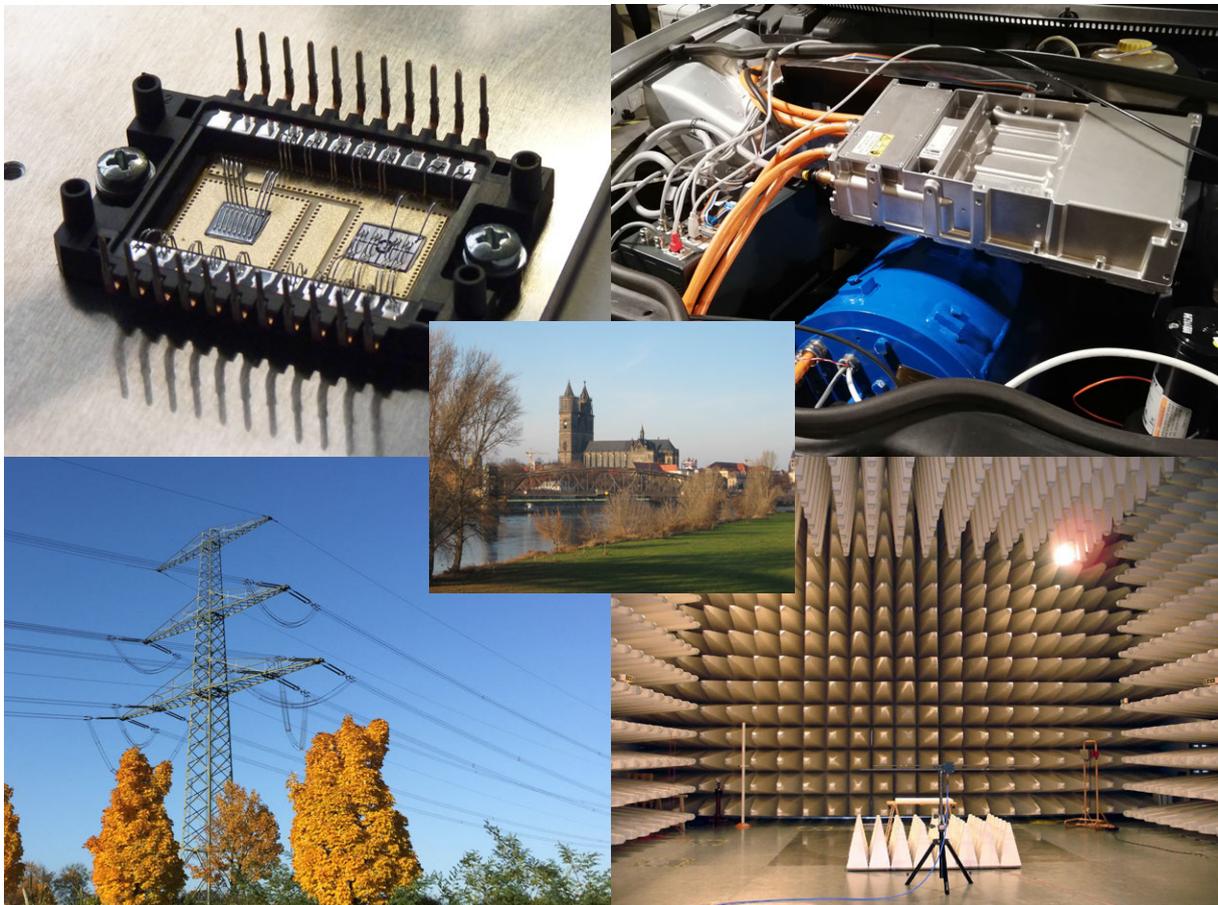


Jahresbericht 2020

der Lehrstühle für

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



FAKULTÄT FÜR
ELEKTROTECHNIK UND
INFORMATIONSTECHNIK

Vorwort

Sehr geehrte Leserinnen und Leser,

mit 2020 geht ein für uns alle sicherlich außergewöhnliches Jahr zu Ende. Die innerhalb kürzester Zeit erfolgte Umstellung auf digitale Lehre, Projektmeetings im Internet und virtuelle Konferenzen haben einiges an Kreativität und das Loslassen liebgewonnener Gewohnheiten gefordert. Umso erfreulicher ist es, dass wir Ihnen dennoch diesen ganz physischen Jahresbericht überreichen können, 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 DFG-Projekt „QUESTIES“ gewonnen werden. Darüber hinaus wurden die Zeiten des Lockdowns intensiv zur Antragstellung genutzt, so dass wir uns für 2021 auf mehrere größere, bundesfinanzierte Projekte freuen dürfen.

In der Lehre bieten wir fakultätsübergreifend über 40 Lehrveranstaltungen an, die in diesem Jahr überwiegend online durchgeführt wurden. Diese Situation war für alle Beteiligten anfänglich etwas ungewohnt, das Wintersemester ist dann aber schon routiniert online angelaufen. Die im Jahr 2020 betreuten 25 studentischen Forschungsprojekte, 12 Bachelorarbeiten und 25 Masterarbeiten zeigen, dass die Energieforschung auch weiterhin ein spannendes und nachgefragtes Themenfeld bietet. Veranstaltungen des akademischen Austausches sind dieses Jahr weitgehend ausgefallen. Dies ist besonders schade, da 2020 neue internationale Kooperationen mit Brasilien und Äthiopien angelaufen wären. Zumindest die Zusammenarbeit mit der Ukraine im Rahmen des deutschsprachigen Studiengangs konnte in Form einer Präsenzlehrveranstaltung in Charkiw und der dortigen Unterzeichnung neuer Kooperationsvereinbarungen im März noch wie geplant stattfinden. 2020 konnten zwei Dissertationen erfolgreich abgeschlossen werden. Am 29.01. wurde Dr.-Ing. Stephan Balischewski mit dem Thema „Multifunktionaler Einsatz von Batteriespeichern in elektrischen Verteilnetzen – Optimale Auslegung und Betrieb“ und am 05.10. Dr.-Ing. Lars Middelstädt mit dem Thema „Transiente Effekte in leistungselektronischen Schaltungen mit schnellschaltenden Leistungshalbleitern unter besonderer Berücksichtigung der elektromagnetischen Verträglichkeit“ promoviert.

Ende Juli hat unsere langjährige Ökonomin Martina Krieger ihren wohlverdienten Ruhestand angetreten. Ich danke ihr für ihre langjährige, zuverlässige Mitarbeit und wünsche ihrer Nachfolgerin Julia Reinecke viel Freude in ihrem neuen Tätigkeitsbereich. Besonders hervorzuheben ist, dass Herr Prof. Lindemann in den Vorstand des Fakultätentags für Elektrotechnik und Informationstechnik gewählt wurde. Ich möchte ihm hierzu herzlich gratulieren. Ein weiteres Highlight war auch die Beteiligung des Lehrstuhls für Elektromagnetische Verträglichkeit sowie des Lehrstuhls für Elektrische Antriebssysteme an der Bewerbung der Stadt Magdeburg zur Kulturhauptstadt 2025, auch wenn sich Magdeburg am Ende Chemnitz geschlagen geben musste.

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 in diesen turbulenten Zeiten sowie ein erfolgreiches, sich hoffentlich normalisierendes Jahr 2021.

Magdeburg, im Dezember 2020

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	2
1.1.6	Mitarbeiter in Technik und Verwaltung	2
1.2	Lehrstuhl Elektrische Netze und Erneuerbare Energie	2
1.2.1	Hochschullehrer	2
1.2.2	Lehrbeauftragte	2
1.2.3	Wissenschaftliche Mitarbeiter	2
1.2.4	Externe Promovenden	3
1.2.5	Mitarbeiter in Technik und Verwaltung	3
1.3	Lehrstuhl für Elektromagnetische Verträglichkeit	3
1.3.1	Hochschullehrer	3
1.3.2	Wissenschaftliche Mitarbeiter	3
1.3.3	Externe Promovenden	3
1.3.4	Mitarbeiter in Technik und Verwaltung	4
1.4	Lehrstuhl für Leistungselektronik	4
1.4.1	Hochschullehrer	4
1.4.2	Wissenschaftliche Mitarbeiter	4
1.4.3	Mitarbeiter in Technik und Verwaltung	4
1.5	Institutsebene	4
1.5.1	Technik	4
1.5.2	Verwaltung	4
2	Studium und Lehre	5
2.1	Lehrstuhl für Elektrische Antriebssysteme	5
2.1.1	Vorlesungen, Übungen und Praktika	5
2.1.2	Abgeschlossene Forschungsprojekte	12
2.1.3	Abgeschlossene Bachelor- und Studienarbeiten	12
2.1.4	Abgeschlossene Masterarbeiten	12
2.2	Lehrstuhl Elektrische Netze und Erneuerbare Energie	14
2.2.1	Vorlesungen, Übungen und Praktika	14
2.2.2	Abgeschlossene Forschungsprojekte	19
2.2.3	Abgeschlossene Bachelor- und Studienarbeiten	20
2.2.4	Abgeschlossene Master- und Diplomarbeiten	20
2.3	Lehrstuhl für Elektromagnetische Verträglichkeit	22
2.3.1	Vorlesungen, Übungen und Praktika	22
2.3.2	Abgeschlossene Forschungsprojekte	32
2.3.3	Abgeschlossene Bachelor- und Studienarbeiten	32
2.3.4	Abgeschlossene Master- und Diplomarbeiten	32
2.4	Lehrstuhl für Leistungselektronik	33
2.4.1	Lehrveranstaltungen für Bachelor-Studiengänge	33

2.4.2	Lehrveranstaltungen für Master-Studiengänge	35
2.4.3	Abgeschlossene Forschungsprojekte	37
2.4.4	Abgeschlossene Master- und Diplomarbeiten	37
2.5	Institutsebene	38
2.5.1	Internationale Hochschulkooperationen	38
2.5.2	Aktivitäten in Verbänden	38
2.5.3	Exkursionen	40
2.5.4	Studienwerbung	40
3	Forschung	57
3.1	Lehrstuhl für Elektrische Antriebssysteme	57
3.1.1	Forschungsprofil	57
3.1.2	Forschungsprojekte	59
3.1.3	Promotionen	67
3.1.4	Veröffentlichungen	67
3.2	Lehrstuhl Elektrische Netze und Erneuerbare Energie	69
3.2.1	Forschungsprofil	69
3.2.2	Forschungsprojekte	69
3.2.3	Promotionen	79
3.2.4	Veröffentlichungen	81
3.2.5	Kolloquien	82
3.3	Lehrstuhl für Elektromagnetische Verträglichkeit	85
3.3.1	Forschungsprofil	85
3.3.2	Forschungsprojekte	86
3.3.3	Promotionen	104
3.3.4	Veröffentlichungen	106
3.4	Lehrstuhl für Leistungselektronik	110
3.4.1	Forschungsprofil	110
3.4.2	Forschungsprojekte	110
3.4.3	Promotionen	117
3.4.4	Veröffentlichungen	119
3.4.5	Veranstaltungen	119
3.5	Institutsebene	121
3.5.1	Technische Gremien und Verbände	121

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

1.1.4 Gastwissenschaftler

- Milkias Berhanu Tuka, Adama Science and Technology University, Äthiopien
- Zenachew Muluneh Hailemariam, Adama Science and Technology University, Äthiopien
- Adisu Teshale Afeta, Adama Science and Technology University, Äthiopien
- Prof. Dr. Tafesse Abera, Adama Science and Technology University Äthiopien
- Prof. Dr. Pablo de la Barrera, Universidad Nacional de Rio Cuarto, Argentinien
- Prof. Dr. Guillermo Catuogno, National University of San Luis, Argentinien
- Marcial Otero, Universidad Nacional de Rio Cuarto, Argentinien
- Dr. Oybek Ishnazarov, Scientific and Technical Centre of JSC Uzbekenergo
- Dr. Manuel Armando Mazzoletti, Universidad Nacional de Rio Cuarto, Argentinien

1.1.5 Externe Promovenden

- Henning S. Vogt, Volkswagen AG, Konzernforschung
- Aleksej Kieselev, TH Mittelhessen, Friedberg
- 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. Stephan Balischewski (bis 31.07.2020)
- M. Sc. Jonte Dancker
- M. Sc. Martin Fritsch
- M. Sc. Marc Gebhardt
- M. Sc. Mahmood Gholizadeh
- 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
- M. Sc. Muhammad Tayyab

- Dipl.-Ing. Michael Wenske
- M. Sc. Tahaguas Woldu
- M. Sc. Yonggang Zhang
- M. Sc. Christian Ziegler

1.2.4 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

1.2.5 Mitarbeiter in Technik und Verwaltung

- Melanie Baumgarten (Sekretärin)

1.3 Lehrstuhl für Elektromagnetische Verträglichkeit

1.3.1 Hochschullehrer

- Prof. Dr.-Ing. Ralf Vick

(Lehrstuhlleiter am Institut für Medizintechnik, Dekan der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik - bis 30.09.2020)

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
- M. Sc. Thomas Gerlach
- M. Sc. Enrico Pannicke
- M. Sc. Moustafa Raya
- M. Sc. Benjamin Hoepfner
- M. Sc. Felix Mittelstädt
- M. Sc. Max Rosenthal
- M. Sc. Gleb Manokhin

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. 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)
- 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)

1.5.2 Verwaltung

- Martina Krieger (Ökonomie, Buchhaltung am Institut für elektrische Energiesysteme) (bis 31.07.2020)
- 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 Vorlesungen, Übungen und Praktika

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:	M. Sc. Sebastian Benecke
	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

— 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 permanentenerregten Synchronmaschine
- Vereinfachtes Modell der Asynchronmaschine
- Thermische Vorgänge
- Wirkungsgrad des Antriebssystems

Geregelte elektrische Antriebe

— Controlled electrical drives —

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

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

Modellierung und Simulation elektrischer Antriebe, Seminar

— Modelling and simulation of electrical drives —

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

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

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

Speicherprogrammierbare Antriebssteuerungen

— Programmable-logic controlled drives —

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

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

Elektrische Maschinen

— Electrical machines —

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

Unkonventionelle elektrische Maschinen

— Unconventional Electrical Machines —

WS V 2 SWS: Prof. Dr.-Ing. Roberto Leidhold
Ü 1 SWS: Dr.-Ing. Thomas Schallschmidt
M. Sc. Sebastian Hieke
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: Dipl.-Ing. Andreas Gerlach
Ü 1 SWS: M.Sc. Sebastian Hieke

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

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

Analyse und Berechnung elektromechanischer Strukturen Teilmodul II, Seminar

— Analysis and calculation electromechanical structures —

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

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

Praktika im Online-Semester

Im letzten Sommersemester 2020 wurde aufgrund der Corona-Pandemie auch die Lehre an der Otto-von-Guericke-Universität als reines Online-Angebot durchgeführt. Diese Art der Lehre stellte alle Beteiligten vor neue Herausforderungen, sowohl die Studierenden als auch die Dozent*innen mussten sich in diese neue Situation erst einarbeiten. Es galt kurzfristig neue Konzepte für die Lehre zu finden und umzusetzen. Vorlesungen und Übungen wurden z. B. als synchrone Online-Veranstaltungen oder auch als asynchrone Videoaufzeichnungen realisiert.

Eine besondere Herausforderung war die Umsetzung von Praktika, die in den Ingenieurwissenschaften ein fester Bestandteil der Lehre sind. Praktika dienen der Festigung von theoretisch vermitteltem Vorlesungsstoff. Zusätzlich werden Kompetenzen im Beschreiben von technischen Sachverhalten vermittelt.

Es galt auch diese Art der Lehrveranstaltungen virtuell anzubieten. Hierfür wurde für die Grundlagenveranstaltung „Allgemeine Elektrotechnik“ eine auf MATLAB-basierende App entwickelt, die das Bedienen einer spannungsgesteuerten Gleichstrommaschine virtuell nachbildet (siehe Abbildung 2.1).

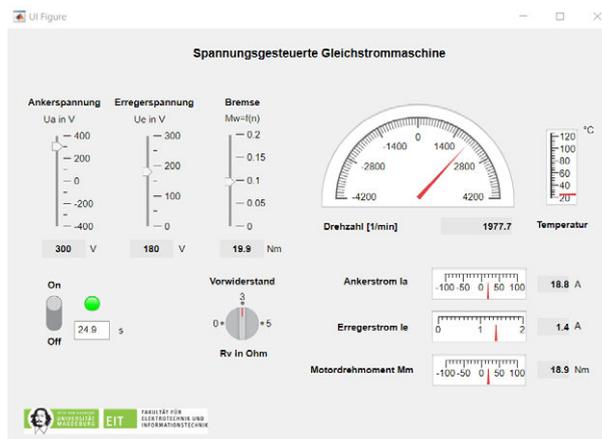


Abbildung 2.1: Spannungsgesteuerte Gleichstrommaschine

Die Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg verfügt über eine umfangreiche MATLAB-Campuslizenz, die es allen Studierenden ermöglicht, MATLAB entweder lokal zu installieren oder über die MATLAB-Online-Plattform zu nutzen. Hierdurch kann eine hohe Verfügbarkeit realisiert werden. Erweitert durch die Möglichkeiten der E-Learning-Plattform konnten die Studierenden den Versuch mit Antestat, Versuchsdurchführung, Protokollerstellung und Bewertung komplett online durchführen und erhielten abschließend ein persönliches Feedback zu ihren Ausarbeitungen.

Die Nachbildung des dynamischen Verhaltens der spannungsgesteuerten Gleichstrommaschine ermöglichte den Studierenden das virtuelle Experimentieren. Die Änderungen der Eingangsgrößen wie Ankerspannung, Erregerstrom und Widerstandsmoment beeinflussten direkt das Drehzahlverhalten der Maschine und über das zusätzlich nachgebildete thermische Verhalten können deren Einflüsse auf die Erwärmung des Motors direkt dargestellt werden. Damit kann man den Motor sogar virtuell überlasten und überhitzen, was in der Praxis aus Sicherheitsgründen nicht möglich ist. Trotzdem fehlt natürlich die Anmutung, die Haptik und der Geräuschpegel eines echten Antriebsversuchsstandes.

Diese Art des Praktikums führt die Studierenden frühzeitig an die Nutzung von MATLAB heran und festigt ihre Kompetenzen im Bereich der Auswertung von technischen Sachverhalten. Im kommenden Wintersemester wird diese Art des Praktikums auch für die Umsetzung des aktiven

und passiven Zweipols und des Schwingkreises genutzt. In Abbildung 2.2 ist der Aufbau der Versuche gezeigt.

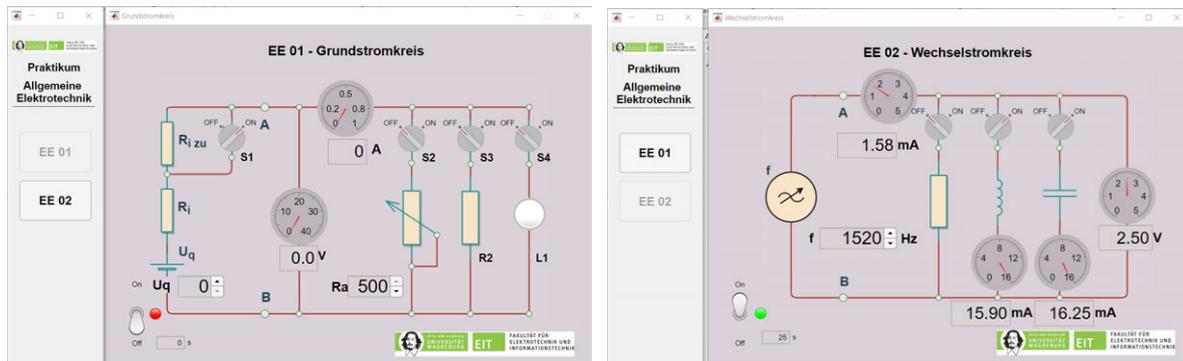


Abbildung 2.2: Grundlagenversuche

Zukünftig wird das Angebot noch erweitert, so dass sich noch mehr Anwendungsmöglichkeiten ergeben. Denkbar ist unter anderem die Nutzung der Versuche mit individuellen Parametern oder auch die Verwendung im Bereich der Studienwerbung. Hierbei ist auch eine Überführung in Python und Qt für die Visualisierung denkbar.

