ist ein Competence Centre des European Centers for Power Electronics (ECPE).



- Prof. Vick:
 - Mitglied im Verein Deutscher Ingenieure (VDI)
 - Mitglied der Energietechnischen Gesellschaft (ETG) im Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik (VDE)
 - Mitglied im Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)
 - * Senior Member
 - * Mitglied der Electromagnetic Compatibility (EMC) Society
 - Gutachter für die IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility
 - Mitglied der Joint Task Force A-H der International Electrotechnical Commission (IEC)
- Prof. Wolter:
 - Mitgliedschaften und Gremien
 - * IEEE PES Senior Member
 - * VDE
 - * ETG FB V2 Übertragung und Verteilung
 - * BMWi AG Intelligente Netze und Zähler
 - * BMWi AG Systemsicherheit
 - * Executive Board Member IEEE PES German Chapter
 - * Associate Editor des IET Generation, Transmission & Distribution Journal
 - * Editorenboard at-Automatisierungstechnik
 - * Fachausschuss V2.1/FA7.16 Netzregelung und Systemführung
 - * Joint Degree / IEEE Working Group and Voltage Stability
 - * Vice Chair: Dynamic Security Assessment Working Group, IEEE PES Power Systems Dynamic Performance committee

3.5.2 Kolloquien

ICECCME 2021³⁸

Vom 7. bis 8. Oktober 2021 fand die International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME) an der University of Mauritius statt. Der Lehrstuhl Lena war auf der Konferenz vertreten mit der Publikation „Layout of a Scientific Control Center Environment to Develop Future Grid Operation Methods“ von Nicola Könneke und Christian Klabunde. Der Fokus des Papers lag auf dem Aufbau der Kommunikation zwischen der Simulation in MATLAB und dem PSIcontrol-Netzleitstand.

Hierzu wurde eine Java-Schnittstelle entwickelt, die Daten aus dem MATLAB-Workspace ausliest und in IEC-60870-5-104-Telegramme übersetzt. Diese Telegramme können vom Netzleitstand interpretiert und visualisiert werden. Außerdem kann die Schnittstelle genutzt werden um Befehle, die im Netzleitstand ausgelöst werden an die MATLAB-Simulation zu übergeben und dort z. B. den Zustand von Schaltern oder die Einspeisung von Erzeugungsanlagen im elektrischen Netz anzupassen. Die Inhalte des Papers wurden im Rahmen einer Online-Konferenz vorgestellt und anschließende Fragen zum Thema beantwortet. Auch wenn der Großteil der Konferenzteilnehmer Online an der Konferenz teilgenommen hat, hat sich auch ein kleiner Teil

³⁸von M. Sc. Christian Klabunde

auf Mauritius eingefunden um die Ergebnisse der jeweiligen Publikationen vor Ort zu präsentieren und zu diskutieren.

IEEE PES General Meeting 2021³⁹

Vom 25. bis 29. August fand das diesjährige General Meeting der IEEE PES statt. Anstatt in Washington, USA fand die Konferenz aufgrund der COVID-19-Pandemie virtuell statt und der gesamte wissenschaftliche Austausch wurde ins Internet verlagert. Die geplante Reise musste daher leider abgesagt werden. Stattdessen wurden Kurzpräsentation der einzelnen Paper aufgenommen und auf einer Videoplattform zur Verfügung gestellt.

Herr Martin Fritsch stellte die jüngsten Ergebnisse aus dem Projekt Low-Cost-Teilentladungsmessung vor. Es wurden Simulationsergebnisse gezeigt, welche das Übertragungsverhalten von Teilentladungen auf Mittelspannungskabeln abbilden. Mit Hilfe der Simulationen konnte der Einfluss des Tiefpassverhalten der Energiekabel auf die Teilentladungssignale detailliert untersucht werden. Diese Erkenntnisse werden als Grundlage der anschließend geplanten Sensorentwicklung weiterverwendet.

Neben den eigenen Präsentationen gab es eine Vielzahl an weiteren Vorträgen zu verschiedenen Themen des Energiesystems, die On-Demand zur Verfügung standen. Darüber hinaus gab es bei den Panel Sessions weitere Möglichkeit zur Diskussion aktueller Themen der Energietechnik.