2.1.2 Abgeschlossene Forschungsprojekte

1. Robert Schlabe: Regulierung eines Reluktanzlinearaktors für die Ventile eines Freikolbenmotors
2. Egor Astafev: Suitability of Electrical Machines for the Use of Sensorless Control in a Low-Speed Range
3. Florian Aust: Auslegung und Konstruktion einer Verstärkerplatine mit hohem Rauschzustand
4. Samuel Weber: Feldorientierte Regelung einer 24 V-Asynchronmaschine
5. Bilal Badar: Patent Analysis and Literature Search on the Principle of Switched-Flux Electrical Machines
6. Florian Pflugfelder: Untersuchung eines Ringsegmentgenerators für ein Klappschaufelwasserrad

2.1.3 Abgeschlossene Bachelor- und Studienarbeiten

1. Florian Aust: Entwicklung eines optimierten Qualitätssicherungsverfahrens zur Erkennung mangelhafter Schweißverbindungen in der Statorwicklung eines Ringgenerators

2.1.4 Abgeschlossene Masterarbeiten

1. Jonathan Mischke: Leistungsmessung in kontaktlosen Energieübertragungssystemen
2. Andrii Anufriiev: Entwicklung und Implementierung einer mikrocontrollerbasierten Versuchsstandsteuerung

3. Max Hoppe: Anwendungsspezifische Steuer- und Überwachungsverfahren für umrichterbetriebene PM-Synchronmaschinen als Unterwasserpumpenantriebe
4. Mykhaylo Golovin: Schwingungsdämpfung mit Piezoaktoren
5. Zhulin, Oleksandr: Verteilte feldorientierte Regelung einer zweiphasigen Transversalfussmaschine mit Scheibenläufer
6. Halyna Iashchenko: Experimentelle Parameterbestimmung für permanenterregte Synchronmaschinen
7. Stephan Schneider: Weiterentwicklung und Funktionsnachweis eines kontaktlosen Datenübertragungssystems unter charakteristischen Einsatzbedingungen der Industrie
8. Florian Pflugfelder: Auslegung und Optimierung eines flussgeschalteten Ringsegmentgenerators
9. Pranav Gowthan Palukuru: Realisation of a current control loop using a XMOS-multicore-processor platform

2.2 Lehrstuhl Elektrische Netze und Erneuerbare Energie

2.2.1 Vorlesungen, Übungen und Praktika

Elektrische Energieversorgung

— Electric Power Supply—

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

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

Elektrische Netze 1

— Electric Power Networks 1 —

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

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

Elektrische Netze 2

— Electric Power Networks 2 - Power System Dynamics —

WS 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. André Richter

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

Energiespeichersysteme

— Energy storage systems —

WS V 2 SWS: Jun.-Prof. Dr.-Ing. Ines Hauer
Ü 1 SWS: Jun.-Prof. Dr.-Ing. Ines Hauer
M. Sc. Sebastian Helm

- Elektrochemische Energiespeicher
- Mechanische Speicher
- Sektorenkopplung
- Anwendungen
 - Dimensionierung, Betrieb und Systemtechnik von Solarspeichersystemen

2 Studium und Lehre

- 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. Jonte Dancker

- 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. Awais Aijaz: | Distributed Energy Resources (DER) and Optimization Methods in the Context of Energy Hub/Microgrid |
| 2. Punyam Rajendran Sai Sasidhar: | Development of Sector Coupling and Battery Storage With Respect to Load and Infeed Forecast |
| 3. Azamat Matkhalikov (GRIAT): | Literature Review on Reactive Power Compensation Techniques |
| 4. Oleg Petrukhin (GRIAT): | Review on Improvement of Voltage Stability Using STATCOM and SVC |
| 5. Christoph Brandes: | Dimensionierung eines Smart Homes unter Berücksichtigung von Elektrofahrzeugen |
| 6. Shyne Sukumaran: | Prediction of Photovoltaic Energy Output Using Artificial Neural Networks to Attain Load Flexibility of the Power System |
| 7. Mustafa Mustafa: | Eine Übersicht der lastflusssteuernden Betriebsmittel in elektrischen Energieversorgungsnetzen |

2 Studium und Lehre

8. Sebastian Dreier: Analyse des SciGrid-Datensatzes zum Aufbau eines europäischen Verbundnetzmodells
9. Mohammed Ahmed Alsiddig Ahmed: Optimization of Solar-Wind Hybrid System for Power Generation
10. Vineela Punuru: Numerical Approximation of a Power Coefficient Curve in Wind Turbine Power Generation
11. Pavlo Oliinyk: Validierung eines 110 kV-Netzdatensatzes der Regelzone 50 Hertz
12. Satya Ravindra Kumar Veeravalli: A Literature Review on the Planning of EV Charging Placement and Analysis of Heat Pumps Distribution

2.2.3 Abgeschlossene Bachelor- und Studienarbeiten

1. Till Hülsebusch: Termin- und Regelleistungsmarktpartizipation durch Virtuelle Kraftwerke – Risiko der Energiebereitstellung
2. Lydia Elsholz : Erstellung eines Anforderungskatalogs für die netzbetreiberseitige Erzeugungsprognose
3. Sina Kirchhof: Einspeiseprognosen für erneuerbare Energieanlagen
4. Marcus Oberthür: Einspeisemanagementkonzepte im 110 kV-Verteilnetz
5. Kevin-Maik Kämpfer: Geschäftsmodellinnovation im Energiemarkt – Die leistungsbezogene Energiefltrate
6. Fabian Balkon: Händlerverhalten am Energiemarkt – Ein Vergleich verschiedener theoretischer Modelle
7. Linning Xian: Optimaler Betrieb eines Metallhydridspeichers für eine unitäre reversible Brennstoffzelle
8. Elisa Sergioli: Einfluss des kontaktdruckabhängigen elektrischen Widerstandes auf die Stromdichteverteilung in Brennstoffzellen

2.2.4 Abgeschlossene Master- und Diplomarbeiten

1. Iryna Pavlova: Optimierung eines Businessmodells für Anwendungsfälle der Sektorenkopplung anhand von On- und Offshore-Windparks
2. Daniel Grosz: Regelbasiertes Energiemanagement von Quartieren
3. Markus Eppler: Einsatz von Speichertechnologien zur Unterstützung von Ladeinfrastruktur
4. Anton Komar: Auslegung und Betrieb von Lage- und Salzspeicher in einem Microgrid
5. Mohd Syamirul Huzseini Bin Mohamad Isa: Inbetriebnahme und Ansteuerung eines Batteriespeichers

- | | |
|---------------------------|---|
| 6. Florian Kirchof: | Untersuchung von Optimierungsmöglichkeiten in Bezug auf Ertrag und Betriebskosten von Windenergieanlagen im laufenden Betrieb und Ableitung von Prüfverfahren zur Identifikation von Verbesserungen |
| 7. Manoj Pesaru: | Development of a CGMES Converter |
| 8. Bartłomiej Madura: | Dynamische Modellierung der 50-Hertz-Netzregion |
| 9. Hani Al Aghawani: | Modellierung und Optimierung des Verhaltens netzbildender Wechselrichter am Verbundnetz |
| 10. Frederik Liggesmeyer: | Verbrauchsoptimierung durch optimiertes Demand Side Management im Haushaltssektor |
| 11. Maximilian Oelze: | Analyse eines untertägigen elektrischen Versorgungsnetzes |
| 12. Jonathan Ulbrich: | Weiterentwicklung des Regelleistungsmonitoring in der 50-Hertz-Regelzone |

2.3 Lehrstuhl für Elektromagnetische Verträglichkeit

2.3.1 Vorlesungen, Übungen und Praktika

Elektromagnetische Verträglichkeit regenerativer elektrischer Systeme

WS V 2 SWS: Prof. Dr.-Ing. Ralf Vick
M.Sc. 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

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.

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

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.

Aufgrund der Einschränkungen der Präsenzlehre durch die Coronapandemie fand der Vorkurs in diesem Jahr in einem reinen Online-Format statt. Da es im Vorkurs neben den mathematischen Inhalten auch um ein Ankommen an der Universität und um das gegenseitige Kennenlernen der Kommiliton*innen geht, gab es für die Studierenden im Vorfeld ein kleines vorbereitetes Begrüßungsvideo, siehe <https://youtu.be/tSe1WXcr1GM>. Als digitale asynchrone Vorstellungsrunde gab es dann z. B. ein Padlet (siehe Abbildung 2.3) und viele interaktive Umfragen in den synchronen Zoom-Videokonferenzen, die nicht einer klassischen Vorlesung sondern eher einem Online-Plenum entsprachen, in dem der ganze Kurs zusammenkommt.

Die eigentlichen Inhalte wurden den Teilnehmer*innen als Lückentext-Skript (siehe <https://www.overleaf.com/read/rbgyfsdryhqb> mit Links und QR-Code-Verweisen auf passende Videos zur Verfügung gestellt, welche die Studierenden eigenverantwortlich mit freier Zeiteinteilung und ortsunabhängig durcharbeiten konnten. Das tägliche synchrone Online-Plenum von 10 Uhr bis 11 Uhr diente dann nur für interaktive Quizze, gemeinsames Zeichnen auf dem Zoom-Whiteboard zum Bearbeiten von grafischen Aufgaben oder für die Durchführung und Diskussion von Experimenten. Nach einer Mittagspause, bei der sich auch gemeinsam auf der informellen Videokonferenzplattform *Wonder* ausgetauscht werden konnte (siehe Abbildung 2.4), gab es vier Online-Übungsgruppen, die jeweils von einer/einem studentischen Tutor*in geleitet wurden.

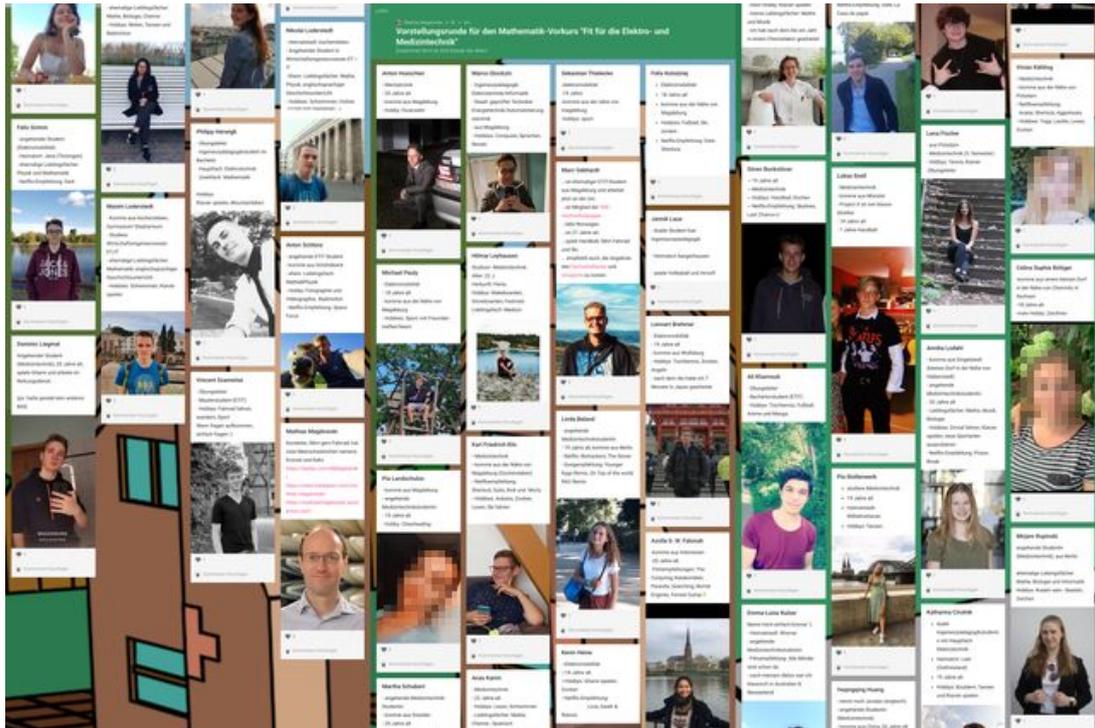


Abbildung 2.3: Padlet für eine digitale asynchrone Vorstellungsrunde im Mathematik-Vorkurs „Fit für die Elektro- und Medizintechnik“

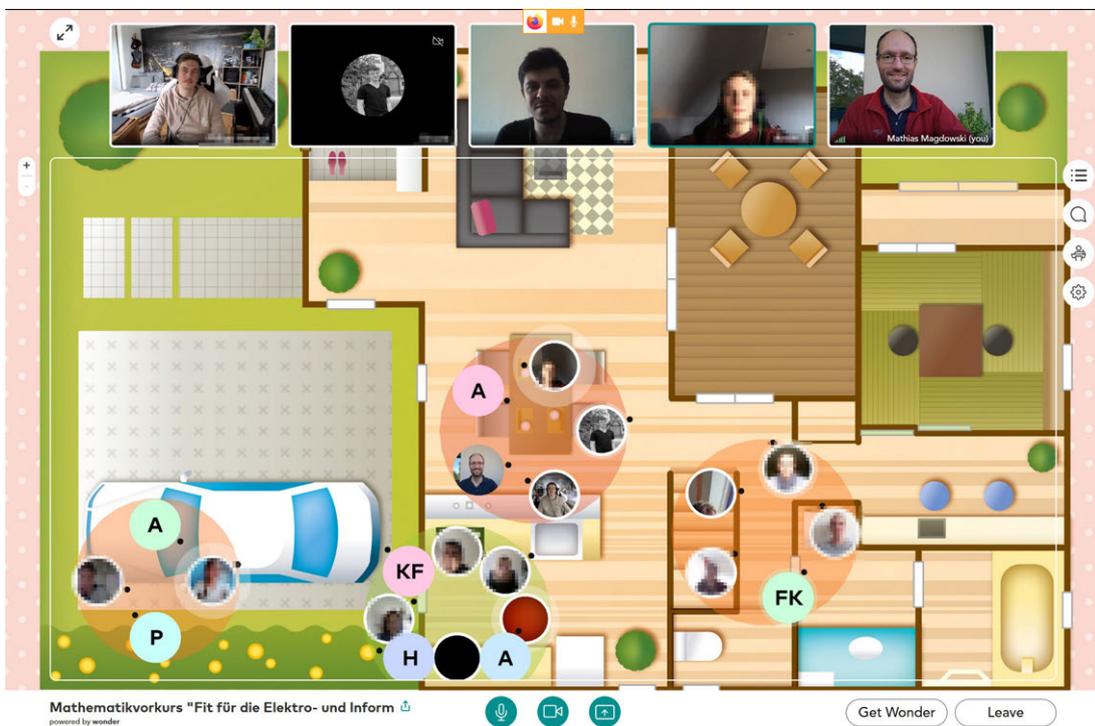


Abbildung 2.4: Für gemeinsame informelle Pausengespräche wurde im Mathematik-Vorkurs „Fit für die Elektro- und Medizintechnik“ die Videokonferenzplattform „Wonder“ genutzt.

2 Studium und Lehre

Insgesamt hat der Vorkurs in diesem Jahr trotz oder vielleicht gerade wegen der konsequenten Durchführung in einem reinen Online-Format mit entsprechend langfristiger Planung und sorgfältiger Vorbereitung sehr gut funktioniert. Über die jeweiligen Aktivitäten und Interaktionen im Kurs wurde dann auch sehr aktiv bei Twitter berichtet:

1. Tag: <https://twitter.com/MMagdowski/status/1315644727224659969>

2. Tag: <https://twitter.com/MMagdowski/status/1315963906347732992>

3. Tag: <https://twitter.com/MMagdowski/status/1316307390644527110>

4. Tag: <https://twitter.com/MMagdowski/status/1316675464094789642>

5. Tag: <https://twitter.com/MMagdowski/status/1317008205583683584>

Auch sonst findet man unter dem Hashtag #FitFürEMT bei Twitter noch einige weitere Erkenntnisse aus dem Kurs, z. B. zu den informellen Pausen in Yotribe/Wonder oder bei „Laptops in Space“ (siehe <https://twitter.com/MMagdowski/status/1316090139437871104>). Ein besonderer Dank geht an die studentischen Tutor*innen Lena, Vincent, Ali und Philipp, ohne deren Unterstützung der Kurs in dieser Form nicht möglich gewesen wäre.

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.

Due to the online-teaching requirement in 2020, the course materials were recorded as several short video lectures and have been made freely available for asynchronous learning of our international students. A corresponding YouTube playlist is available at:
<https://www.youtube.com/playlist?list=PLWCa06Bpqy-49BM8cXrdtoSm3Ivtr9aVs>

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.

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)

EMV-Messtechnik

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

Im Rahmen des Seminars EMV-Messtechnik experimentieren im Sommersemester 2020 drei Studierende selbstständig mit einer Tiefsetzsteller-Platine TI-PMLK BUCK von Würth Elektronik bzw. Texas Instruments. Die etwa handtellergröße Platine (siehe Abbildung 2.5) umfasst zwei unabhängige Buck-Konverter mit sechs verschiedenen Induktivitäten, die jeweils einzeln per Jumper bzw. Steckkontakt ausgewählt werden können. Mit dem Experimentierkit lassen sich die Auswirkungen der spezifischen Eigenschaften der Induktivitäten aus unterschiedlichen Kernmaterialien und Größen untersuchen, um deren Einfluss auf die statische und dynamische Leistung von Schaltreglern zu analysieren.

Bei jeder der Schaltungen können die Betriebsbedingungen einzeln eingestellt werden, z. B. kann die Schaltfrequenz flexibel von 100 kHz bis 700 kHz variiert werden. Ergänzend zur Hardware half eine ausführliche Online-Anleitung den Studierenden mit detaillierten Versuchsanleitungen bei den Experimenten mit dem Board.

Die Studierenden führten in Eigenregie insgesamt sechs Experimente unter stationären, transienten und dynamischen Bedingungen durch. Ihre Ergebnisse dokumentierten sie auf dem Twitter-Kanal <https://twitter.com/Emv0vgu>. Eine ausführliche schriftliche Dokumentation ist unter <https://bit.ly/EMV0vgu> zu finden.

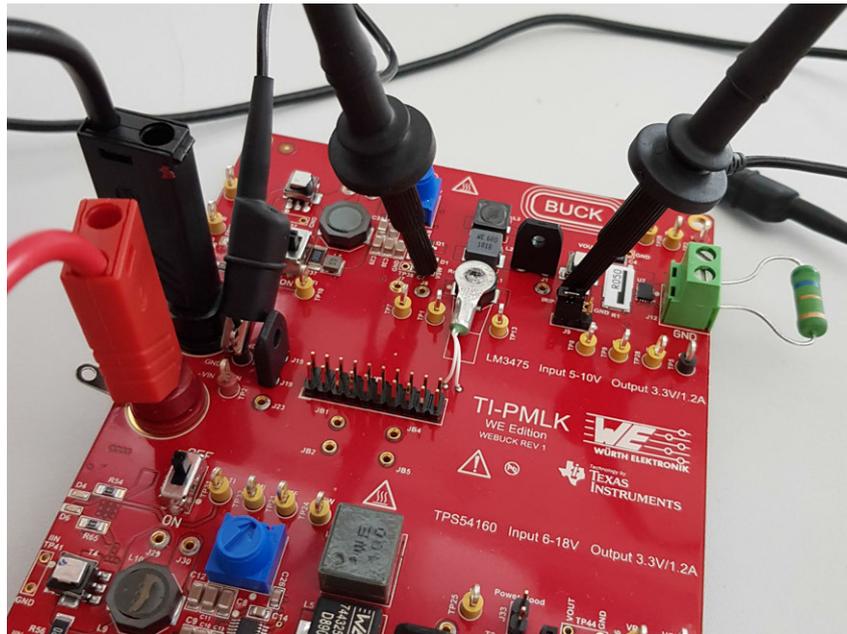


Abbildung 2.5: Im Sommersemester 2020 führten Studierende in der Lehrveranstaltung „EMV-Messtechnik“ in Eigenregie verschiedene Experimente mit dem Tiefsetzsteller-Board TI-PMLK BUCK von Würth Elektronik bzw. Texas Instruments durch.

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 Seminar, das in diesem Jahr vom 11. bis 24.02. stattfand, bekommen die Studierenden zunächst eine Einführung in die Programmierung in MATLAB und in die Ansteuerung von LEGO-Motoren und das Auslesen von LEGO-Sensoren über einen entsprechenden Programmierbaustein. In Gruppen von 2 bis 3 Personen entwickeln, bauen und programmieren die Studierenden dann kleine Maschinen oder Roboter aus LEGO, die automatisch irgendeine Art von mehr oder weniger sinnvoller Tätigkeit ausführen. Die Ideen werden von den Studierenden selbst entwickelt, was für die besondere Motivation sorgt. Neben der fachlichen Komponente werden im Seminar auch Schlüsselkompetenzen entwickelt, z. B. in der Gruppenarbeit sowie im Zeit- und Projektmanagement. Die Studierenden stellen sich ihre Ideen, Arbeitsfortschritte und Endergebnisse außerdem in Kick-Off-, Zwischen- und Abschlusspräsentationen gegenseitig und vor den Betreuer*innen vor. Im Anschluss an das Seminar halten die Studierenden ihre Resultate auch in 4-seitigen Papieren fest, die über die Universitätsbibliothek veröffentlicht werden (siehe <http://journals.ub.uni-magdeburg.de/ubjournals/index.php/LEGO>).

Auf dem Foto in Abbildung 2.6 ist ein selbstgebauter Pfandflaschenautomat zu sehen. Dieser transportiert eine eingegebene Flasche über ein Förderband bis zu einer Kamera, welche die Flasche filmt und nach einem Barcode sucht. An der Kameraposition wird die Flasche mit einem weiteren Motor einmal um die eigene Achse gedreht. Wird dabei ein gültiger Barcode gefunden, wird die Flasche weiter transportiert. Wird kein gültiges Etikett gefunden, wird die Flasche wieder ausgeworfen. Die anderen Gruppen bauten in diesem Jahr z. B.

- einen Xylophon-Roboter
- einen Fußballroboter
- einen Memory-Roboter
- einen autonomes Einparksystem



Abbildung 2.6: Studentisch entwickelter Pfandflaschenautomat aus dem Projektseminar Elektrotechnik/Informationstechnik

- einen Knuddelroboter mit Schnurrmotor und Krawlererkennung

Das Projektseminar Elektrotechnik/Informationstechnik gibt es an der gleichnamigen Fakultät schon seit 8 Jahren. Es wird hauptsächlich von Mitarbeiter*innen des Lehrstuhls für Elektromagnetische Verträglichkeit am Institut für Medizintechnik und des Lehrstuhls für Elektrische Antriebssysteme am Institut für Elektrische Energiesysteme betreut.

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

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

Für einige Studierende des Masterstudiengangs „Electrical Engineering and Information Technology“ hielt Dr. Mathias Magdowski am German-Russian Institute of Advanced Technologies (GRIAT) an der Staatlichen Technischen Andrej-Nikolajewitsch-Tupolew-Universität Kasan in Russland vom 24. Februar bis 06. März 2020 die Vorlesung „Modern Concepts of Electromagnetic Compatibility and EMC Measurements“. Das Blockseminar fand in dieser Form bereits zum sechsten Mal statt. Die Lehrveranstaltung bestand aus einer täglichen Vorlesung, die durch eine Rechenübung sowie einigen Computerübungen ergänzt wurde.



Abbildung 2.7: Russische Studierende des Masterstudiengangs „Electrical Engineering and Information Technology“ vor der Tupolew Tu-144 an der Staatlichen Technischen Andrej-Nikolajewitsch-Tupolew-Universität Kasan in Russland

Dabei wurden folgende Themen behandelt:

- Grundlagen und Geschichte der Elektromagnetischen Verträglichkeit
- Störquellen und Störsignale im Zeitbereich und Frequenzbereich
- Rechnen mit Maßen und Pegeln in Dezibel
- Gleichtakt- und Gegentaktsignale
- galvanische, kapazitive, induktive und elektromagnetische Kopplung
- Elementardipole und Linearantennen
- Schirmungstheorie nach Schelkunoff
- lineare und nichtlineare Filter

In den Computerübungen wurden praxisrelevante Probleme zur Fourierreihe und Fouriertransformation, zur galvanischen und kapazitiven Kopplung sowie zu Filtern mit Hilfe der Numeriksoftware MATLAB bzw. dem Netzwerksimulator LTspice berechnet und simuliert. Außerdem wurden Abstrahldiagramme von Dipol- und Schleifenantennen mit Hilfe der Feldsimulationssoftware CONCEPT-II analysiert und grafisch dargestellt. Wie alle anderen Lehrveranstaltungen am GRIAT wurde auch dieser Kurs ebenfalls in englischer Sprache durchgeführt. Die zwölf russischen und kirgisischen Studierenden im zweiten Mastersemester waren mit großen Interesse dabei und schätzen die individuelle Betreuung. Sie bedankten sich am Ende der zwei Wochen mit russischem Tee und tatarischen Süßigkeiten. Sie studieren dann ab Oktober 2020 für ein Semester an der Otto-von-Guericke-Universität in Magdeburg und absolvieren dabei die zur Lehrveranstaltung zugehörigen praktischen Übungen sowie das Laborpraktikum.

Das Studium in Kasan ist ähnlich aufgebaut wie in Deutschland und ebenso in ein Bachelor- und Masterstudium untergliedert, wobei die Luftfahrttechnik und insbesondere der Hubschrauber- und Flugzeugbau eines der Hauptthemenfelder darstellt. Deshalb befindet sich stilschlecht eine Tupolew Tu-144 auf dem Campus des GRIAT, die als Fotomotiv sehr beliebt ist (siehe Abbildung 2.7). Dieser überschalltaugliche Passagierjet der russischen Fluggesellschaft Aeroflot wurde in den 1960er-Jahren entwickelt und zur Zeit in ein Museum umgebaut.

2.3.2 Abgeschlossene Forschungsprojekte

1. Steven Bernick: Entwicklung einer Online-Impedanzbestimmung durch spannungsgeführte Wechselrichter zur Oberschwingungsfilterung
2. Lena Fischer: Einsatz eines niederschwellig programmierbaren Roboters „Ozobot“ für MINT-Mitmachaktionen und Tage der offenen Labortür
3. Maximilian Hollenbach: Realisierung eines DonkeyCar-Projekts zum autonomen Fahren
4. Christoph Leugers: Realisierung eines DonkeyCar-Projekts zum autonomen Fahren

2.3.3 Abgeschlossene Bachelor- und Studienarbeiten

1. Pierre Bolz: Elektromagnetische Umweltverträglichkeit von Sitzheizungen in Kraftfahrzeugen
2. Vincent Szameitat: Strombasierte EMVU-Bewertung für Energiesysteme im Kraftfahrzeug
3. Jannik Sobisch: Variantenuntersuchung zur Kompensationsmaßnahmen der elektromagnetischen Beeinflussung durch die Elektrifizierung der Eisenbahnstrecke 6107

2.3.4 Abgeschlossene Master- und Diplomarbeiten

1. Igor Agafonov: Redesign of a Mode Stirrer for the Large Reverberation Chamber in Magdeburg
2. Abir Md Rifatul Bari: Development and Construction of an EMC Demo Box
3. Iga Mendrecka: Simulation of Interference Field Strength Levels of Power Line Communication Equipment in the Mains Grid in CONCEPT-II

2.4 Lehrstuhl für Leistungselektronik

2.4.1 Lehrveranstaltungen für Bachelor-Studiengänge

Grundlagen der Leistungselektronik

— Introduction to power electronics —

SS	V 2 SWS:	Prof. Dr.-Ing. Andreas Lindemann 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:	Prof. Dr.-Ing. Andreas Lindemann Dr.-Ing. Reinhard Döbbelin M. Sc. Anton Churpryn
	P 1 SWS:	Prof. Dr.-Ing. Andreas Lindemann Dr.-Ing. Reinhard Döbbelin M. Sc. Carsten Kempiak M. Sc. Anton Churpryn

- Leistungshalbleiter-Bauelemente:

2 Studium und Lehre

- MOSFET
- IGBT
- Diode
- Thyristor

unter besonderer Berücksichtigung von

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

Bauelemente der Elektronik

— Electronic devices —

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

- 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
Dr.-Ing. Reinhard Döbbelin
Ü 1 SWS: Dr.-Ing. Reinhard Döbbelin
M. Sc. Anton Chupryn
Dipl.-Ing. Andreas Bannack
Dr.-Ing. Thomas Schallschmidt
P Dipl.-Ing. Andreas Bannack
M. Sc. Sebastian Bennecke
und Kollegen

- Grundbegriffe
- Stromkreise
- Wechselgrößen
- elektrische und magnetische Felder

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

2.4.2 Lehrveranstaltungen für Master-Studiengänge

Schaltungen der Leistungselektronik

— Power electronic circuits —

SS V 2 SWS: Prof. Dr.-Ing. Andreas Lindemann
Ü 1 SWS: M.Sc. Carsten Kempiaik

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

- 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 Prof. Dr.-Ing. Andreas Lindemann
Dr.-Ing. Reinhard Döbbelin
M.Sc. Carsten Kempiak

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.

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: M. Sc. Tianyu Li
Dr.-Ing. Reinhard Döbbelin

- 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. Robin Patel: Methods to quickly sense the threshold voltage of SiC MOSFETs during operation
2. Willem Biermann: Hardware-in-the-Loop-Simulation eines induktiven Übertragungssystems mit variabler Kompensation
3. Kevin Ladentin: Dokumentation und Weiterentwicklung eines FEM-Modells zur Ermittlung der Temperaturverteilung in Leistungshalbleitern mit integriertem Temperatursensor

2.4.4 Abgeschlossene Master- und Diplomarbeiten

1. Philip Godehardt: Entwicklung, Aufbau und Inbetriebnahme eines Leistungsteils mit hoher Stromtragfähigkeit für einen Lastwechselversuchsstand

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 Pokrowsk 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. Viele geplante Aktivitäten mussten verschoben oder gar gestrichen werden. Nichts desto trotz konnten im Frühjahr 2020 noch einige gemeinschaftliche Aktivitäten unternommen werden, die nachfolgend beschrieben sind. Darüber hinaus bot die Covid-19-Pandemie die Möglichkeit über neue Formen der Angebotsfindung für Studierende nachzudenken. So werden die traditionellen Workshops Wintersemester 20/21 in einer online-Variante stattfinden. Über weitere Online-Angebote wird nachgedacht.

¹von Dr.-Ing. Mathias Magdowski

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

Hochhauslauf des Sportzentrums im Campustower³ Am 22. Januar hat die IEEE Student Branch mit Julia, Ben und Mathias (auf dem Foto noch ganz entspannt vor dem Start) wieder am jährlichen Hochhauslauf des Sportzentrums an der Otto-von-Guericke-Universität im Campustower teilgenommen. Die Strecke bestand wie immer aus ca. 60 Meter „Anlauf“ vor dem Haus, dann 14 Etagen mit 2×8 Stufen je Etage, plus 8 Stufen am Eingang vor dem Haus, also insgesamt 232 Stufen. Leider hat es diesmal nicht für eine Spitzenplatzierung in der Teamwertung gereicht. Dennoch sind die SportlerInnen mit Laufzeiten von 103,1 s, 83,1 s und 77,4 s sehr zufrieden (siehe Abbildung 2.8). Für die IEEE Student Branch war es nach 2015, 2017, 2018 und 2019 bereits die fünfte Teilnahme am Hochhauslauf.



Abbildung 2.8: Vor dem Start beim Hochhauslauf 2020

Mission Exit⁴ Am 20.01. hat sich die Student Branch Magdeburg der Aufgabe gestellt, das „Erbe des Königs“ zu erkämpfen. Dabei galt es sich in zwei sich gegenseitig konkurrierenden Gruppen zu messen, um einen ruhmreichen Sieg davon zu tragen. Die beiden Teams mussten dabei im Mission Exit knifflige Denkaufgaben lösen und konnten das jeweils gegnerische Team ausspionieren oder auf eine falsche Fährte locken. Letztlich gingen jedoch alle als Sieger aus dem Spiel und trafen sich anschließend in geselliger Runde (siehe Abbildung 2.9).

VDE-Hochschulgruppe Magdeburg⁵

Im Jahr 2020 belief sich die Kooperation lediglich auf die Planung von Veranstaltungen, die dann später aufgrund der bekannten Beschränkungen nicht durchgeführt werden konnten. Umso mehr Zeit blieb, für das kommende Jahr Exkursionen, Fachvorträge und andere Zusammenkünfte zu planen.

³ von M. Sc. Benjamin Hoepfner

⁴ von M. Sc. Benjamin Hoepfner

⁵ von M. Sc. Marc Gebhardt



Abbildung 2.9: Teilnehmer der Mission Exit Challenge

2.5.3 Exkursionen

Besuch des Wolmirstedter Umspannwerks⁶

Am 30.01.2020 waren die Studierenden wieder dazu eingeladen an einer Exkursion ins Umspannwerk Wolmirstedt teilzunehmen. Es wurde Wichtigkeit der Arbeiten im UW vorgestellt und ein Einblick in den Arbeitsalltag gewährt. Anschließend ging es durch die netztechnischen Anlagen zur alten Schaltzentrale, die sogar noch für die 220 kV-Anlagen genutzt wird. Die Studierenden konnten die Elemente, die in der Vorlesung gelehrt werden in der Praxis anschauen, hören und Elemente, die nicht unter (Höchst-)Spannung stehen, auch anfassen (siehe Abbildung 2.10).

2.5.4 Studienwerbung

Schülerpraktikum am LENA – Interessante Einblicke in Forschung und Studium⁷

Der Lehrstuhl bietet bereits seit vielen Jahren interessierten Schülern und Schülerinnen umfassende Einblicke in die Forschungsarbeiten und Studienmöglichkeiten am LENA und der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.

Wie können die verstärkt eingesetzten erneuerbaren Energien in das elektrische Netz integriert werden; welche Rolle spielen dabei Energiespeicher und wann werden Wasserstoffwirtschaft und Brennstoffzellen zum Einsatz kommen? Nur einige Fragen die im Rahmen der zumeist zweiwöchigen Praktika theoretisch und durch praktische Laborversuche den Schülern und Schülerinnen näher gebracht werden.

Im Rahmen des Praktikums werden jedoch nicht nur die Themen des LENA behandelt, sondern auch andere Forschungsbereiche der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik. Interessante Einblicke bieten die Absorberhalle des Lehrstuhls für Elektromagnetische Verträglichkeit und die Aktivitäten zur Elektromobilität des angrenzenden Fraunhofer IFF Magdeburg.

⁶ von M. Sc. Marc Gebhardt

⁷ von Dr.-Ing. Maik Heuer



Abbildung 2.10: Teilnehmer*innen der Exkursion

Weiterhin besteht die Möglichkeit in der Praktikumszeit Vorlesungen zu besuchen, interessante Standorte der Universität, wie die imposante Architektur der Bibliothek kennenzulernen und wichtiges Hintergrundwissen zum Studium zu erlangen. Im aktuellen Jahr fanden zwei Schülerpraktika statt. Die Schüler wurden durch die Praktikumsangebote der Fakultät auf das LENA aufmerksam und lernten die Bereiche Elektrische Energienetze, Elektromobilität und Brennstoffzelle kennen.

Tabelle 2.1: Schülerpraktikanten am LENA

<i>Name</i>	<i>Schule</i>	<i>Zeitraum</i>
Magnus Klose	Internationales Gymnasium Pierre Trudeau	13.01 – 24.01.2020
Caspar Hentrich	W.-v.-Siemens Gymnasium Magdeburg	09.03 – 13.03.2020

Radelnde Wissenschaftler – Academic Bicycle Challenge 2020⁸

Wie schon im Jahr 2019 nahm auch dieses Jahr ein Team des Lehrstuhl LENA an der Academic Bicycle Challenge teil. Unterstützt wurden die Kollegen in diesem Jahr unter anderem von Thomas Schallschmidt, Ronald Böck und Mathias Magdowski von befreundeten Lehrstühlen. Auch in diesem Jahr machten die Radler dem Teamnamen „LENA voller ELAN“ alle Ehre und fuhren in Summe 12 107,1 km. Im weltweiten Vergleich belegt das Team den dritten Platz aller Teams. In Summe wurden bis Redaktionsschluss von allen Teilnehmern auf der Welt 468 857 km „erfahren“.

In diesem Jahr zielte die Wertung auf den Schnitt im Team mit mindestens fünf Teilnehmern, sodass am Schluss als taktisches Manöver nur die besten fünf Radler im Team übrigblieben und zur Siegerehrung eingeladen wurden (siehe Abbildung 2.11). Als Ziel für das kommende Jahr kann neben der Erhöhung der Kilometer vor allem eine Verbesserung des Modus von Seiten des Organisators gesetzt werden.

⁸von M. Sc. Marc Gebhardt

Im Einzelnen wurden die in Tabelle 2.2 zusammengefassten Plätze erreicht.

Tabelle 2.2: Academic Bicycle Challenge 2019 – Team „LENA voller ELAN“

Rang (uniweit)	Rang (weltweit)	Name	Gefahrene Strecke in km
1	3	Magdowski, Mathias	3487,6
11	27	Gebhardt, Marc	1737,1
21	51	Wenske, Michael	1352,5
24	56	Weniger, Sören (FMA)	1306,5
30	79	Klabunde, Christian	1101,4
34	86	Heuer, Maik	1058,3
57	179	Langer, Theo (FIN)	666,3
70	233	Glende, Eric	560,3
75	243	Böck, Ronald	541,4
150	501	Schallschmidt, Thomas	295,5



Abbildung 2.11: Gruppenfoto bei der Siegerehrung

Roboter zum Anfassen und Funkwellen zum Anhören für die Grundschule Ottersleben⁹

Ist es schwierig, einen kleinen Roboter so zu programmieren, dass er eine bestimmte Strecke abfährt? Wie kommen die Steuersignale von einer Funkfernbedienung zum Spielzeugauto? Wie kann man sich die Logikgatter und Schaltkreise in einem Prozessor mechanisch vorstellen? Diesen und ähnlichen Fragen gingen die SchülerInnen einer zweiten Klasse der Grundschule Ottersleben aus Magdeburg nach, die unsere Fakultät am Donnerstag, den 16.01., zu einem Tag der offenen Labortür in der Experimentellen Fabrik besuchte.

Die 22 Kinder konnten in kleinen Gruppen an sieben verschiedenen Stationen experimentieren, programmieren, basteln und ausprobieren. Zu den Mitmachangeboten gehörten folgende bewährte Stationen:

Elektrobaukasten: Auf einem Steckbrett können die Schülerinnen und Schüler eine einfache Schaltung zusammenbauen, die z. B. eine Melodie spielt oder einen kleinen Propeller fliegen lässt.

⁹ von Dr.-Ing. Mathias Magdowski

- Was sind Interferenzen? Wir erklären, wie ein ferngesteuertes Auto funktioniert, warum sich manche Fernbedienungen gegenseitig beeinflussen und was man dagegen tun kann.
- Wie bitte? Die Kinder probieren aus, wie man Nachrichten mit Hilfe eines Morse-Codes ausdrückt und können sich dann gegenseitig eine Nachricht schicken (siehe Abbildung 2.12).
- Ozobot: Der Ozobot ist ein kleiner Roboter, der Linien entlang fährt und sich durch Farbmuster steuern lässt. Die SchülerInnen versuchten damit z. B. den schnellsten Weg durch ein selbstgezeichnetes Labyrinth zu finden.
- Sphero: Dieser Roboter in Kugelform ist etwa so groß wie ein Tischtennisball, steckt aber voller Technik. Zwei Motoren, ein Akku, farbige LEDs und ein Fernsteuermodul ermöglichen den Sphero z. B. per Smartphone oder Tablet-PC zu steuern.



Abbildung 2.12: Die Kinder der Grundschule Ottersleben probierten aus, wie man Nachrichten mit Hilfe eines Morse-Codes ausdrückt und konnten sich dann gegenseitig eine Nachricht schicken.

Erstmals angeboten wurden folgende Stationen:

- KUBO: Der KUBO-Roboter besteht aus einem fahrbaren Körper und einem aufsetzbaren Kopf, mit dem man ihn ein- und ausschaltet. Mittels kleinen bunten Kacheln, über die der Roboter drüber fährt, kann man ihn mit Prozeduren und Schleifen programmieren, so dass er selbstständig eine bestimmte Strecke abfährt.
- Turing Tumble: Das Turing Tumble ist eine besondere Murmelbahn. Immer wenn unten eine blaue oder rote Murmel ankommt, wird oben eine neue blaue oder rote Murmel losgelassen. Durch spezielle Rampen, Umlenker und Sammler für die Murmeln kann man damit so etwas wie einen mechanischen Logikrechner bauen.

Alle Stationen wurden von Studierenden und Mitarbeitern der Fakultät der Elektro- und Informationstechnik sowie des Medizintechnik-Forschungscampus STIMULATE betreut. Ein großes

Dankeschön geht dafür an Schülerpraktikant Magnus, die Studierenden Anne Marie, Alexander, Philipp und Adrian sowie an Detlef Baumecker und Thomas Schallschmidt.

Technik-Erlebnismittag „Blinkende Babycomputer und rasende Roboter zum Anfassen!“ im in:takt 28¹⁰

Am 21. Januar veranstaltete die Studienwerbungsgruppe der Fakultät für Elektro- und Informationstechnik unter dem Motto „Blinkende Babycomputer und rasende Roboter zum Anfassen!“ einen Technik-Erlebnismittag für 6- bis 12-Jährige im in:takt 28 auf dem Breiten Weg in Magdeburg. Das in:takt 28 ist ein offener Raum der Otto-von-Guericke-Universität, der im Rahmen eines sozialwissenschaftlichen Seminars als Begegnungsstätte für verschiedene Aktionen genutzt werden kann.

Im Sinne der Nachhaltigkeit wurde die Ausrüstung mit einem Lastenrad vom ADFC Magdeburg transportiert (siehe Abbildung 2.13), das dann vor Ort auch als Werbeträger diente.



Abbildung 2.13: Nachhaltiger Transport des Equipments zum Technik-Erlebnismittag „Blinkende Babycomputer und rasende Roboter zum Anfassen!“ im in:takt 28 mit einem Lastenrad des ADFC Magdeburg

An einer der vier angebotenen Stationen konnten die Kinder und Jugendlichen mit kleinen Ozobots experimentieren, die Linien entlangfahren und sich durch selbstgemalte Farbmuster steuern lassen. Vielen Dank an Medizintechnik-Student Mahmoud für das Erklären der Funktionsweise und der Farbmuster.

Ein weiterer „rasender Roboter“ war ein kleiner Sphero-Ball, den man mit Hilfe von Thomas grafisch so programmieren konnte, dass er eine bestimmte Bahn abfährt, ohne die Kegel umzuwerfen.

Ein „blinkender Babycomputer“ war der Makey Makey, mit dem man einen „echten Computer“ über alltägliche Dinge wie z. B. Möhren steuern kann. Ein großer Dank geht an Medizintechnik-Student Joaquin, der mit den Kindern und Jugendlichen damit ein Möhrenpiano baute und auch erklärte, warum eine Möhre den elektrischen Strom überhaupt leitet.

¹⁰von Dr.-Ing. Mathias Magdowski

Der Elektrobaukasten war die letzte der vier MINT-Mitmachstationen beim Technik-Erlebnismittag, den Medizintechnik-Studentin Indri toll zeigte und erklärte. Ein Quell ewiger Freude ist dabei der fliegende Propeller, toll war aber auch die Polizeisirene.

Für alle erfolgreichen MINT-Experimentierkids gab es dann noch ein paar Giveaways von der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Gummibärchen und einen Infoflyer für die Eltern.

Vielen Dank auch an das Team des in:takt 28, dass der Fakultät die Räumlichkeiten für den Technik-Erlebnismittag zur Verfügung stellte. Der Raum war sehr gemütlich und bot eine tolle Atmosphäre. Insgesamt nahmen etwa 20 Kinder und Jugendliche zwischen 7 und 13 Jahren das Angebot wahr, meist in Begleitung ihrer Eltern, die oft ebenso großes Interesse für die Experimente zeigten.

MINT-Projekttag mit den 6. Klassen des Internationalen Stiftungsgymnasiums aus Magdeburg¹¹

Am Dienstag, den 28. Januar, und Mittwoch, den 29. Januar besuchten uns 21 SchülerInnen aus den 6. Klassen des Internationalen Stiftungsgymnasiums (ISG) Magdeburg zu zwei MINT-Projekttagen an der Otto-von-Guericke-Universität. Da das Gebäude des ISG nur wenige hundert Meter von der OVGU entfernt ist, konnten die SchülerInnen bequem zu Fuß zum Universitätscampus kommen.

An beiden Tagen erwartete die Jugendlichen ein intensives Programm von 9 Uhr bis 13 Uhr, am Dienstag in der Experimentellen Fabrik und am Mittwoch im Gebäude 03.

Eine von sieben Experimentierstationen am Dienstag war dann den Show-Rettungswagen der Zukunft des Forschungscampus STIMULATE, in dem es spannende Einblicke in die Medizintechnik gab. Unter Anleitung von Katharina und Peter konnten die SchülerInnen z. B. ein Elektroskalpell ausprobieren und damit flüssiges Eiweiß verkleben.

Genau hinhören und aufmerksam lauschen durften die SchülerInnen beim Morse-Versuch. Hier wurden Nachrichten mit Hilfe einer Morse-Tabelle kodiert, als Funkwelle übermittelt und wieder dekodiert. Medizintechnik-Student Mahmoud gab dafür die nötige Hilfestellung.

Ein weitere Station war der Sphero-Roboter. Auch wenn dieser eher wie ein Golfball aussieht und wir damit auch Roboter-Minigolf gespielt haben, steckt er doch voller Technik und lässt sich per Funk steuern. Die Herausforderung für die SchülerInnen war, den Roboter so zu steuern und zu programmieren, dass er im Ziel „einlocht“. Medizintechnik-Studentin Darya gab dafür die nötigen Tipps und Hinweise.

Tolle Lerneffekte gab es für die SchülerInnen auch bei der Station mit dem Elektrobaukasten. Hier wurde z. B. der Frage nachgegangen, warum ein kleiner Motor und ein Lautsprecher nicht zusammen in einer Reihenschaltung funktionieren. Elektrotechnik-Studentin Danielle konnte dann erklären, dass der Motor Gleichstrom braucht, der Lautsprecher aber Wechselstrom.

Wie kann man mit Möhren Musik machen (und was haben Wasser und Mineralien damit zu tun)? Auch damit beschäftigten sich die SchülerInnen beim MINT-Projekttag an der Station mit dem Makey Makey, an der sie ein Möhrenpiano bauten und kurzer Melodien darauf spielen konnten. Vielen Dank an Medizintechnik-Student Joaquin fürs Erklären.

Auch unser KUBO-Roboter war mit am Start. Dieser kann ebenfalls grafisch und anschaulich über Piktogrammacheln programmiert werden und fährt dann z. B. eine eingespeicherte Strecke ab. Die Mädels des ISG haben das super hinbekommen und hatten viel Spaß! Ein Dankeschön geht an Medizintechnik-Studentin Lina fürs Zeigen.

¹¹ von Dr.-Ing. Mathias Magdowski

2 Studium und Lehre

Noch ein Roboter und die letzte der sieben Mitmach-Stationen am Dienstag war der Smartibot. Dieser kann zunächst wie ein ferngesteuertes Auto mit einem Smartphone als Fernbedienung gesteuert werden, um z. B. eine rechteckige Strecke abzufahren. Die Aufgabe für die SchülerInnen war dann, den Smartibot durch entsprechende Ansteuerung der Motoren so zu programmieren, dass er das Rechteck von allein abfährt.

Anschließend ging es für die Jugendlichen zum gemeinsamen Mittagessen in die Hauptmensa. Da am Vormittag aus Zeitmangel nicht alle Gruppen alle Stationen besuchen konnten, haben sich nach der Mittagspause die SchülerInnen gegenseitig ihre jeweils erste Station vorgestellt und das aus dem Stegreif wirklich super gemacht. Vielen Dank an die Universitätsbibliothek, die uns dafür den Besprechungsraum am Foyer zur Verfügung stellte.

Am Mittwoch ging es dann beim zweiten MINT-Projekttag in drei etwas größeren Gruppen weiter. An einer Station wurden Ozobots gesteuert und programmiert. Das geht ganz ohne Computer, den zum Vorgeben der Befehle reichen bestimmte Farbmuster, welche die SchülerInnen mit Stiften entlang einer Linie auf ein großes Blatt malten. Vielen Dank an Medizintechnik-Student Ahmad fürs Zeigen.

Die zweite Experimentierstation am Mittwoch kam ohne Elektrotechnik aus und drehte sich um die Frage, was einem Fahrzeug hilft, möglichst weit zu rollen. Die Medizintechnik-Studierenden Indri und Alexander halfen den SchülerInnen beim Messen der gefahrenen Wegstrecke von selbstgebaute LEGO-Fahrzeugen mit unterschiedlicher Masse und verschiedenen großen Rädern, die eine Schräge herunterrollten.