NEIS 2021⁴⁰

Die diesjährige NEIS fand vom 13. bis 14. September statt. Der geplante Austragungsort für diese Konferenz war die Helmut-Schmidt-Universität in Hamburg. Aufgrund der COVID-19-Pandemie fand die Konferenz virtuell statt. Die Beiträge von den Mitarbeitern Muhammad Tayyab, Sebastian Helm und Christian Ziegler wurden erfolgreich angenommen.

Herr Christian Ziegler stellte in seinem Vortrag eine neue Methode zur Abschätzung von Stabilitätsreserven im Bereich der Spannungsstabilität vor. Diese neue Methode erzielte eine hohe Genauigkeit an abgeschätzten Reserven und kann auch in einer Ausfallvariantenrechnung eingesetzt werden. Darüber hinaus kann mit ihrer Hilfe ein großes Einsparpotential an Rechenzeit gehoben werden. Herr Sebastian Helm analysierte in seinem Beitrag das Verhalten von Elektrofahrzeugen in einem schwachen Niederspannungsnetz. Dabei wurde gezeigt, wie sich aktuell und zukünftig Unsymmetrien im Niederspannungsnetz, hervorgerufen durch einphasig ladende Elektrofahrzeuge, ausbreiten. Weiterhin wurde aufgezeigt, welchen Beitrag Elektrofahrzeuge im Rahmen von Vehicle-to-Grid liefern können. Herr Muhammad Tayyab präsentierte eine neue Methode zur Dimensionierung von Batteriespeichern in Kombination mit PV-Anlagen für den Einsatz an elektrischen Ladesäulen. Mit der entwickelten Methode konnte ein Spannungseinbruch in einem Niederspannungsnetz erfolgreich kompensiert und so die Spannungsqualität verbessert werden.

Neben den eigenen Präsentationen gab es eine Vielzahl an weiteren Vorträgen zu Themen rund um Modellierung und Betrieb des elektrischen Netzes sowie elektrischen Energiespeichern und Elektromobilität. Darüber hinaus wurde eine virtuelle Abendveranstaltung mit einer Quiznacht als Highlight ausgerichtet.

³⁹ von M. Sc. Martin Fritsch

⁴⁰ von M. Sc. Martin Fritsch

3.5.3 Preise

Ehrung für Institutsmitglieder durch den Magdeburger Oberbürgermeister

Gleich drei Mitarbeiter unseres Instituts wurden am 11.11. 2021 vom Oberbürgermeister der Stadt Magdeburg Herrn Dr. Lutz Trümper für ihr ehrenamtliches Engagement ausgezeichnet. Herr Dr. Moawia Al-Hamid wurde für seine ehrenamtliche Arbeit als Vorstandsvorsitzender und Imam der Islamischen Gemeinde Magdeburg geehrt (siehe Abbildung 3.59). Er unterstützt seit fast 20 Jahren Muslime in vielen Bereichen des täglichen Lebens und das von ihm initiierte Gemeindezentrum ist für viele Muslime aus verschiedenen Ländern zu einer wichtigen Anlaufstelle geworden. Zudem engagiert sich Dr. Al-Hamid im Kampf gegen den Extremismus und wünscht sich auch für andere islamische Gemeinden in Deutschland und ganz Europa ein friedliches Miteinander. Bei Begegnungsfesten treffen sich Christ*innen und Muslim*innen zum interreligiösen Gespräch. Im Rahmen der Ernennung zum „Vize-Magdeburger des Jahres 2016“ wurde Dr. Al-Hamid auch schon als „Brückenbauer“ bezeichnet.



Abbildung 3.59: Ehrung von Dr. Moawia Al-Hamid durch den Magdeburger Oberbürgermeister

Dr.-Ing. Mathias Magdowski und Dr.-Ing. Thomas Schallschmidt wurden für ihren Einsatz in der Nachwuchsförderung geehrt (siehe Abbildung 3.60). Hervorgehoben wurden die vielfältigen Angebote, welche die beiden im Rahmen von Schüleraktivitäten innerhalb und außerhalb der Universität durchführen, um Kindern und Jugendlichen Technik näherzubringen und sie dafür zu begeistern.



Abbildung 3.60: Ehrung von Dr.-Ing. Mathias Magdowski und Dr.-Ing. Thomas Schallschmidt durch den Magdeburger Oberbürgermeister