In der dritten Experimentierstation wurden die Calliope-mini-Einplatinencomputer programmiert (siehe Abbildung 2.14). Anschließend ging es für die 6. Klassen wieder zum Mittagessen in die Mensa und danach kurz in den Besprechungsraum der Universitätsbibliothek, denn erneut konnte nicht jede Gruppe jede Station besuchen. Deshalb haben wir die SchülerInnen wieder gebeten, sich gegenseitig ihre jeweils erste Station vorzustellen. Auch diese Herausforderung erfüllten die SchülerInnen mit Bravour.



Abbildung 2.14: Die Kinder der Grundschule Ottersleben probierten aus, wie man Nachrichten mit Hilfe eines Morse-Codes ausdrückt und konnten sich dann gegenseitig eine Nachricht schicken.

MINT-Experimente am Ferienmontag im Kinder- und Jugendhaus „Next Generation“¹²

Experimentierangebote für Kinder und Jugendliche gibt es an der Fakultät für Elektro- und Informationstechnik sehr häufig und meistens kommen die jungen Forscher*innen dafür an die Universität. Am Montag, den 10.02. gab es dagegen mal wieder eine externe MINT-Mitmachaktion, die als Ferienangebot im Kinder- und Jugendhaus „Next Generation“ in der Rogätzer Straße in der Alten Neustadt von Magdeburg stattfand. Das KJH „Next Generation“ ist der einzige Kinder- und Jugendclub dieser Art im gleichen Stadtteil der Universität, der Kindern und Jugendlichen in der Freizeit anbietet, gemeinsam etwas zu unternehmen und zu erleben.

Das Studienwerbungsteam der FEIT vertreten durch Mathias Magdowski und Detlef Baumecker sowie die Studierenden Lena, Kim und Florian bot vier verschiedene Experimentier-Stationen in vier verschiedenen Räumen an:

- Elektrobaukasten:** Auf einem Steckbrett konnten die Kinder eine einfache Schaltung zusammenbauen, die z. B. eine Melodie spielt oder einen kleinen Propeller fliegen lässt.
- Ozobot:** Dieser kleine Roboter fährt Linien entlang und lässt sich durch Farbmuster steuern. Die Jugendlichen malten verschiedene Parcours und ließen die Roboter rollen und tanzen (siehe Abbildung 2.15).
- Calliope mini:** Dieser einfach zu programmierende Mikrocontroller hat u. a. zwei Knöpfe und ein Display aus 25 kleinen Leuchten. Die Kinder programmieren die kleine Platine so, dass sie ein Herzsymbol oder ihren Namen anzeigte, oder eine kurze Melodie spielte.
- LEGO-Roboter** Die Jugendlichen programmierten einen Roboter-Wachhund Lego, der herum fuhr und zu bellen anfang, wenn er auf ein Hindernis stößt.

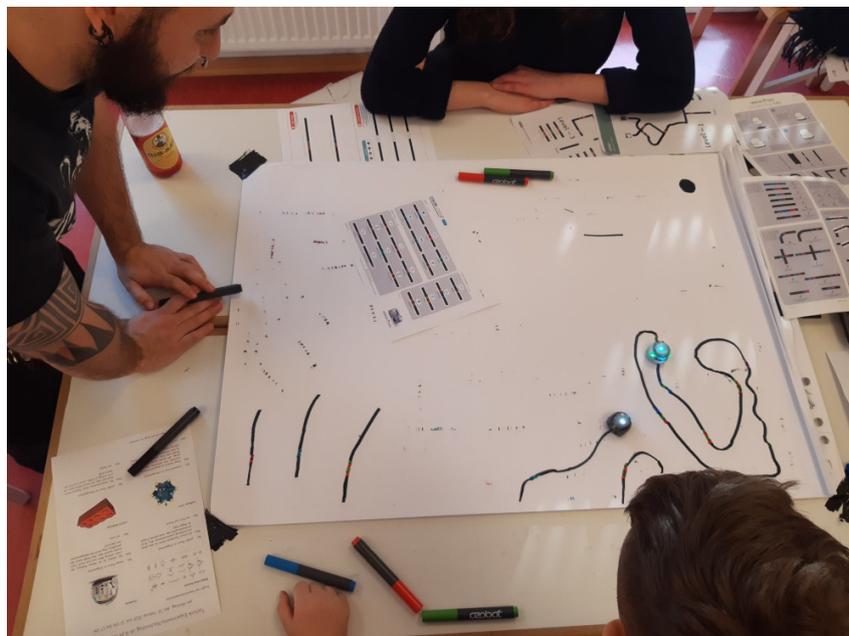


Abbildung 2.15: Die Teilnehmer*innen im Kinder- und Jugendhaus „Next Generation“ malten verschiedene Parcours für die kleinen Ozobots und ließen diese Roboter rollen und tanzen.

¹²von Dr.-Ing. Mathias Magdowski

Zwischen 15 Uhr und 17 Uhr experimentierten, programmierten, steuerten und bastelten insgesamt 15 Kinder und Jugendlichen in vier kleinen Gruppen nacheinander an allen Stationen, hatten dabei eine Menge Spaß und nahmen sicher auch die eine oder andere Erkenntnis mit, wo ihnen im Alltag sonst noch ähnliche Roboter, Platinen und Algorithmen begegnen.

Auch das Team des KJH war begeistert von den Experimenten und würde sich freuen, das MINT-Mitmachangebot z. B. in den nächsten Sommer- oder Winterferien erneut anbieten zu können.

MINT-Mitmachaktionen mit dem Domgymnasium, der Grundschule Schmeilstraße und dem Editha-Gymnasium¹³

In den drei letzten regulären Schultagen vor den pandemiebedingten Schulschließungen besuchten uns noch drei Schüler*innen-Gruppen zu Tagen der offenen Labortür bzw. MINT-Mitmachaktionen in der Experimentellen Fabrik.

Wir begrüßten dabei:

- 40 Schüler*innen der 10. Klassen des Domgymnasiums am Mittwoch, den 11. März,
- 27 Viertklässler*innen der Grundschule Schmeilstraße am Donnerstag, den 12. März, und
- 26 Schüler*innen einer 6. Klasse aus dem Edithagymnasium am Freitag, den 13. März.

Statt gemeinsam als große Gruppe im Klassenraum zu sitzen, experimentierten die Kinder und Jugendlichen in kleinen Gruppen von 3 bis 4 Personen an unterschiedlichen Stationen (siehe Abbildung 2.16). Vorher hieß es aber für alle: Hände gründlich waschen und desinfizieren.



Abbildung 2.16: MINT-Mitmachaktionen mit dem Domgymnasium am Mittwoch, den 11. März 2020

Experimentiert wurde dann an den erprobten Stationen mit dem Elektrobaukasten, den Ozobots, den Sphero-Robotern, den Calliope-mini-Platinen, den LEGO-Robotern, dem Möhrenklavier am Makey Makey, den ferngesteuerten Autos und ihren Funkwelleninterferenzen, den Morse-Geräten sowie dem Smartibot. Ein großer Dank geht dafür an Anne Marie, Johanna, Indri, Mahmoud,

¹³von Dr.-Ing. Mathias Magdowski

Marcus, Niklas und Thomas von der Fakultät für Elektrotechnik- und Informationstechnik sowie an unsere Schülerpraktikanten Janne, Philipp, Volodymyr und Caspar vom Werner-von-Siemens-Gymnasium für Zeigen und Erklären.

Neu dabei war auch eine Station von Lisa Pippirs vom intoMINT-Projekt, in der die gleichnamige Smartphone-App für die Schülerinnen des Domgymnasiums vorgestellt wurde.

Außerdem zum ersten Mal dabei war eine Station von Jana Görs von der Fakultät für Informatik, bei der die Grundschüler*innen der Grundschule Schmeilstraße kleine Roboter wie den Cubetto, den putzigen B-Bot oder den Dash so steuern und programmieren konnten, dass diese z. B. Weltraumschrott (dargestellt durch kleine Legosteine) aufsammeln und zu einem Satelliten bringen.

Eine weitere neue Station war das Elektroskalpell bzw. ein Elektrokoagulator, der sonst im „Krankenwagen der Zukunft“ des Medizintechnik-Forschungscampus STIMULATE ausprobiert werden kann. Mit einem solchen Instrument wird sonst menschliches Gewebe bei Operationen verklebt oder verödet, um z. B. kleine Blutungen zu stoppen. Das konnten die Schüler*innen des Editha-Gymnasium zusammen mit Katharina Bigalk ganz ungefährlich aber trotzdem eindrucksvoll mit Eiweiß und Schinken ausprobieren.

Malen mit „RoboPicasso“ im Freiraumlabor „Ein Herz für Magdeburg“¹⁴

Wie kreativ können Menschen und Roboter zusammen malen? Dazu packten wir für die Aktion mit dem Namen „RoboPicasso“ golfballgroße Roboter farbdicht ein, ließen diese erst durch Farbe und dann über große weiße Blätter fahren und freuten uns auf aufregende Zeichnungen (siehe Abbildung 2.17). Steuern konnte die Roboter im Rahmen des Projekts „Freiraumlabor – Ein Herz für Magdeburg“ jede*r von 3 bis 99 Jahren per Smartphone oder Tablet-PC.

Die Aktionen fanden an folgenden Terminen statt:

- Freitag, den 12.06.2020 ab 13:00 Uhr bis ca. 15:00 Uhr
- Samstag, den 13.06.2020 ab 11:30 Uhr bis ca. 13:30 Uhr
- Donnerstag, den 02.07.2020 ab 15:00 Uhr bis ca. 17:00 Uhr
- Freitag, den 03.07.2020 ab 21:00 Uhr bis ca. 23:00 Uhr

Die Aktion verbindet kreative Gestaltung und Techniksensibilisierung auf innovative Art und Weise. Zum Zeichnen nutzen wir Sphero-Roboter in Kugelform, die etwa so groß wie ein Tischtennisball sind, aber voller Technik stecken. Zwei Motoren, ein Akku, farbige LEDs und ein Fernsteuermodul ermöglichen den Sphero per Smartphone zu steuern. Wir packen die Roboter in eine wasser- und farbdichte Hülle und verwenden diesen als fahrbaren Farbroller bzw. Pinsel. Der Roboter fährt zunächst durch Farbe, nimmt diese an der Oberfläche auf und gibt sie beim Hinüberfahren über eine Leinwand wieder ab. Dadurch entstehen je nach Farbauswahl und Steuerung abstrakte, farbenfrohe und interessante Zeichnungen und Muster. Mitmachen können alle zwischen 3 und 99, die ein Smartphone in der Hand halten können und mal indirekt über einen Roboter etwas gestalten möchten.

Weitere Informationen gibt es auf der Facebook-Seite <https://www.facebook.com/robo.picasso> und auch bei Twitter unter dem Hashtag #RoboPicasso.

¹⁴von Dr.-Ing. Mathias Magdowski



Abbildung 2.17: Wie kreativ können Menschen und Roboter zusammen malen? Dazu packen wir für die Aktion mit dem Namen „RoboPicasso“ golfballgroße Roboter farbdicht ein, lassen diese erst durch Farbe und dann über große weiße Blätter fahren und freuen uns auf aufregende Zeichnungen.

RoboPainting bei den Kindermedientagen 2020¹⁵

Am 13. und 14. August 2020 fanden in Magdeburg die zweiten Kindermedientage des Verbands Junger Medienmacher im Medientreff Zone! am Universitätsplatz statt. Bei den Kindermedientagen können Kinder und Jugendliche selbst entscheiden, was sie ausprobieren und gestalten möchten und an beiden Tagen zwischen fünf Werkstätten auswählen.

Die vierte Werkstatt namens „RoboPainting“ wurde dabei von der Studienwerbungsgruppe der Fakultät für Elektro- und Informationstechnik mit kleinen Sphero-mini-Robotern unterstützt. In dieser Werkstatt bzw. in diesem Mitmachangebot konnten die Kinder und Jugendlichen die kleinen kugeligen Roboter so programmieren, dass sie mit Farbe auf einem großen Blatt malten und zeichneten (siehe Abbildung 2.18). Dabei konnte genau wie bei RoboPicasso im Freiraumlabor ausprobiert werden, wie kreativ Menschen und Maschinen zusammen gestalten können.

Die jeweils vier bis sechs Teilnehmer*innen hatten bei jedem der insgesamt vier angebotenen etwa dreistündigen Werkstätten auf jeden Fall viel Spaß und lernten nebenbei ein bisschen was über die nötige Technik für einen fahr- und fernsteuerbaren Roboter sowie die kleinen Tücken der Programmierung kennen. Außerdem entstanden sehr schöne Kunstwerke.

Da die Kindermedientage auch von Kindern und Jugendlichen selbst angeleitet werden, wurden von Thomas Schallschmidt und Mathias Magdowski vorher nur die Teamleiter*innen im Umgang mit den Robotern geschult. Das nötige Equipment wurde nachhaltig per Rollwagen zwischen der Universität und dem Medientreff Zone! transportiert. In den anderen Werkstätten ging es außerdem u. a. um Minecraft, Tanzvideos, Comics oder das Musikmachen aus städtischen Geräuschen.

¹⁵von Dr.-Ing. Mathias Magdowski

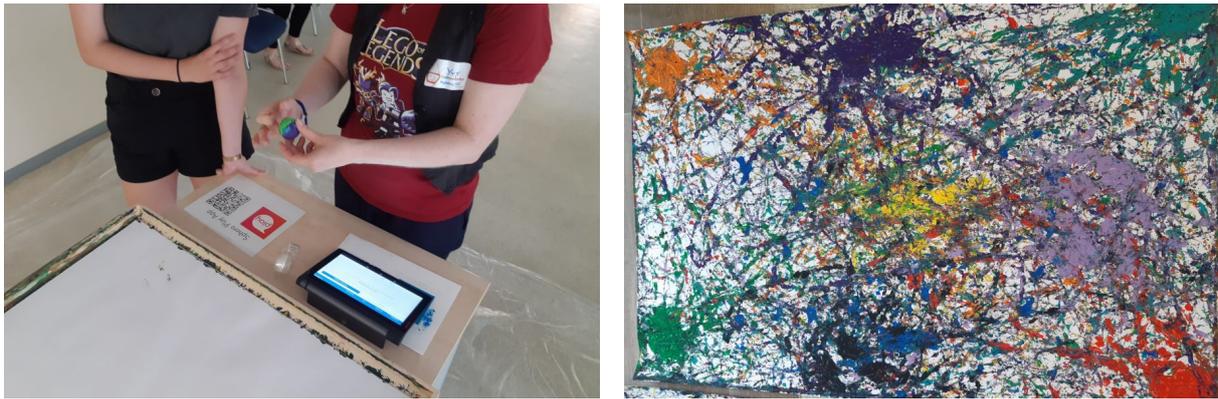


Abbildung 2.18: RoboPainting bei den Kindermedientagen 2020

UtopiaLab: Schaffe deine Zukunftsvision!¹⁶

Vom 17. bis 21. August 2020 fand im Kieztreff Salbke das UtopiaLab zum Thema „Zukunftsvisionen für eine kindgerechte Gestaltung des städtischen Raumes“ statt. In diesem Ferienworkshop beschäftigten sich 8 Kinder zwischen 9 und 12 Jahren mit den Themen Zukunftsforschung, „KIEZkunst“ und Robotik. Bei letzterem unterstützte die Studienwerbungsgruppe der Fakultät für Elektro- und Informationstechnik die Landesvereinigung kulturelle Kinder- und Jugendbildung Sachsen-Anhalt e.V. mit verschiedenen Mitmachstationen.

Im Vormittagsprogramm wurden Stationen zu Themenbereichen der Robotik angeboten. Bei der Sphero-Roboter-Station konnten die Kinder mithilfe von kleinen, kugelförmigen Robotern Kunstwerke entstehen lassen, indem sie sie mittels einer App über das Blatt mit Farbe gesteuert haben. Der Herausforderung, einen Roboter selber zu bauen, konnten sich die Kinder bei der Smartibot-Station stellen (siehe Abbildung 2.19a). Der entstandene Roboter war sogar in der Lage, eine Tasse Tee zu transportieren. Eine ganz andere Art der Programmierung konnten die Teilnehmer*innen bei der Ozobot-Station ausprobieren. Die Steuerung funktioniert nicht wie bei den anderen Robotern über eine App, sondern per Stift und Papier. Mit schwarzen Linien und Farbcodes konnten die Kinder die Fahrstrecke vorgeben und den Roboter bestimmte „Moves“ machen lassen (siehe Abbildung 2.19b). Ein besonders beliebtes Motiv war der eigene Vorname.



Abbildung 2.19: „UtopiaLab: Schaffe deine Zukunftsvision!“ im Kieztreff Salbke

Am Donnerstagnachmittag wurden Wasserraketen aus alten Flaschen und mit Sand gefüllten Tennisbällen gebaut und im Anschluss auf einer großen Wiese getestet. Die Begeisterung der

¹⁶ von Dr.-Ing. Mathias Magdowski

jungen Astronauten*innen war dabei so groß, dass die Raketen so oft gestartet wurden, bis sie nur noch aus Einzelteilen bestanden. Zum Abschluss des Workshops ist am Freitagnachmittag ein von allen Teilnehmer*innen und Betreuer*innen zusammen kreierte großes, buntes Sphero-Kunstwerk entstanden.

Den Kindern hat die Auseinandersetzung mit den verschiedenen Robotern und Themen sichtlich viel Spaß bereitet und hoffentlich ein weiterführendes Interesse geweckt. Der Transport der Materialien erfolgte auch wieder umweltschonend per Lastenfahrrad. Ein besonderer Dank geht auch an Melanie Kintz vom Gleichstellungsbüro für die Fotos.

Technik und Spaß beim KIEZKunstAktionstag der .lkj am Salbker Lesezeichen¹⁷

Als feierlichen Abschluss des UtopiaLabs in dem Kinder und Jugendliche Zukunftsvisionen für den Stadtteil Salbke im Süden Magdeburgs entwickelten und bei dem wir mit zwei Robotik-Workshop-Tagen aktiv waren, veranstaltete die Landesvereinigung Kulturelle Kinder- und Jugendbildung Sachsen-Anhalt e.V. (.lkj) einen KIEZKunstAktionstag am Salbker Lesezeichen. Dabei kamen Kinder, Jugendliche und Anwohner*innen aus dem Stadtgebiet Südost mit Magdeburger Künstler*innen zusammen, um an Mitmach-Stationen, in Workshop-Angeboten und bei Diskussionsrunden gemeinsam an Kunstwerken für eine Straßengalerie zu arbeiten.

Als „rollende Malmaschine“ war dabei unser RoboPicasso mit am Start, der erstmalig auf einer wirklich großen Fläche von etwa 2m mal 4m die bekannt farbenfrohen Bilder malte. Die farbdicht eingepackten Sphero-Roboter konnten dabei wieder von Aktionskünstler*innen aller Altersgruppen durch die Farbe und über das großformatige Papier gelenkt werden (siehe Abbildung 2.20). Als Malunterlage diente ein schon vorhandener Betonsockel im Zentrum des Salbker Lesezeichens, einem beliebten Treffpunkt im Stadtteil. Neben dem künstlerischen Wert der Bilder, die an Action-Painting- bzw. Drip-Painting-Werke des US-amerikanischen Künstlers Jackson Pollock erinnern, wurden natürlich auch der Aufbau und die zugrundeliegende Technik der Steuerung und Programmierung der kugelförmigen Sphero-Roboter ausgiebig diskutiert. Die entstandenen Kunstwerke wurden im Anschluss getrocknet und an die beteiligten jungen Künstler*innen und deren Eltern verteilt.



Abbildung 2.20: Technik und Spaß beim KIEZKunstAktionstag der .lkj am Salbker Lesezeichen

¹⁷ von Dr.-Ing. Mathias Magdowski

Neben dem Robo-Painting gab es weitere interessante Kunstformen wie Tape Art, Malerei, Metall- und Textilkunst sowie ein Moosgraffiti, die gemeinsam gestaltet und in der Straßengalerie rund ums Salbker Lesezeichen sichtbar gemacht wurden. Passend zum Nachhaltigkeitsaspekt der entwickelten Zukunftsutopien wurde das nötige Equipment vom OVGU-Campus umweltfreundlich mit einem Lastenrad transportiert, das freundlicherweise vom Institut für Logistik und Materialflusstechnik zur Verfügung gestellt wurde.

Erfolgreicher Online-Workshop „Ich leuchte mit meiner Diode“ zum intoMINT-Abschluss¹⁸

Die etwa seit September 2019 verfügbare intoMINT-App richtet sich an Mädchen zwischen der 8. Klasse und der 13. Klasse. Technikaffine Schülerinnen und die, die es noch werden möchten, finden dort kleine Experimente zum Mit- und Nachmachen, Hintergrundinformationen zum MINT-Bereich – also Mathe, Informatik, Naturwissenschaften und Technik sowie zugehörige Berufsinformationen. Eigene Talente sollen erkannt und dazu passende interessante Tätigkeitsfelder vorgestellt werden, wobei der Spaß im Vordergrund steht. Das dahinterstehende Projekt intoMINT 4.0 ist ein vom BMBF gefördertes Verbundprojekt der Hochschule Anhalt sowie der Koordinierungsstelle Genderforschung und Chancengleichheit der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.

Zum einjährigen Jubiläum und diesjährigen Abschluss war ein großer Workshoptag mit den regelmäßigen Nutzerinnen der intoMINT-App geplant, der aufgrund der Umstände natürlich online stattfinden musste. Als Angebot der Fakultät für Elektro- und Informationstechnik bot Mathias Magdowski einen Online-Workshop mit dem Titel „Ich leuchte mit meiner Diode“ an. Dafür wurden 25 kleine Workshop-Kits zusammengestellt, die von Magdeburg per Post nach Köthen und von dort weiter zu den teilnehmenden Mädchen nach Hause geschickt wurden. Jedes Set enthielt mehrere Leuchtdioden mit Vorwiderstand in unterschiedlichen Farben, kurze Kabelstückchen, eine Batterie mit Batterieklemme und ein Steckbrettchen.

Nach einer kleinen Technikprobe am 10. September in Magdeburg fand der richtige Workshop dann am Samstag, den 26. September in Köthen in zwei Durchläufen statt. Unter fachkundiger Anleitung bauten die jeweils acht Mädchen verschiedene kleine Schaltungen auf und konnten damit z. B. testen, welche Materialien den elektrischen Strom leiten und damit die Diode zum Leuchten bringen (siehe Abbildung 2.21). Das Experimentierset konnten die Mädchen dann zum weiteren Experimentieren behalten. Die Fernbetreuung und das gemeinsame Elektronikbasteln per Zoom-Videokonferenz funktionierten dabei erstaunlich flüssig, auch dank der optimalen Unterstützung durch die Ko-Moderatorin Michaela Froberg vom Gendercampus.

In weiteren Online-Workshops wie z. B. „Prickelspaß im Probeglas“ konnten die Mädchen einfache chemische Analyseverfahren testen, Berufschancen mit dem Career Service der OVGU diskutieren, Grundlagen der MP3-Codierung ausprobieren oder mit der Programmiersprache Unity ein einfaches Spiel programmieren.

Magdeburg 2025 – RoboPicasso beim Live City Visit¹⁹

Die Stadt Magdeburg gehörte mit zu den letzten aussichtsreichen Kandidaten für die Bewerbung zur Kulturhauptstadt Europas im Jahr 2025. Im Rahmen der finalen Entscheidung fand am 21.10.2020 ein virtueller Live City Visit statt, in dem einer internationalen Jury die Stadt Magdeburg mit ihren vielen Möglichkeiten und Facetten bestmöglich präsentiert werden sollte.

¹⁸ von Dr.-Ing. Mathias Magdowski

¹⁹ von Dr.-Ing. Thomas Schallschmidt

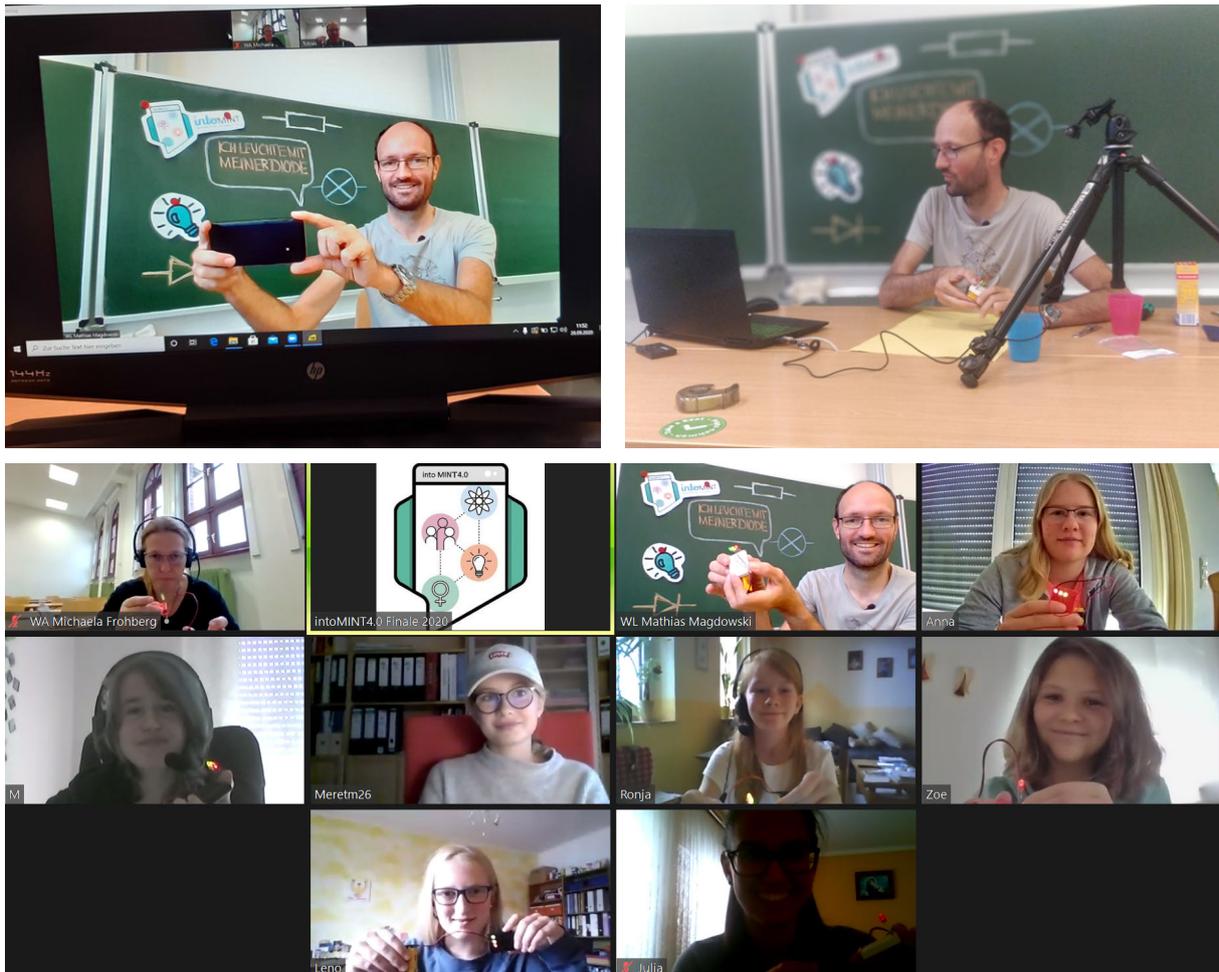


Abbildung 2.21: Erfolgreicher Online-Workshop „Ich leuchte mit meiner Diode“ zum intoMINT-Abschluss

Als ein Beitrag der Otto-von-Guericke Universität Magdeburg war auch die #RoboPicasso-Aktion der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik mit von der Partie. Die Möglichkeiten mit Hilfe eines appgesteuerten Roboters aus Abbildung 2.22 Bilder zu gestalten, hatten ja schon im Rahmen des Freiraumlabor und des KIEZKunstAktionstag der .lkj für viel positive Resonanz gesorgt und fanden auch bei den Organisator*innen für Magdeburg 2025 großen Anklang.



Abbildung 2.22: Sphero-Roboter im „Malermodus“

Diesmal gestalteten die beiden jungen Schülerinnen Hannah und Fina farbenfrohe Bilder auf einer Fläche von ca. 3 m × 2 m mit Hilfe der golfballgroßen Sphero-Roboter. Der vor Beginn zusätzlich aufgebrachte bzw. abgeklebte Bewerbungs-Slogan, konnte zum Abschluss wieder sichtbar gemacht werden und das entstandene Bild (siehe Abbildung: 2.23) war gleich Bestandteil der Abmoderation.

Auch wenn es diesmal für Magdeburg leider nicht gereicht hat, so sollen die Malroboter getreu dem neuen Motto #weiterMachen Kinder und Jugendliche in vielen noch kommenden Aktionen weiter spielerisch für Technik begeistern.

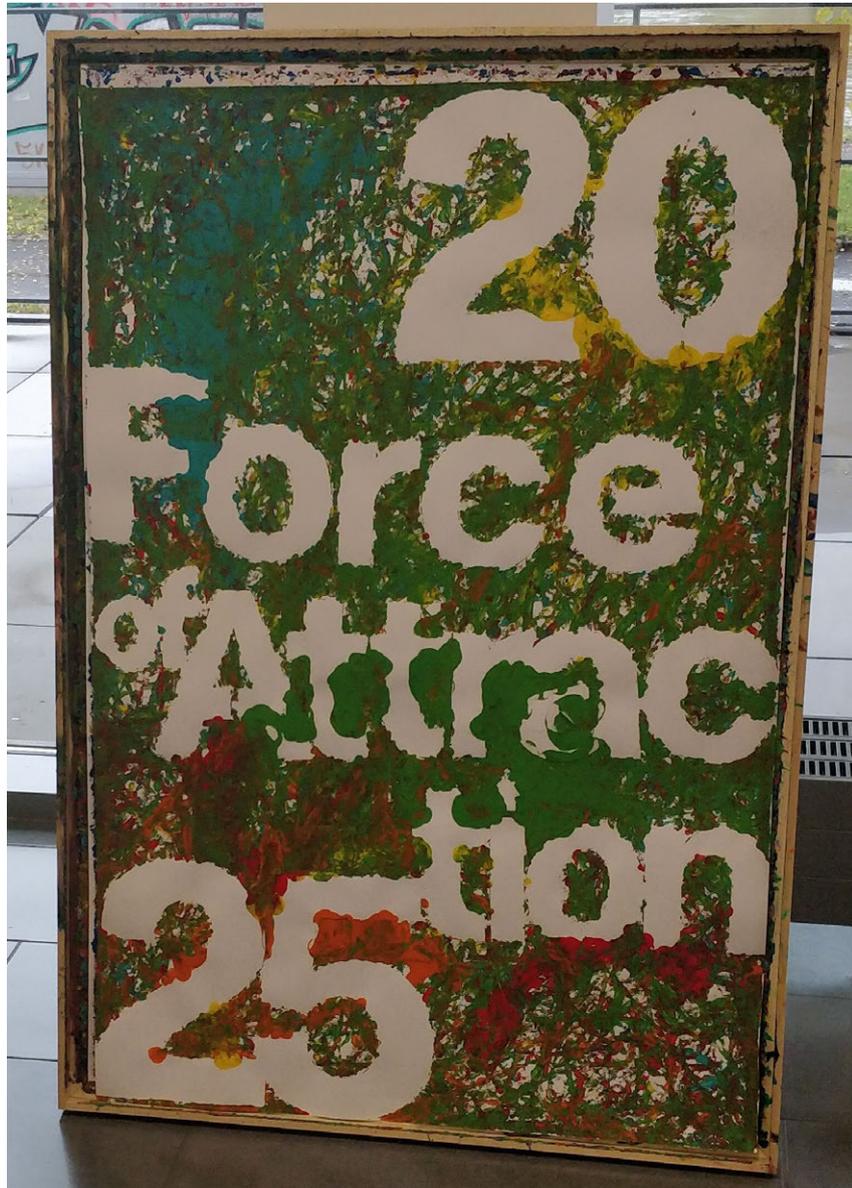


Abbildung 2.23: Abschlussbild mit dem Slogan der Bewerbung

3 Forschung

3.1 Lehrstuhl für Elektrische Antriebssysteme

3.1.1 Forschungsprofil

Inhalte

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

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

Schwerpunkte

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

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

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

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

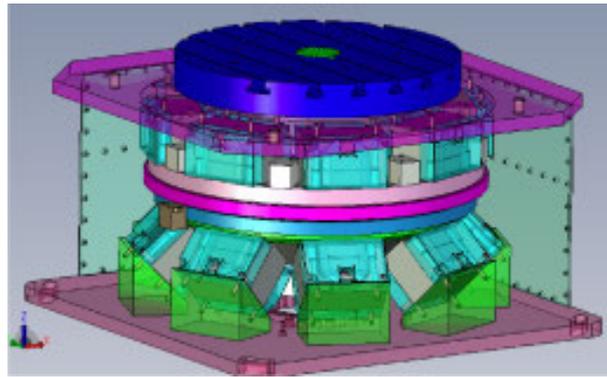


Abbildung 3.1: Magnetisch gelagerter Rundtisch

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

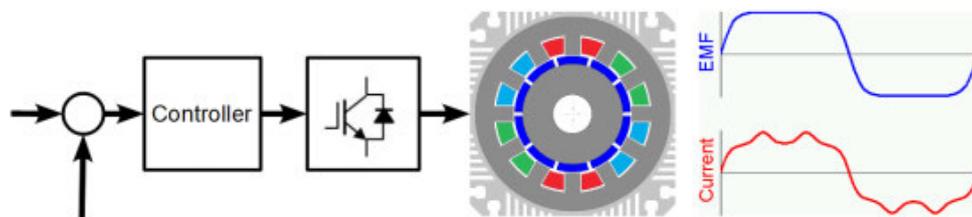


Abbildung 3.2: Regelung von Maschinen nicht sinusförmiger elektromotorischer Kraft

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

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

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

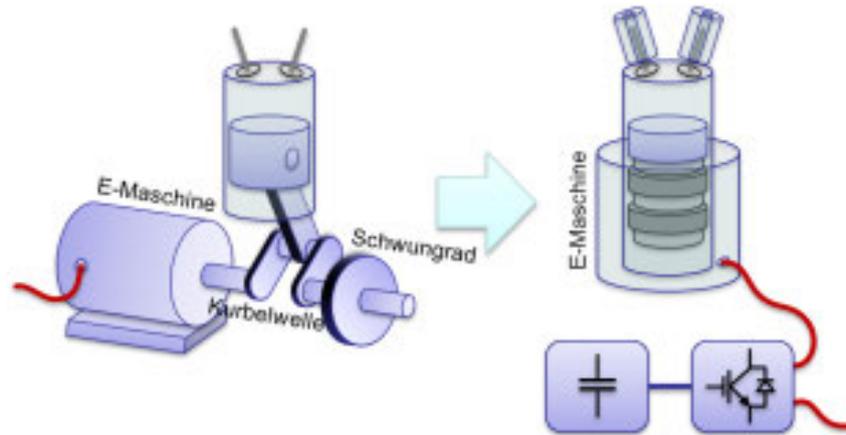


Abbildung 3.3: Einsatz von elektrischen Linearmaschinen bei Verbrennungsmotoren

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

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

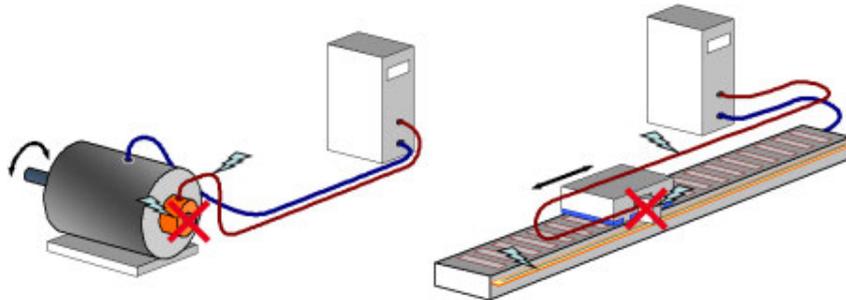


Abbildung 3.4: Sensorlose Regelung elektrischer Maschinen

3.1.2 Forschungsprojekte

Efficient Motion Control of a PMSM and Design of a Mechanic Energy Storage for a Four Stroke Free Piston Engine ¹

The free piston engine Fig. 3.5 is a certain kind of internal combustion engine which is able to convert the chemically stored energy (e.g. fuel) into mechanical energy without a crank shaft. The mechanical energy can then be directly converted into electrical energy using an electric linear machine. The conversion of mechanical into electrical takes place in the expansion stroke. In the other strokes electrical energy has to be used to realize the four stroke process. The additional degree of freedom, gained by omitting the transformation in rotary motion, allows the

¹Authors: Dipl.-Ing. Andreas Gerlach, M. Sc. Sebastian Benecke, Prof. Dr.-Ing. Hermann Rottengruber and Prof. Dr.-Ing. Roberto Leidhold

trajectory to be adjusted but there is a frequent conversion between mechanical and electrical energy resulting in increased copper losses. To relieve the electrical machine, it is possible to temporarily store the mechanical energy in a spring. The spring must be optimized depending on a trajectory and a load. The optimized spring was installed and tested in the prototype shown in Fig. 3.5. The measurement results are shown in Fig. 3.6.

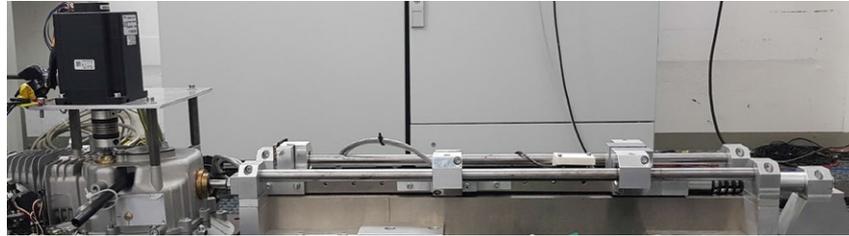


Figure 3.5: Four stroke free piston engine

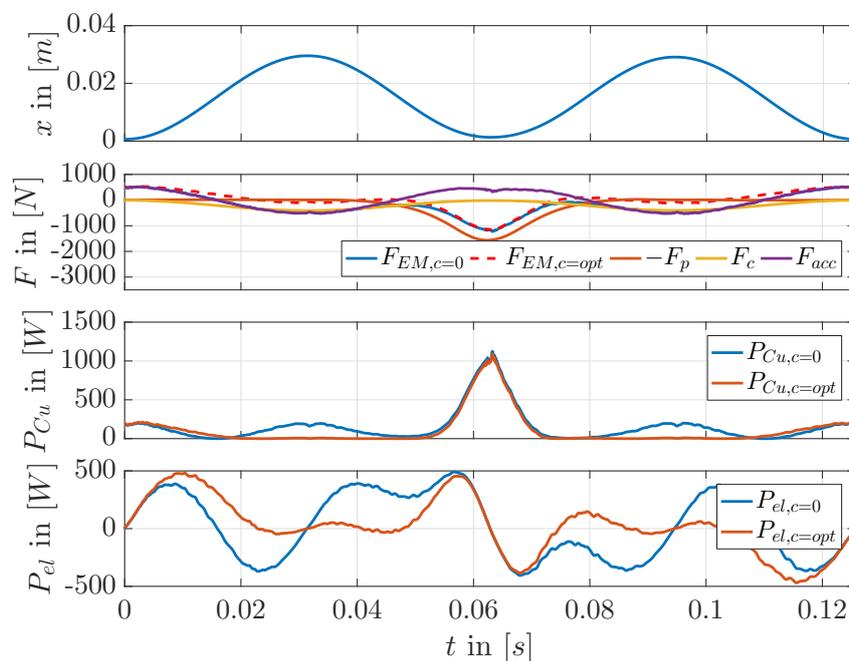


Figure 3.6: Force and power balance over a four stroke cycle with and without spring

It shows the power P , force F and position x depending on the time t . The system must compensate the gas force F_p and the acceleration force F_{acc} during the four stroke cycle. It can be seen that the spring force F_c can be used to relieve the electrical machine (compare $F_{EM,c=0}$ and $F_{EM,c=opt}$). This leads to lower copper losses P_{Cu} and thus to a lower power requirement P_{el} than when no spring is used.

SMELA GmbH – Smart Electric Actuators, Eine Ausgründung des Lehrstuhls für elektrische Antriebssysteme²

Das Problem und aktueller Stand der Technik Über Jahrzehnte hinweg waren pneumatische und hydraulische Antriebslösungen für Ingenieure die erste Wahl, wenn es darum ging, schnelle Bewegungen durchzuführen, große Kräfte zu erzeugen oder hohe Lasten zu bewegen. Mittlerweile haben sowohl Pneumatik-, als auch Hydrauliksysteme einen starken Konkurrenten aus der

²von M. Sc. Benjamin Horn

Welt der Lineartechnik bekommen: den elektromechanischen Aktuator. Diese bieten in vielen Anwendungen zahlreiche Vorteile gegenüber den medienbehafteten Antrieben: Sie sind leichter zu regeln, energiesparend und kommen dank des direkt angeschlossenen Antriebsmotors ohne platz- und wartungsaufwendige Kompressoren, Pumpen, Tanks, Rohrleitungen und Filter aus. Da sie kein Medium zum Übertragen der Kräfte benötigen, bieten sie auch Vorteile in puncto Sicherheit und Umweltverträglichkeit: Ein Brandrisiko oder die Gefahr einer Kontaminierung und Beschädigung aufgrund von Öl-Leckagen bestehen nicht. Elektrisch betätigte Aktuatoren arbeiten zudem geräuschärmer als bisher gebräuchliche Lösungen. Darüber hinaus bieten elektromechanische Systeme auch erhebliche Leistungsvorteile. Sie weisen ein breiteres Geschwindigkeits- und Leistungsspektrum auf und ermöglichen eine höhere Positioniergenauigkeit (siehe Abbildung 3.7). Eine temperaturabhängige Viskosität von Hydrauliköl oder die Luftdichte spielen bei elektromechanischen Systemen keine Rolle, weshalb sie stets innerhalb präziser Toleranzen arbeiten.

Bei all diesen überzeugenden Vorteilen scheinen elektromechanische Aktuatoren dennoch einen Schwachpunkt zu haben: höhere Kosten für die Erstbeschaffung. In der Vergangenheit reichte diese Tatsache oft aus, um den Einsatz elektromechanischer Lösungen in bestimmten Anwendungen von vornherein auszuschließen. Allerdings bieten elektromechanische Antriebe über die gesamte Nutzungsdauer gesehen große Einsparmöglichkeiten, welche die höheren Anschaffungskosten weit übersteigen.

Die bisherigen elektromechanischen Aktuatoren nutzen eine serielle Verschaltung von elektrischen und mechanischen Standardkomponenten. Dies erfordert einen erheblichen Bauraum in den Anlagen. Lineardirektmotoren, welche auf eine Mechanik verzichten und die Kraft rein elektromagnetisch aufbringen, benötigen hingegen eine große elektromagnetische Interaktionsfläche und dadurch ebenfalls ein Vielfaches an Bauraum.



Abbildung 3.7: Die erste Pilotserie befindet sich seit Ende 2019 im Kundeneinsatz.

Die Smela-Lösung Smela-Linearaktuatoren stellen ein ganzheitlich optimiertes mechatronisches System dar, bestehend aus einer elektrischen Maschine, der Mechanik, integrierter Sensorik, einer Steuerelektronik und intelligenten Regelalgorithmen. Die teleskopierbare Anordnung der zueinander coaxial liegenden mechanischen und elektrischen Komponenten erlaubt eine Integration des Stößels im Aktuator ohne Abstriche von Motorleistung und Kraft. Somit wird ein sehr günstiges Verhältnis des Fahrweges zur Gesamtlänge bewirkt. Sämtliche Komponenten des Systems sind optimiert und aufeinander abgestimmt.

Diese zum Patent angemeldete teleskopierbare Konstruktion ermöglicht damit den Bau von Aktuatoren, welche bis zu 85 % kompakter als bisherige Alternativen sind und zudem mehr als

75 % der Energiekosten gegenüber Pneumatik einsparen können.

Der unkonventionelle Ansatz bildet nicht nur die Grundlage zum Bau der kompaktesten, sondern auch zum Bau einer kostengünstigen und nachhaltigen Pneumatik-Alternative, denn die verwendeten Mechaniken bestehen aus Hochleistungskunststoffen, welche um Faktor 10 günstiger als die herkömmlich verwendeten Kugelumlaufspindeln sind. Dabei leisten die SMELA Aktuatoren im Dauerbelastungstest (siehe Abbildung 3.8) bereits Zykluszahlen im Bereich der Pneumatikzylinder (> 10 Mio. Doppelhübe). Ein Verschleiß der Mechanik kann über die Regelung kompensiert und eine bevorstehende Wartung über die Steuerung angekündigt werden (Predictive Maintenance, I4.0). Infolge kann die Mechanik über ein Refurbishment-Service sehr einfach und kostengünstig ausgetauscht und dem Produkt zu mehreren Lebenszyklen verholfen werden. Damit schont das patentierte nachhaltige Produktdesign nicht nur wertvolle Ressourcen, sondern reduziert auch Industrieschrott und wirkt politischen Forderungen zur Ressourcen- und Energieeinsparung entgegen.



Abbildung 3.8: Belastungsstand. Der unten angeflanschte SMELA-Aktuator hebt je nach Leistungsklasse bis zu 30 kg, 65 kg oder 80 kg.

Weitere Infos unter <https://www.smela.com/>.

Analyse und Kompensation von End-Effekten für verbesserte Kraftregelung von Linearmaschinen ³

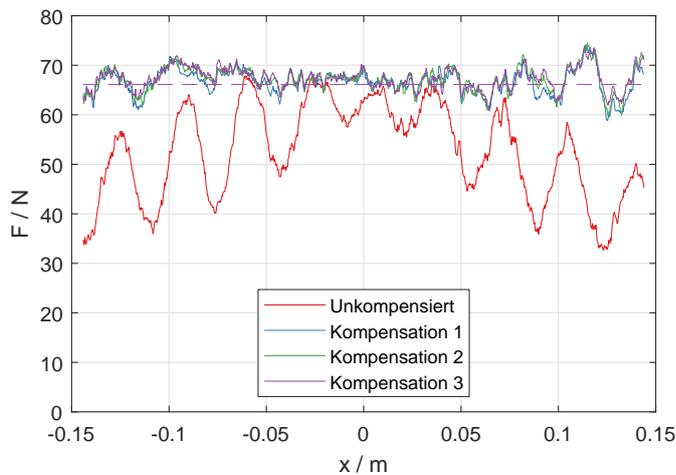
Bei der Regelung von Permanentmagnet-erregten elektrischen Maschinen wird grundsätzlich davon ausgegangen, dass der in den Statorspulen verkettete magnetische Fluss einer Sinusform folgt. Dass diese Annahme in vielen Fällen nicht erfüllt wird, wurde bereits in vielen experimentellen Versuchen belegt, was sich als Welligkeit in dem Drehmoment oder der Kraft des Antriebs niederschlägt. Besonders deutlich ist dies bei Linearmaschinen, die aufgrund der endlichen Länge des Stators und des Läufers stets mit Endeffekten behaftet sind, welche das ideal periodische Verhalten bei der Bewegung der Maschine unterbrechen.

Im Rahmen dieses Projektes wurde im speziellen die Auswirkung dieser Endeffekte auf die Flussverkettung untersucht. Zuerst wurde in einer Simulation die genauer Form des magnetischen

³von M. Sc. Sebastian Benecke, Dipl.-Ing. Andreas Gerlach und Prof. Dr.-Ing. Roberto Leidhold

Flusses in den einzelnen Phasen einer Maschine untersucht, wo der Läufer während der Bewegung einige Statorabschnitte nicht mehr abdeckt. Da in diesem Fall die aufgedeckten Phasen weniger zur Kraft beitragen können, wurde analytisch die optimale Stromverteilung berechnet, mit der eine konstante Kraft bereitgestellt werden kann. Auf Grundlage dieser Berechnung wurden verschiedene Kompensationsmethoden mit unterschiedlichem Aufwand und Nutzen entwickelt, die effektiv in die Ansteuerung der elektrischen Maschine eingebettet werden können.

Diese Kompensationsmethoden wurden auf einem Versuchsstand umgesetzt und validiert. Die Reduktion sowohl der Kraftwelligkeit (siehe Abbildung 3.9a) als auch des Strombedarfs gegenüber der konventionellen Ansteuerung konnte bestätigt werden. In weiteren Arbeiten kann die Kompensation für den Betrieb eines neuen Prototyps (siehe Abbildung 3.9b) eingesetzt werden, der speziell für eine periodische Bewegung optimiert wurde, wobei die Federwirkung der Reluktanzkraft, welche aufgrund der Endeffekte auftritt, ausgenutzt wird.



(a) Vergleich der Maschinenkraft mit und ohne Kompensation



(b) Linearmaschinen-Prototyp

Abbildung 3.9: Ergebnis der End-Effekt-Kompensationen und der Linearmaschinen-Prototyp, welcher mit Hinblick auf End-Effekte ausgelegt wurde.

Forschungsprojekt Ringsegmentgenerator (RING-GEN)⁴

Im Rahmen des Forschungsprojektes RING-GEN wird am Lehrstuhl für elektrische Antriebssysteme in Zusammenarbeit mit den mittelständischen Unternehmen Gräber Feinwerktechnik GmbH und Hesseland GmbH ein Ringsegmentgenerator für ein Klappschaufelwasserrad (siehe Abbildung 3.10) entwickelt. Die Entwicklung, die Auslegung und die Tests des Labormusters erfolgen auf Seiten des Lehrstuhls, während die Konstruktion, die Prototypenfertigung und die Integration des Generators in die Anlage von den externen Projektpartnern übernommen wird. Das Ziel dieser Zusammenarbeit ist es, einen möglichst energieeffizienten und skalierbaren Generator-Prototyp zu fertigen, der eine grundlastfähige regenerative Energieerzeugung durch Wasserkraft ermöglicht.

Während der Projektlaufzeit vom 01.01.19 bis 30.06.21 wurden im Projekt bereits folgende Meilensteine bearbeitet:

- Auswahl und Bewertung einer optimalen Konstruktionsvariante
- Optimierung der Generatorauslegung und -konstruktion
- Fertigung eines Labormusters als Linearmaschine in Dimension des späteren Prototyps

⁴von Dr.-Ing. Mario Stamann

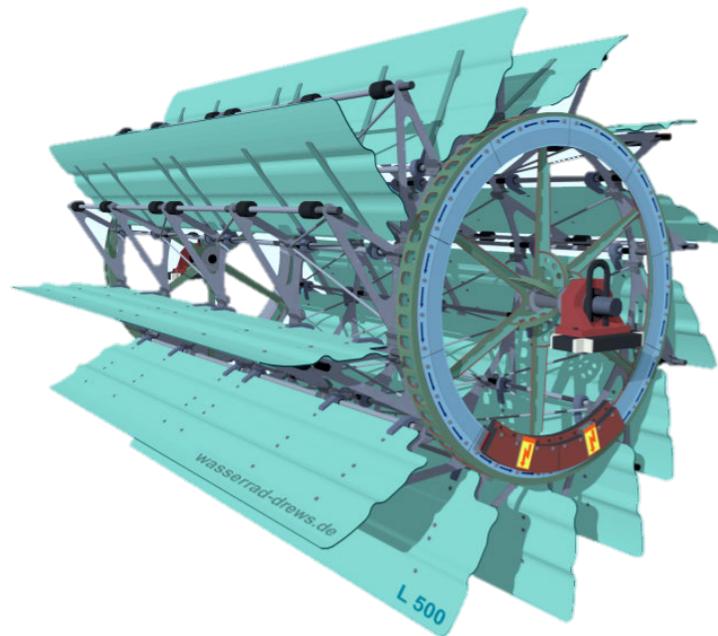


Abbildung 3.10: Drew'sches Klappschaufelwasserrad mit integriertem Ringsegmentgenerator

- Inbetriebnahme der elektrischen Komponenten und Labormustertest
- Auswertung der Ergebnisse und Optimierung der Prototypenauslegung

Zum Projektstart wurde eine bestehende Versuchsanlage mit Ringsegmentgenerator (siehe Abbildung 3.11) als Ausgangspunkt messtechnisch untersucht, um Schwachstellen zu erkennen und Optimierungsmöglichkeiten abzuleiten, die im laufenden Projekt für die Entwicklung einer neuartigen Generatorkonstruktion Berücksichtigung finden sollen.

Das Hauptproblem der freiliegenden Permanentmagnete des Rotors bzw. des Radkranzes mit einem Durchmesser von ca. zwei Metern ist die unvermeidliche Anhaftung von magnetisch leitenden Stoffen aus der Umgebung am Rotorkranz. Die Kapselung der Magnete im Rotor ist kostenintensiv, vergrößert den minimal möglichen Luftspalt und löst die Problematik nur unzureichend. Abhilfe schafft eine neuartige Generatorkonstruktion in Segmentbauweise als flussgeschaltete permanenterreichte Synchronmaschine, bei der sich die Permanentmagnete im Stator befinden. Abbildung 3.12 zeigt das Simulationsmodell in Linearanordnung und die zugehörige Wicklungsverschaltung und Magnetanordnung.

Mit dieser Konstruktionsvariante ist es möglich weniger und auch kostengünstigere Ferritmagnete mit einer Remanenz von ca. $0,4T$ einzusetzen. Nachteilig wirken sich jedoch die höheren Rastkräfte aus, die bei Bedarf durch eine angepasste Ansteuerung der Maschine im Wechselrichterbetrieb reduzierbar sind. Ein Labormuster in Linearanordnung (siehe Abbildung 3.13) dient dazu einen Funktionsnachweis zu erhalten, die Simulationsergebnisse zu verifizieren und weitere Optimierungsmöglichkeiten für den Prototyp abzuleiten.

Als Messergebnis ist in Abbildung 3.14 beispielsweise der Rastkraftverlauf des Labormusters dargestellt, der die Simulationsergebnisse mit guter Genauigkeit belegt. Kraftverlauf und Sättigungsverhalten weichen ebenfalls nur wenig von den Simulationsergebnissen ab, sodass sich eine korrekte Auslegung des Generators bestätigt.

Die Messungen zeigen aber auch, dass die mechanischen Verluste durch die Rollenführungen deutlichen Einfluss auf den Wirkungsgrad haben. Dies liegt hauptsächlich an der niedrigen Verfahrgeschwindigkeit und der dadurch relativ kleinen elektrischen Nutzleistung des Generators.

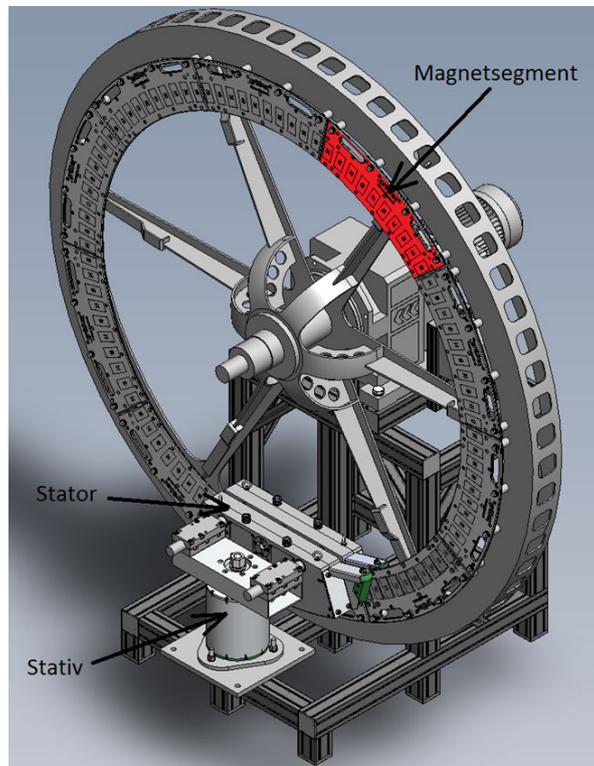


Abbildung 3.11: Versuchsstand mit Ringsegmentgenerator

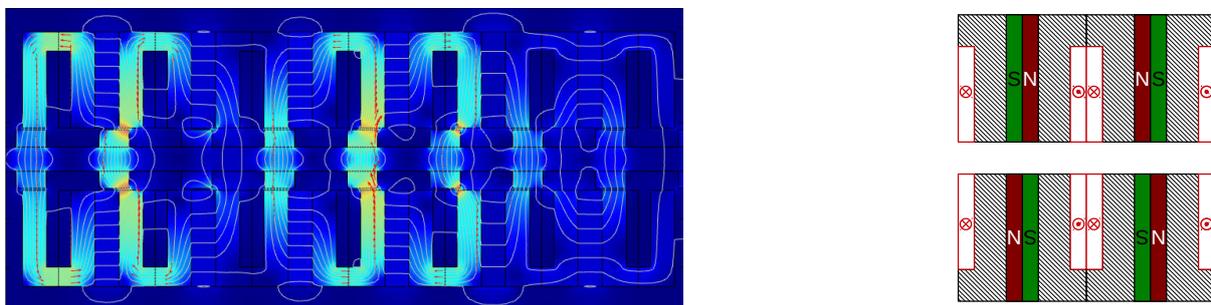


Abbildung 3.12: Finite-Elemente-Simulationsmodell der flussgeschalteten permanentenerregten Synchronmaschine mit Wicklungsverschaltung und Magnetanordnung

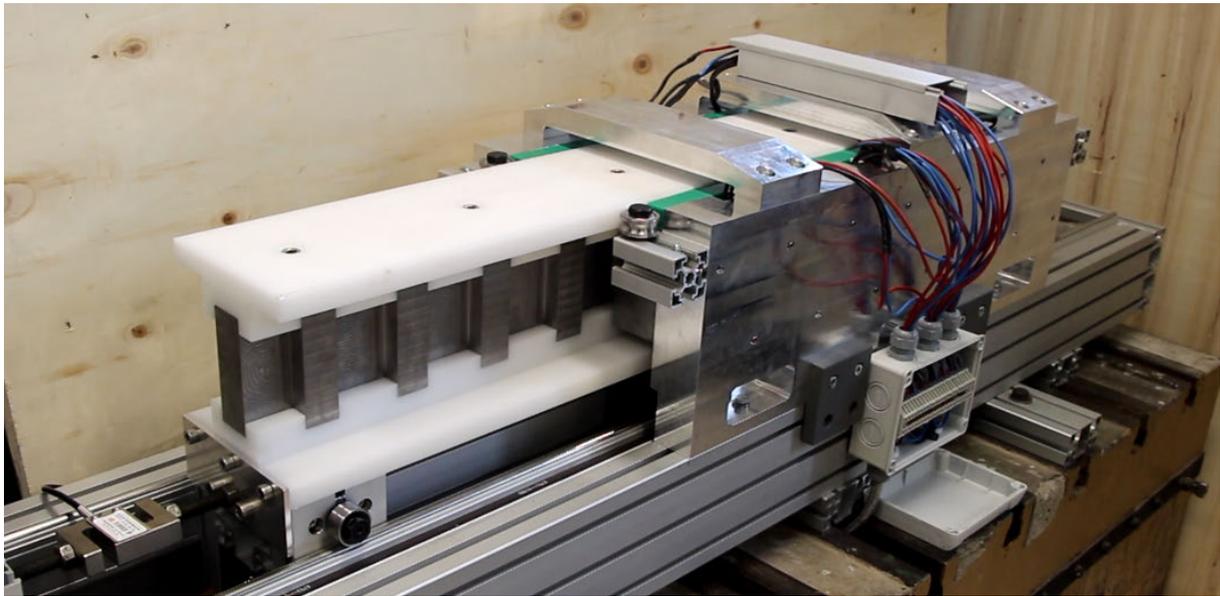


Abbildung 3.13: Labormuster zur Verifikation der Simulationsergebnisse und Erbringung des Funktionsnachweises

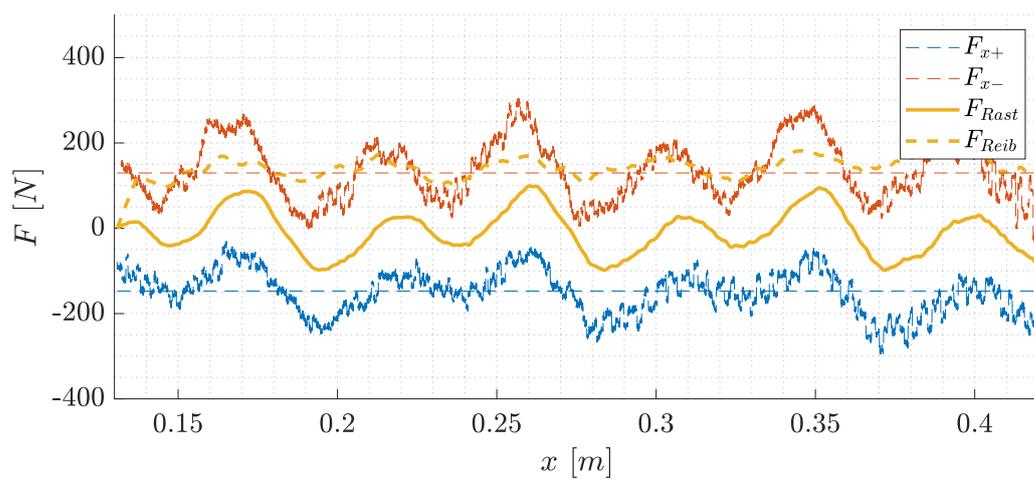


Abbildung 3.14: Gemessener Rastkraftverlauf des Labormusters

Bei einer Verfahrgeschwindigkeit von $0,6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ergibt sich eine mechanische Verlustleistung in den Rollenführungen von ca. 75 W bis 90 W.

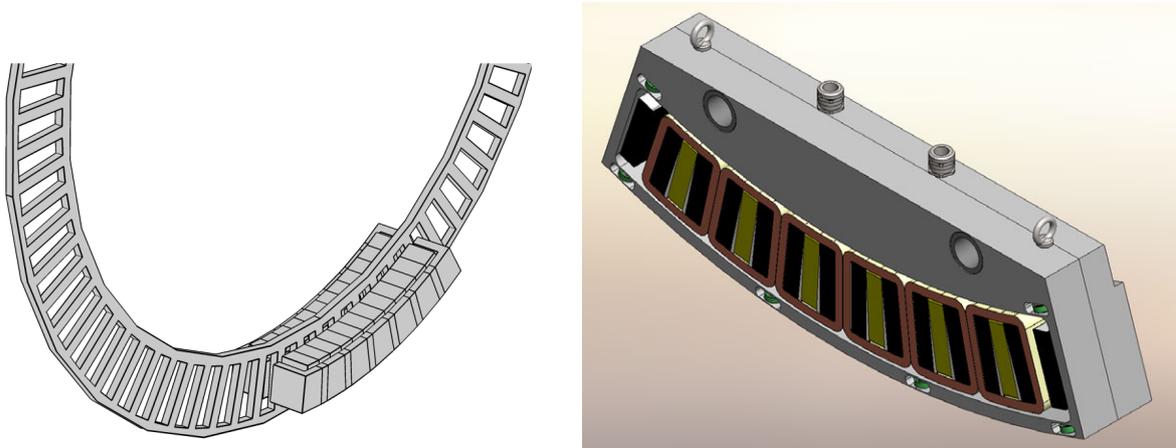


Abbildung 3.15: Konstruktionszeichnungen des Prinzips Ringsegmentgenerator (links) und einer Statorhälfte des Prototypen (rechts)

Zum derzeitigen Projektstand erfolgt die Konstruktion und Fertigung des Prototypen, der vorerst auf der Versuchsanlage in Abbildung 3.11 in Betrieb genommen werden soll. Die Konstruktionszeichnungen in Abbildung 3.15 zeigen den Aufbau der Ringsegmentmaschine. Anstelle der Rotorverzahnung ist die Fertigung eines Rotor mit Öffnungen und Flussleitstegen geplant, wodurch sich eine erhebliche Gewichtsersparnis ohne Beeinträchtigung des Maschinenwirkungsgrades ergibt.

3.1.3 Promotionen

In diesem Jahr wurden am Lehrstuhl für Elektrische Antriebssysteme keine Doktorand*innen promoviert.

3.1.4 Veröffentlichungen

Zeitschriften- und Konferenzbeiträge

- [1] A. Gerlach, F. Haeseler, H. Rottengruber und R. Leidhold, „Nonlinear power control of an internal combustion engine without throttle actuator“, *IEEE transactions on control systems technology*, 2020. DOI: 10.1109/TCST.2020.3011263.
- [2] Z. Zhao und R. Leidhold, „Common-mode current reduction pwm technique optimized for four-wire inverter-fed motors“, in *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC, New Orleans,*, 2020. DOI: 10.1109/APEC39645.2020.9124386.
- [3] S. Benecke, A. Gerlach und R. Leidhold, „Design principle for linear electrical machines to minimize power loss in periodic motions“, *IEEE transactions on industry applications*, 2020. DOI: 10.1109/TIA.2020.3005372.
- [4] A. Gerlach, S. Benecke, H. Rottengruber und R. Leidhold, „Efficient motion control of a pmsm and design of a mechanic energy storage for a four stroke free piston engine“, *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo*, 2020. DOI: 10.1109/ITEC48692.2020.9161742.

- [5] A. Kiselev, G. R. Catuogno, A. Kuznietsov und R. Leidhold, „Finite control set mpc for open-phase fault tolerant control of synchronous reluctance motor“, in *2020 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT): Buenos Aires*, 2020. DOI: 10.1109/ICIT45562.2020.9067220.
- [6] P. M. Barrera, G. R. Bossio, S. Hieke und R. Leidhold, „Synrm saliencies evaluation for rotor position estimation“, in *2020 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT): Buenos Aires*, 2020. DOI: 10.1109/ICIT45562.2020.9067106.
- [7] S. Benecke, A. Gerlach und R. Leidhold, „Analysis and Compensation of End Effects for Improved Force Control of Linear Machines“, in *XXIVth International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2020.

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

SmartMES ⁵

Am 01.01.2017 startete an der Otto-von-Guericke-Universität das Forschungsprojekt *SmartMES* (Intelligentes Multi-Energie-System). Das Projekt wird vom Landesministerium für Wirtschaft, Wissenschaft und Digitalisierung des Landes Sachsen-Anhalt über Mittel des Europäischen Fonds

⁵von M. Sc. Christian Klabunde

für regionale Entwicklung (EFRE) gefördert. Innerhalb des Projektes entwickeln die wissenschaftlichen Mitarbeiter der Universität in Zusammenarbeit mit regionalen Unternehmen und Forschungseinrichtungen, namentlich die ABO Wind AG, das Fraunhofer IFF und die Stadtwerke Burg Energienetze GmbH, neue Konzepte und Ideen für eine umfangreiche Sektorenkopplung.

Im Jahr 2020 wurde das Projekt SmartMES offiziell abgeschlossen. Im Rahmen des Projektes wurden Simulationstools für die Infrastrukturen Strom-, Gas- und Wärmenetz sowie Modelle von Kopplungstechnologien zwischen diesen Netzen entwickelt. Darauf aufbauend wurde ein Energy Hub Modell (siehe Abbildung 3.16) aufgebaut. Dieses erlaubt eine technische, ökonomische und ökologische Bewertung unterschiedlicher Anwendungsmöglichkeiten der Sektorenkopplung. Um die Projektergebnisse, z. B. im Rahmen der OVGU-Campustage, der Öffentlichkeit vorzustellen, wurden darüber hinaus unterschiedliche Demonstrationsanlagen aufgebaut.

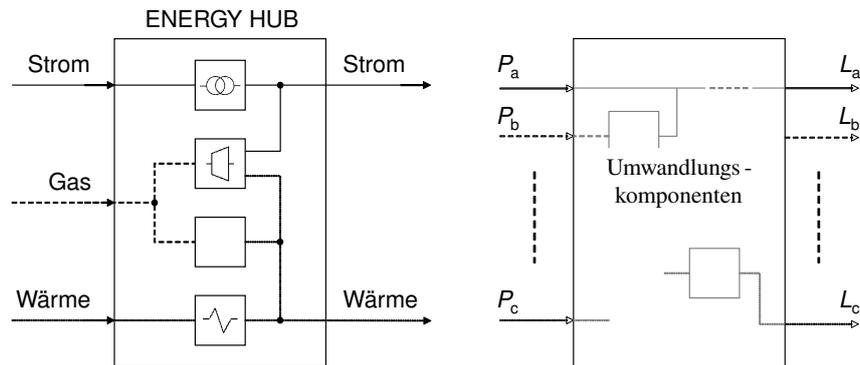


Abbildung 3.16: Schematische Darstellung eines Energy Hub

Netzleitwarte ⁶

Der Netzleitstand des Lehrstuhls ist einer der „Besuchbaren Orte“ des Projektes *WindNODE*. Im Rahmen dessen können sich Interessierte über den Forschungsstand und die Herausforderungen der Digitalisierung der Energiewende informieren und unter Anleitung eines Wissenschaftlichen Mitarbeiters selbst ausprobieren, ein Übertragungsnetz stabil zu halten und sicher zu führen.

Im Jahr 2020 fanden die folgenden Führungen statt:

- 28. Februar 2020: Besichtigung durch die Stadtwerke Burg Energienetze GmbH
- 04. September 2020: Besichtigung im Rahmen der Studieninfotage
- 05. September 2020: Besichtigung durch interessierte Mitbürger (ehemalige Mitarbeiter aus dem Bereich der Kraftwerkstechnik)

Die Besichtigung des Netzleitstandes (siehe Abbildung 3.17) im Rahmen der Studieninfotage wurde von Herrn Gebhardt betreut. Es wurden zunächst allgemein die Herausforderungen der Energiewende, insbesondere in Mitteleuropa vorgestellt und darauf aufbauend mögliche Lösungsmethoden erörtert, ehe die Abiturienten und Abiturientinnen eine Engpasssituation, die durch eine starke Windfront hervorgerufen wurde, lösen mussten.

⁶ von M. Sc. Christian Klabunde



Abbildung 3.17: Besichtigung des Netzleitstandes im Rahmen der Studieninfotage

Loopflow-Studie⁷

Das europäische Verbundnetz zeichnet sich durch eine stark vermaschte Netzstruktur und zahlreiche Verbindungen (Interkonnektoren) zwischen den einzelnen systemverantwortlichen Übertragungsnetzbetreibern (TSOs) aus. Der hohe Vermaschungsgrad führt dazu, dass sich Leistungsflüsse in einer Marktzone (z. B. vom Norden in den Süden Deutschlands), in Abhängigkeit von den Impedanzverhältnissen und der aktuellen Last- und Erzeugungssituation, auch auf andere Marktzone auswirken. Damit ergeben sich in Abhängigkeit von den Standorten eines Quellen-/Senken-Paares, welches einen partiellen Leistungsfluss hervorruft, und der Lage des übertragenden Betriebsmittels unterschiedliche Flussdefinitionen.

Einen Überblick über die Flusstypen, die von der ENTSO-E Joint Task Force „Cross Border Redispatch“ definiert wurden, ist in Abbildung 3.18 dargestellt. Darüber hinaus werden vermehrt leistungsflusssteuernde Betriebsmittel wie Phasenschiebertransformatoren (PST) und Hochspannungsgleichstromübertragungs-Leitungen (HGÜ) im Netz installiert, um den Netzbetrieb flexibler zu gestalten und das elektrische Netz z. T. auch höher auslasten zu können. In Abhängigkeit von dem angewendeten Betriebskonzept, beeinflussen diese Betriebsmittel ebenso die aktuelle Leistungsflusssituation und die Verteilung einzelner Leistungsflüsse in den einzelnen Marktzone. Abbildung 3.18 wurde bereits um die Definition der PST-Flüsse erweitert.

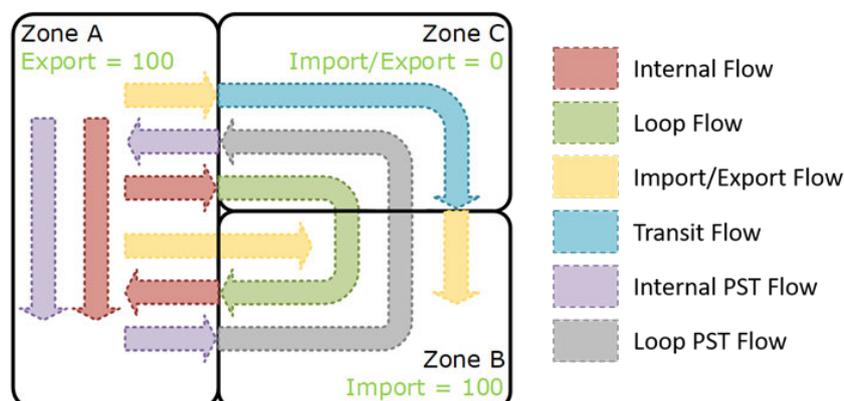


Abbildung 3.18: ENTSO-E Lastflussdefinitionen erweitert um PST-Flüsse

⁷ von M. Sc. Eric Glende

Die Flusstypen werden in diesem Projekt um einen weiteren Typen erweitert, der durch HGÜs hervorgerufen wird, die HVDC Flows. Nach Prinzip der gleichmäßig, proportionalen Aufteilung werden HGÜ-Flüsse identifiziert, wie es in Abbildung 3.19 dargestellt ist. Drei Berechnungsmethoden (Full Line Decomposition, Power Flow Decomposition und Power Flow Coloring) werden um diesen neuen Flusstypen erweitert. Zusätzlich wird ein vorhandenes, vom LENA entwickeltes Tool zur Lastflusszerlegung um weitere Datenformate, die bei den Netzbetreibern gängig sind, erweitert, sodass das Tool für einen breiten Interessentenkreis Verwendung finden kann.

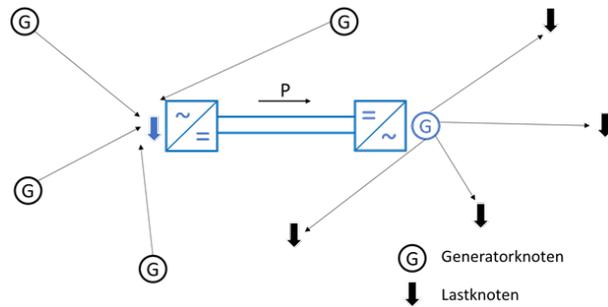


Abbildung 3.19: Prinzip der HVDC Flows mit gleichmäßig proportionaler Aufteilung

RE-FLEX – Unitäre reversible PEM-Brennstoffzellen für die flexible Energiespeicherung⁸

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 3.20).

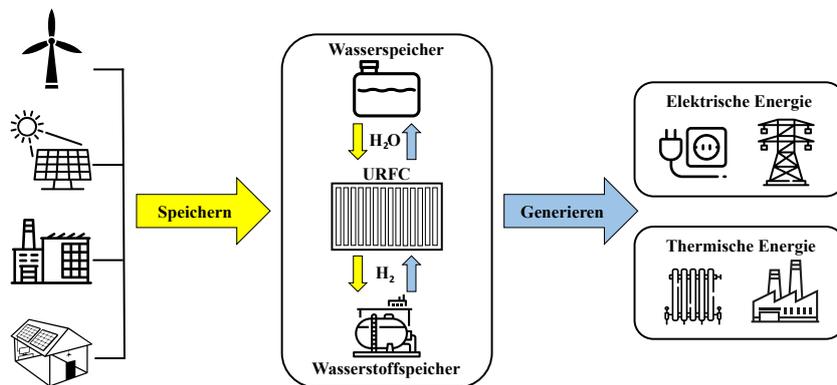


Abbildung 3.20: Funktionsprinzip einer URFC als Zwischenspeicher

Das Verbundvorhaben *RE-FLEX* wird durch das BMWi für einen Zeitraum von 3 Jahren (Start: 11/2018) gefördert. Mit Abschluss des ersten Projektjahres wurde für die Untersuchung der Membranen erster Generation ein Einzelzellenteststand aufgebaut. Dafür wurde ein bereits

⁸ von M. Sc. Philipp Kühne

vorhandener Teststand für Brennstoffzellen-Einzelzellen erweitert und um die Funktion der Elektrolyse und Wasserstoffspeicherung ergänzt. Anschließend wurden mit Hilfe eines modifizierten und verstärkten Zellrahmens die ersten Untersuchungen der Membran-Elektrodeneinheiten und verschiedene Komponenten für Gas-Diffusionsschichten durchgeführt. Die Ergebnisse konnten genutzt werden, um optimale Komponenten für die Gas-Diffusionslagen zu ermitteln und die Membran-Elektrodeneinheit weiterzuentwickeln.

Das endgültige Anlagenkonzept für den Mehrzeller-Teststand wurde ebenfalls weiterentwickelt und zusammen mit dem Projektpartner *inhouse engineering* finalisiert. Hürden dabei waren vor allem die Einbindung verschiedener Möglichkeiten der Druckregelung im Elektrolysebetrieb. Zur Verhinderung der übermäßigen Beanspruchung der Membran wurde ein Konzept entwickelt, welches über parallel gesteuerte Proportionalventile einen Druckausgleich auf beiden Zellkammern dynamisch ausführen kann. 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 entwickelt. Für die anschließende Speicherung des während der Elektrolyse entstandenen Wasserstoffs, wurden verschiedene Trocknungs- und Speicherkonzepte untersucht, bewertet und ausgewählt.

Zurzeit wird der Mehrzeller-Teststand im Brennstoffzellenlabor des LENA aufgebaut und soll anschließend zum Abschluss des 2. Projektjahres in Betrieb genommen werden. Es folgen im letzten Projektjahr umfangreiche Untersuchungen zur Bewertung des Betriebsverhaltens, Degradationseffekte und der Dauerbelastung unter verschiedenen Einsatzkonzepten.

TenneT-Blindleistungsstudie ⁹

Der aktuelle Transformationsprozess innerhalb der elektrischen Energieversorgung führt zu einer zunehmenden Belastung des Übertragungsnetzes. Speziell in Deutschland führt die hohe Distanz zwischen der regenerativen Erzeugung im Norden und den Verbrauchszentren im Süden und Westen zu einem hohen Transitaufkommen. Der fluktuierende Charakter dieser Erzeugungsanlagen bringt stark und schnell schwankende Netznutzungssituationen mit sich. Es ist Aufgabe der Verteil- und Übertragungsnetzbetreiber auf diese Situationen zu reagieren und die damit verbundenen strom- und spannungsbedingten Engpasssituationen zu vermeiden oder zu heilen. Um den spannungsbezogenen Grenzwertverletzungen präventiv und kurativ entgegen zu wirken, werden Blindleistungskompensationsanlagen eingesetzt.

Vor diesem Hintergrund besteht das übergeordnete Ziel der Studie darin den stationären kapazitiven und induktiven Bedarf an Kompensationsmitteln im Bereich des Netzes von TenneT für den Zeitbereich 2022/2023 zu ermitteln. Basis dafür waren die Zusammenhänge aus Wirk- und Blindleistung des Jahres 2018 je Umspannwerk (siehe Abbildung 3.21).

Hierzu wurde im Rahmen der Studie mit Hilfe eines linearen Optimierungsalgorithmus die zukünftig notwendigen installierten Leistungen an neuen Kompensationsanlagen ermittelt. Da das Übertragungsnetz $(n - 1)$ -sicher ausgelegt sein muss, ist bei der Ermittlung des erforderlichen Kompensationsbedarfs darauf zu achten, dass die Spannung nicht nur im $(n - 0)$ -Fall, sondern auch in Ausfallsituationen gehalten werden kann. Bei den Ausfallsituationen handelt es sich um Sammelschienenanfänge, Ausfälle relevanter Einzel- und Doppelleitungen sowie um betriebliche Nichtverfügbarkeiten bereits bestehender Blindleistungsquellen, sprich Kompensationsanlagen, HGÜ-Konverter und Kraftwerke. Diese Ausfallsituationen und betrieblichen Nichtverfügbarkeiten

⁹ von M. Sc. Martin Fritsch

wurden bei der Ermittlung des Kompensationsbedarfs entsprechend berücksichtigt. Weiterhin ist auf eine sinnvolle Platzierung der Kompensationsanlagen im Übertragungsnetz zu achten, um den größtmöglichen positiven Einfluss auf die Spannungssituation gewährleisten zu können. Dies minimiert den Blindleistungsbedarf und maximiert somit die vorhandene Wirkleistungsübertragungsfähigkeit.

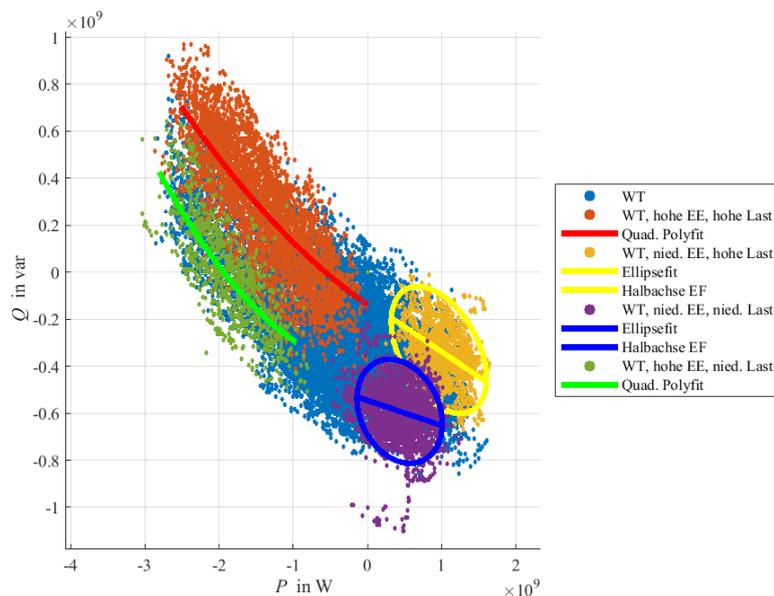


Abbildung 3.21: Wirk- und Blindleistungsflüsse eines Umspannwerks im Jahr 2018

IZI – Innovative Investitionsplanung zur intelligenten ökonomisch, ökologischen Prosumer- und Netzoptimierung¹⁰

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 $\frac{1}{4}$ h betrachtet werden.

Im aktuellen Projektstand wurden Messpartner gefunden und erste Strommessgeräte mit einer sekundlichen Auflösung installiert. Weiterhin werden bis Ende des Jahres Wärmemessgeräte bei verschiedenen Messpartnern eingerichtet. Die Messungen werden dabei für mindestens ein

¹⁰ von M. Sc. André Richter

Jahr durchgeführt und zeigen das Verbrauchsverhalten der EFH, MFH und KMU Besitzer, welche im nächsten Schritt in der Optimierung verwendet werden. Parallel dazu wurde die Softwareentwicklung vorangetrieben und verschiedene Erzeugungstechnologien innerhalb von MATLAB modelliert.

ILEP – Entwicklung einer dynamischen Integrierten Last- und Erzeugungs-Prognose ¹¹

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 Pönalen 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 als auch lokalen Einspeise- und Lastprognose identifiziert und implementiert. Die Verifizierung dieser Methoden unter Einsatz realer Daten führte zu erfolgreichen Resultaten. Weiterhin wurde eine Speicherprognose entwickelt, welche die Auswirkung von Haushaltsspeichern auf die Last- und Erzeugungskurve an Umspannwerken auf Übertragungsebene 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.

QUEST-IES – Integrated quasi-steady-state energy flow algorithms and flow distribution factors for future integrated energy systems ¹²

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 (siehe Abbildung 3.22) 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

¹¹ von M. Sc. Tamara Schröter

¹² von M. Sc. Jonte Dancker

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: Distribution Factors). 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 Distribution Factors 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 Distribution Factors des IES abgeleitet werden können. 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 Distribution Factors weiterentwickeln, sodass dieser in den gleichen Anwendungsfällen jedoch für ein IES eingesetzt werden kann.

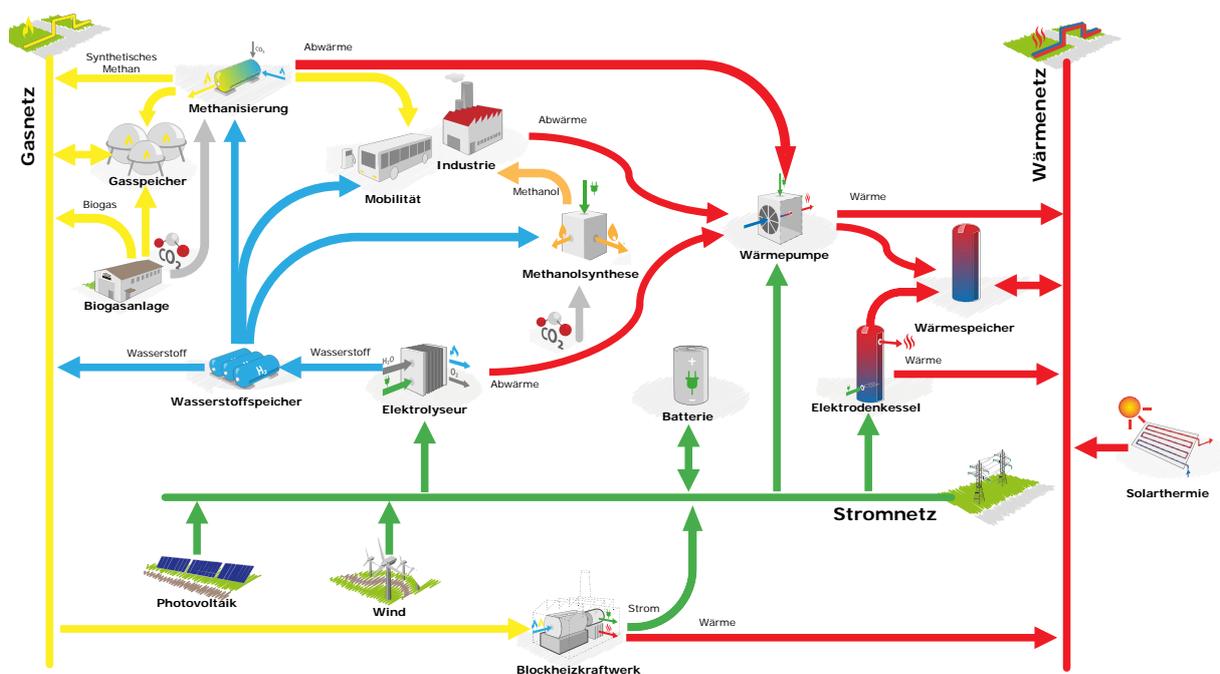


Abbildung 3.22: Gekoppelte Sektoren im Projekt *QUEST-IES*

E-Mobility 4 Grid Service – Entwicklung und Erprobung von heutigen und zukünftigen Vehicle-for-Grid-Konzepten und Dienstleistungen in ländlichen Energieversorgungsstrukturen ¹³

Das Projekt *EMo4GS* wird aus dem Klima II Richtlinie des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung finanziert und endet am 31.05.2021. Projektpartner sind der EMV-Lehrstuhl, das Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF sowie Krebs'engineers GmbH. Der Lehrstuhl LENA beschäftigt sich im ersten Schritt schwerpunktmäßig simulativ mit der

¹³ von M. Sc. Sebastian Helm

Berechnung von elektrischen Netzen mit Hilfe einer unsymmetrischen Lastflussberechnung und der Integration der Elektromobilität. Dafür wurde im ersten Schritt eine Simulationsumgebung entwickelt, ein Untersuchungsgebiet hinsichtlich eines schwachen elektrischen Netzes ausgesucht und nachgebildet sowie Lasten und Erzeuger nachgebildet.

Im zweiten Schritt werden aktuell Algorithmen entwickelt, um die in den Elektrofahrzeugen integrierten Speichersysteme netzstützend, im Sinne vom Grid Services (Vehicle for Grid – V4G), einzusetzen. Dabei werden lokale (E-Kfz agiert eigenständig ohne Netzdaten) und zentrale (E-Kfz wird durch Leitwarte gesteuert mit vorhandenen Netzdaten) Ansätze betrachtet.

Auf Grundlage von Optimierungsansätzen werden Betriebsstrategien abgeleitet. In Kooperation mit dem Fraunhofer IFF wird eine Ladeinfrastruktur mit der nötigen Kommunikationstechnik ausgerüstet, um die entwickelten Algorithmen im Feld zu testen.

Die wissenschaftlichen Arbeiten am Lehrstuhl für Elektromagnetische Verträglichkeit konzentrieren sich auf die EMV-Analyse und Modellierung komplexer Systeme, die Umsetzung standardisierter sowie die Entwicklung neuer EMV-, Mess- und Prüfverfahren und die Modellierung von Power Quality Phänomenen unter anderem auf Laborebene.

Die Krebs‘engineers GmbH entwickelt, konstruiert und fertigt die Hardware und die mit ihr verbundene eingebettete Software der Ladesysteme sowie die Schnittstellen für System und Komponenten. Aktuell werden vier E-Kfz mit unterschiedlichen Anforderungen und Eigenschaften ausgestattet und für den Feldtest vorbereitet.

GridBatt¹⁴

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 (siehe Abbildung 3.23). Ein Abgleich der besonderen 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 $50 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}}$ 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.

Nach einer Kategorisierung der Anforderungen eines Batteriespeichers im elektrischen Netz (IESY) werden diese durch eine Übertragungsfunktion bestehend aus Netz, leistungselektronischem Stellglied und Regler in Belastungen für die Batterie transformiert (IESY und EST). Auf Grundlage dieser Anforderungen werden verschiedene Speichertechnologien für den dynamischen Betrieb untersucht und charakterisiert. Ziel ist hierbei eine standardisierte Testvorschrift für Speicher zur Netzstabilisierung, wie z. B. zur Erbringung von Momentanreserve (EST). Eine weitergehende Gap-Analyse soll zeigen, dass Aluminium-Ionen-Zellen die bestehende Lücke schließen können (IISB). Folglich wird die Aluminium-Ionen-Chemie genauer untersucht und auf die Eignung zur Erbringung von Systemdienstleistungen geprüft (IISB und EST).

¹⁴von M. Sc. Sebastian Helm

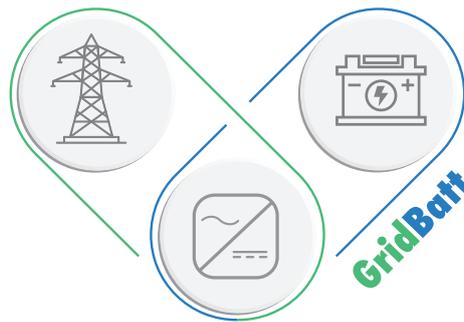


Abbildung 3.23: Kopplungen in *GridBatt*

Nach der Eignungsverifizierung erfolgt die Übertragung der Präparationsparameter auf kommerzielle Zellsysteme und deren Fertigung. Das Funktionsmuster einer Pouchzelle für den Einsatz in Speichersystemen zur Netzstabilisierung wird entwickelt und im Verbund in einem Funktionsdemonstrator getestet (IISB und EST).

In einer abschließenden Gesamtsimulation wird das Verhalten einer hochskalierten Aluminium-Ionen-Batterie im elektrischen Netz für ein bestimmtes Anwendungsszenario untersucht und insbesondere die Rückwirkungen vom Netz auf die Batterie und andersrum bewertet. Hieraus lassen sich beispielsweise Rückschlüsse auf zu verbessernde Materialeigenschaften der Batterie oder angepasste Betriebsparameter des Umrichters schließen.

InKola – Infrastrukturkopplung - Platzierung und Betrieb von Ladestationen aus Verkehrs- und Energienetztsicht¹⁵

Im Mittelpunkt des Vorhabens *InKola* „Infrastrukturkopplung – Platzierung und Betrieb von Ladestationen aus Verkehrs- und Energienetztsicht“ steht die infrastrukturübergreifende Planung und der Betrieb für Verkehr- und Energiesysteme.

Das Ziel ist 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 analysiert parallel dazu den Verkehrsfluss auf Quartierebene, um den Verkehrsfluss zwischen den definierten Zellen und die Auslastung des Verkehrs bestimmen zu können. Mit einer Kopplung von Verkehrs- und Netzmodell konnte Ladeinfrastruktur durch einen Algorithmus in der Stadt Burg verteilt werden. Die vier geplanten Ladestationen wurden erfolgreich installiert und im August 2020 in Betrieb genommen.

Low-Cost-Teilentladungsmessung ¹⁶

Seit dem 01.07.2019 arbeiten Mitarbeiter des LENA in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für technische Thermodynamik an dem Forschungsprojekt Low-Cost-Teilentladungsmessung. Die Versorgung mit elektrischer Energie wird in Deutschland, vor allem in dicht besiedelten

¹⁵ von M. Sc. Sebastian Helm

¹⁶ von M. Sc. Martin Fritsch

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 (siehe Abbildung 3.24). 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.

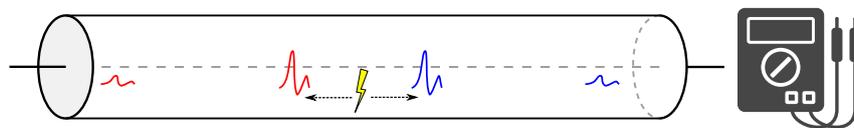


Abbildung 3.24: Schematische Signalübertragung einer Teilentladung auf einem Energiekabel zwischen Ort der Entstehung und der nächsten möglichen Messstelle

Schematische Signalübertragung einer Teilentladung auf einem Energiekabel zwischen Ort der Entstehung und der nächsten möglichen Messstelle. Innerhalb des letzten Projektjahres wurde vorrangig die Signalübertragung der Energiekabel untersucht. Da die Kabel unterirdisch verlegt sind, kann eine Messung meist nur am Kabelende stattfinden. Durch die notwendige Übertragung entlang des Energiekabels wird das breitbandige TE-Signal stark gedämpft und verzerrt. Dieser Prozess wurde durch ein Simulationsmodell nachgebildet und untersucht, um das erwartbare Nutzsignal am Kabelende zu analysieren. Die zu erwartende Bandbreite des TE-Signal an der Messstelle gibt nun die Messbandbreite des zu entwickelnden Sensors vor. Hierzu wurde auch ein Teststand zu Validierungszwecken aufgebaut. Als nächstes Teilziel soll ein induktiver Stromsensor entwickelt und auf seine Eignung getestet werden. Dazu soll auch ein Hochspannungsteststand eingerichtet werden, um realitätsnahe Teilentladungen erzeugen zu können.

3.2.3 Promotionen

Dr.-Ing. Stephan Balischewski: Multifunktionaler Einsatz von Batteriespeichern in elektrischen Verteilnetzen – Optimale Auslegung und Betrieb

Gutachter:

- Jun.-Prof. Ines Hauer, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
- Prof. Martin Wolter, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
- Prof. Dirk Westermann, Technische Universität Ilmenau

verteidigt am 29. Januar 2020 an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (siehe Abbildung 3.25)

Der zunehmende Bedarf an Flexibilisierungsmöglichkeiten des elektrischen Energiesystems ist als direkte Folge des strukturellen Systemwandels zu sehen. Veränderungen in allen drei Bereichen des Stromnetzes (Erzeugung, Verbrauch, Transport) führen zu einer wachsenden Volatilität des Energieflusses, welche durch geeignete Maßnahmen aufgefangen werden muss. Während netzbasierte Energieüberschüsse vor allem durch Netzausbau und konventionelle Netzführung



Abbildung 3.25: Gratulation an Stephan Balischewski am Otto-von-Guericke-Denkmal

ausgeglichen werden können, verlangen marktbasierete Überschüsse mit zunehmendem Volatilitätsgrad in der Erzeugung nach Möglichkeiten der zeitlichen Verschiebung. Die Nutzung neuartiger Energiespeichertechnologien, wie Batteriespeichersysteme, ist einerseits notwendig auf Grund des fehlenden Ausbaupotentials konventioneller Pumpspeicher, aber andererseits auch mit Unsicherheiten angesichts fehlender Betriebserfahrungen im großtechnischen Einsatz und den aktuell noch hohen Investitionskosten verbunden.

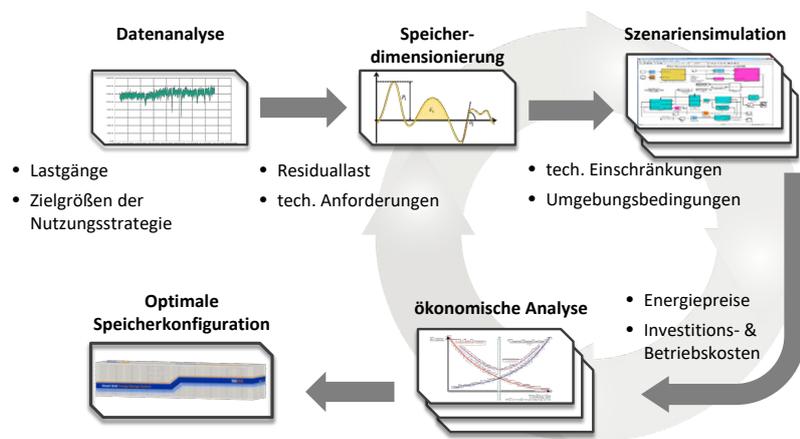


Abbildung 3.26: Speicherauslegung und Dimensionierung

Die vorliegende Arbeit betrachtet den Einsatz von Batterieenergiespeichern (BES) im elektrischen Verteilnetz und ist dabei in die komplexe Auslegung (siehe Abbildung 3.26) und Betrieb unter jeweils verschiedenen Optimierungszielen aufgeteilt. Dies beginnt mit der Analyse der regulatorischen Rahmenbedingungen und der darauf aufbauenden Betrachtung potentieller Anwendungsfälle. Durch die Kombination unterschiedlicher Modellierungsansätze auf Zell- und Batteriesystemebene wurde anschließend die Grundlage für die Bewertung ausgewählter Anwendungsfälle aus verschiedenen Gebieten sowie deren möglicher Kombination mit Zusatzanwendungen geschaffen. Des Weiteren wurde mit Hilfe eines modifizierten Zyklenzählverfahrens sowie einer auf Messwerten basierenden Gewichtung entsprechend der Zyklertiefe ein Modell zur Nach-

bildung der Alterungseffekte für BES konzipiert und umgesetzt. Die Szenarien werden hinsichtlich Wirtschaftlichkeit unter Beachtung der genannten Aspekte bewertet. Die theoretischen Analysen werden anschließend im Vergleich zu einem realen Feldtest unter Nutzung einer 1 MW/0,5 MW h-Referenzanlage betrachtet und der Speichereinsatz bewertet. Abschließend wird ein Ansatz zur Bestimmung eines online BES-Zustandsindizes, welcher auf einfachen Betriebsdaten beruht und weder zusätzliche Messdaten benötigt, noch den laufenden Betrieb beeinflusst, vorgestellt.

3.2.4 Veröffentlichungen

Zeitschriften- und Konferenzbeiträge

- [1] M. Wolter, „Einsatz von Assistenzsystemen in der Netz- und Systemführung“, *ew-Magazin für die Energiewirtschaft*, Jg. 5/2020, 2020, ISSN: 1619-5795 - D 9785 D.
- [2] Y. Zhang, C. Klabunde und M. Wolter, „Frequency-Coupled Impedance Modeling and Resonance Analysis of DFIG-Based Offshore Wind Farm With HVDC Connection“, *IEEE Access*, Jg. 8, S. 147 880–147 894, 2020, ISSN: 2169-3536. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3015614.
- [3] 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 - SI: Proceedings of the 21st Power Systems Computation Conference (PSCC 2020)*, Bd. 190, Porto, Portugal, 2020. DOI: 10.1016/j.epsr.2020.106767.
- [4] M. Gholizadeh und M. Wolter, „Cost-beneficial Analysis of Utilizing a Combination of Renewable and Non-Renewable Energy Sources“, in *2020 55th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, Turin, Italien, 2020, S. 1–5. DOI: 10.1109/UPEC49904.2020.9209871.
- [5] M. Gebhardt, C. Klabunde und M. Wolter, „Identifikation von HGÜ-Flüssen mit Hilfe der Power Flow Decomposition“, *at - Automatisierungstechnik*, Jg. 68, Nr. 9, S. 804–814, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1515/auto-2020-0080>. Adresse: <https://www.degruyter.com/view/journals/auto/68/9/article-p804.xml>.
- [6] J. Dancker und M. Wolter, „Impact of different CO₂-pricing schemes on the profitability of Energy Hubs“, in *IEEE PES General Meeting 2020*, Montréal, Kanada, 2020.
- [7] P. Kühne, M. Wenske, M. Wolter und N. Baumann, „Investigation and Optimization of Pt/IrO₂ Catalyst for Unitized Regenerative PEM Fuel Cells“, in *IEEE PES General Meeting 2020*, Montréal, Kanada, Aug. 2020.
- [8] T. Schröter, A. Richter, J. Gronau, A. Naumann und M. Wolter, „Integrated Load and Infeed Forecast for the entire Value Chain in the Electric Energy Market“, in *2020 IEEE PES T&D*, Chicago, Vereinigte Staaten von Amerika, Aug. 2020.
- [9] C. Klabunde und M. Wolter, „Mixed Integer Linear Programming Time-Series Based Redispatch Optimization“, in *2020 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe)*, Delft, Niederlande, 2020, ISBN: 978-1-7281-7099-2.
- [10] M. Gebhardt und M. Wolter, „Decomposition of PST Flows Via Extended Power Equation“, in *2020 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe)*, Delft, Niederlande, 2020, ISBN: 978-1-7281-7099-2.
- [11] E. Glende und M. Wolter, „Tracing HVDC Flows Using the Proportional Sharing Principle“, in *2020 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe)*, Delft, Niederlande, 2020, ISBN: 978-1-7281-7099-2.

- [12] M. Tayyab, I. Hauer, C. Klabunde und M. Wolter, „Optimal Hybrid Storage Planning under Different Tariffs in a Microgrid“, in *2020 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe)*, Delft, Niederlande, 2020, ISBN: 978-1-7281-7099-2.
- [13] T. Woldu, C. Ziegler und M. Wolter, „A New Method for Prediction of Static and Dynamic Voltage Collapse Using Node Parameters in Large Power Networks“, in *2020 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe)*, Delft, Niederlande, 2020, ISBN: 978-1-7281-7099-2.
- [14] S. Helm, I. Hauer, M. Wolter, C. Wenge, S. Balischewski und P. Komarnicki, „Impact of Unbalanced Electric Vehicle Charging on Low-Voltage Grids“, in *2020 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe)*, Delft, Niederlande, 2020, ISBN: 978-1-7281-7099-2.
- [15] „DIN SPEC 91410-1:2020-07, Energieflexibilität – Teil 1: Flexibilitätsbereitstellung für die Engpassbewirtschaftung von Stromnetzen – Anforderungen an die freiwillige Teilnahme von Anbietern an einer Flexibilitätsplattform“, Beuth Verlag GmbH, 2020. DOI: 10.31030/3165667. Adresse: <https://www.beuth.de/de/-/-/323621795> (besucht am 29.10.2020).
- [16] I. Hauer, S. Balischewski und C. Ziegler, „Design and operation strategy for multi-use application of battery energy storage in wind farms“, *Journal of Energy Storage*, Jg. 31, Okt. 2020, ISSN: 2352152X. DOI: 10.1016/j.est.2020.101572. Adresse: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352152X20303571> (besucht am 29.10.2020).
- [17] J. Brinken, N. Schmittke, T. Schulz, S. Helm und I. Hauer, „Integrated charge site allocation for electric vehicles“, in *European Transport Conference 2020*, Mailand, Italien, 2020.
- [18] E. Glende, M. Gebhardt, C. Klabunde und M. Wolter, „Power Flow Partitioning with PFD, FLD and PFC“, in *International Conference on Smart Grids and Energy Systems (SGES 2020)*, Delft, Niederlande, 2020.
- [19] M. Wolter, „Session Chair der Session: Dynamic Security assessment under uncertainty“, in *IEEE PES General Meeting 2020*, Montréal, Kanada, Aug. 2020.
- [20] M. Wolter, „Session-Chair der Session SSmart Grid Operation“, in *IEEE PES General Meeting 2020*, Hamburg, Deutschland, 2020.
- [21] M. Wolter, „Phase shifting transformer requirements in optimally utilizing the existing network for RES“, in *IGEF Round table discussion on Phase shifting*, Regensburg, Deutschland, 2020.

Dissertationen und Bücher

- [1] S. Balischewski, *Multifunktionaler Einsatz von Batteriespeichern in elektrischen Verteilnetzen*, 1. Aufl., Ser. Res Electricae Magdeburgenses 79. Magdeburg: Lindemann, A. u. a., 2020, ISBN: 978-3-944722-92-4.

3.2.5 Kolloquien

IEEE PES General Meeting 2020 ¹⁷

Vom 03. bis 06. August fand das diesjährige General Meeting der IEE PES statt. Anstatt in Montreal, Kanada wurde der wissenschaftliche Austausch ins Internet verlagert. Aufgrund der COVID-19 Pandemie wurde die Konferenz in diesem Jahr virtuell abgehalten. Anstatt wie geplant

¹⁷ von M. Sc. Jonte Dancker

mit einer kleinen Gruppe von Mitarbeiter nach Montreal zu reisen bereiteten diese kurze Vorträge zu Ihren Themen vor.

Herr Philipp Kühne stellte die jüngsten Ergebnisse zum Thema unitäre reversible Brennstoffzellen am Lehrstuhl für Elektrische Netze und Erneuerbare Energie vor. Dabei wurde ein neuartiger, geträgerter Katalysator entwickelt, welcher für die Herstellung von reversiblen Membran-Elektrodeneinheiten eingesetzt werden kann. Durch das Trägermaterial kann die Anbindung und die aktive Oberfläche deutlich gesteigert werden, wodurch sowohl die Haltbarkeit als auch die Leistungsdichte erhöht werden.

Herr Jonte Dancker zeigte eine Analyse aus dem Projekt SmartMES über die wirtschaftliche Auswirkung einer CO₂-Bepreisung auf die Auslegung von Multi-Energie-Systemen. Hierbei wurde der Einfluss verschiedener aktueller und geplanter CO₂-Preise von Strom und Gas auf die optimale Zusammensetzung von Kopplungstechnologien (Wärmepumpe, Gasbrennwerttherme) und Speichern (Batterie, Warmwasserspeicher) untersucht.

Christian Ziegler skizzierte in seinem Vortrag „Improving efficiency of DSA for system operation applications under uncertainty“ gegenwärtige Bedrohungen für die Netzstabilität und hob in diesem Zusammenhang die Bedeutung von „Dynamic Security Assessment“-Systemen zur Vorbeugung etwaiger Stabilitätsprobleme hervor. Er stellte darüber hinaus ein Verfahren auf Basis des Stabilitätsindex PTSI vor, das zur Erhöhung der Spannungsstabilität beiträgt, indem es dem Netzbetreiber gezielte Maßnahmen zur Blindleistungsanpassung im elektrischen Netz vorschlägt.

Neben den eigenen Präsentationen gab es eine Vielzahl an weiteren Vorträgen zu verschiedenen Themen des Energiesystems der Zukunft, die sich On-Demand angesehen werden konnten. Darüber hinaus gab es bei den Panel Sessions, die Möglichkeit mit den Panelists zu diskutieren.

ETG/FNN Fachtagung Schutz- und Leittechnik ¹⁸

Die ETG/FNN Fachtagung Schutz- und Leittechnik 2020 fand am 18. und 19. Februar 2020 in Berlin statt. Hauptschwerpunkte der Tagung waren die Themenfelder Schutztechnik, Leittechnik, Kommunikation/Cybersecurity und GridCodes. Auf der Tagung waren neben unterschiedlichen Forschungseinrichtungen auch viele Industrieteilnehmer aus den den Bereichen Netzbetrieb und Anlagentechnik vertreten.

Der Lehrstuhl LENA wurde durch Christian Klabunde vertreten, der, in Vertretung für Nicola Könnecke, ein Poster zum Thema „Intelligentes Layout einer Umgebung eines wissenschaftlichen Kontrollzentrums zur Entwicklung zukünftiger Netz-Betriebskonzepte“ vorstellte. Inhalte der Veröffentlichung sind der Aufbau der Kommunikationsschnittstelle zwischen den MATLAB-Simulationen und dem PSIcontrol-Netzleitstand sowie die aktuellen und zukünftig geplanten Anwendungsfälle bzw. Forschungsschwerpunkte der aufgebauten Systemumgebung. Im Rahmen von Diskussionen mit den Konferenzteilnehmern konnten weitere interessante Anwendungsfälle im Rahmen der Schutztechnik und der automatisierten Erstellung von Netzbildern abgeleitet werden.

IEEE PES Transmission & Distribution ¹⁹

Die IEEE PES T&D-Konferenz und -Ausstellung bringt alle zwei Jahre über 900 Aussteller und 14.000 Fachleute aus der ganzen Welt zusammen, um die neuesten Technologien auszutauschen

¹⁸ von M. Sc. Christian Klabunde

¹⁹ von M. Sc. Tamara Schröter

3 Forschung

und die nächste Generation von Energieherausforderungen und -lösungen zu erkunden. Die Konferenz bietet eine Kombination aus technischen Sessions, Ausstellungen und Networking-Events. Nachdem sie dieses Jahr nicht wie geplant im April in Chicago stattfinden konnte, wurde die Vorstellung von eingereichten Forschungsbeiträgen Online vom 12. Bis 15. Oktober nachgeholt. Der Lehrstuhl Lena wurde dabei mit dem Vortrag „Integrated Load and Infeed Forecast for the entire Value Chain in the Electric Energy Market“ durch die wissenschaftliche Mitarbeiterin Tamara Schröter vertreten.

3.3 Lehrstuhl für Elektromagnetische Verträglichkeit

3.3.1 Forschungsprofil

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

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

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

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

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

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

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

3.3.2 Forschungsprojekte

Untersuchung von Grenzwerten gestrahlter Störaussendung oberhalb von 1 GHz in Bezug auf neue Mobilfunkstandards²⁰

Die Verwendung elektronischer Geräte hat in den letzten Jahrzehnten stetig zugenommen. Dieser Trend wird von höheren Taktfrequenzen und Datenraten, die zu unerwünschten Störaussendungen im Hochfrequenzbereich führen, als auch von der Nutzung drahtloser Kommunikation im Frequenzbereich oberhalb von 1 GHz, begleitet. Dies führt zu einer steigenden Wahrscheinlichkeit der Beeinträchtigung von Mobilfunkdiensten. Aus diesem Grund rückt der Schutz von Mobilfunkdiensten vor unerwünschter Störaussendung oberhalb von 1 GHz in den Fokus internationaler Normungsarbeit.

Zum derzeitigen Stand gibt lediglich die FCC Verordnung Grenzwerte in einem Frequenzbereich bis zu 40 GHz an. CISPR 32 ist die einzige internationale Produktnormfamilie die allgemein anwendbare Grenzwerte bis 6 GHz angibt. Allerdings ist das Verfahren zur Grenzwertbildung intransparent und Annahmen zur Dichte der Geräte oder zum Schutzabstand sind nicht mehr aktuell.

Der technische Bericht CISPR TR 16-4-4 bietet ein anerkanntes Verfahren für die Grenzwertbildung gestrahlter Störaussendung. Das Model wurde bisher allerdings nur für die Abschätzung von Störaussendung unterhalb von 1 GHz angewendet. Außerdem benötigt das Verfahren Eingabewerte, welche derzeit selbst für verbreitete Dienste wie GSM, UMTS und LTE nicht in der IEC Datenbank für Mobilfunkdienste vorhanden sind.

Folglich war die Zielstellung der Untersuchung

- die Bestimmung relevanter Parameter von neuen Mobilfunkdiensten zur Einbindung in die IEC Datenbank,
- der Nachweis und die Bewertung von Grenzwerten für den Schutz von Mobilfunkdiensten, die aus dem CISPR TR 16-4-4 Verfahren im Frequenzbereich von 1 GHz bis 40 GHz abgeleitet werden können,
- die messtechnische Untersuchung des Störpotentials eines praktisch relevanten Testobjekts in verschiedenen Messumgebungen.



Abbildung 3.27: Messanordnung zur Untersuchung der gestrahlten Störaussendung eines 10GBase-Ethernet-Netzwerkes in der Absorberhalle

²⁰von Prof. Dr.-Ing. Ralf Vick, Dr.-Ing. Dipl.-Phys. Jörg Petzold, M. Sc. Johanna Kasper, Dipl.-Ing. Max Rosenthal

Zusammenfassend konnten in der Untersuchung Möglichkeiten zur Grenzwertbildung von Störaussendung für Frequenzen oberhalb von 1 GHz herausgearbeitet werden. Die relevanten Parameter zur Einbindung in die IEC Datenbank konnten aus den technischen Spezifikationen der Telekommunikationsstandardorganisation 3GPP abgeleitet werden. Die Einschränkungen des ursprünglichen CISPR TR 16-4-4 Verfahrens für die Anwendung oberhalb von 1 GHz konnten aufgezeigt werden. Dennoch wurden Grenzwerte für die elektrische Feldstärke mit korrigierten Parametern aus dem CISPR-Verfahren abgeleitet. Da die relevanten Parameter zur Beschreibung von Mobilfunkdiensten vorrangig in Leistungswerten angegeben werden, wurde darüber hinaus ein auf Leistungswerten basierendes Verfahren eingeführt und erste Überprüfungen zur Anwendbarkeit in der Modenverwirbelungskammer durchgeführt.

Als Testobjekt für die Untersuchung, diente das in Abbildung 3.27 dargestellte 10GBase-Ethernet-Netzwerk. Die Messungen zeigen deutliche Störaussendungen des Testobjekts im Hochfrequenzbereich. Dabei ist die Anwendung des etablierten Testverfahrens in der Absorberhalle, welches auf der Erfassung der elektrischen Feldstärke basiert, im höheren Frequenzbereich aufgrund des relativ hohen Grundrauschens der Messkette und der Richtwirkung der Empfangsantenne, besonders herausfordernd. Aus der Messung in der Modenverwirbelungskammer gehen signifikantere Ergebnisse mit erheblich weniger Messaufwand hervor. Als Ergebnis der Untersuchungen wird empfohlen, dass auf Leistungswerten basierende Verfahren zur Grenzwertbildung weiter zu verbessern und die Modenverwirbelungskammer im Frequenzbereich oberhalb von 1 GHz zu etablieren.

Messung der spezifischen Absorptionsrate einer dedizierten Birdcagespule für die Neonatale MR-Bildgebung ²¹

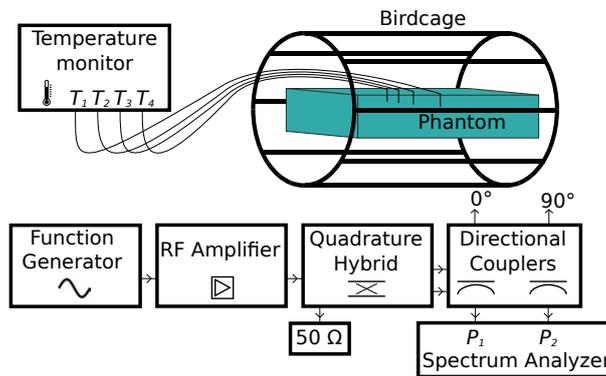
Erwärmungen durch die Absorption von Radiofrequenzfeldern stellen noch immer ein wesentliches Sicherheitsrisiko für Patienten während einer Magnetresonanztomographie (MRT) dar. Quantifiziert werden kann die Leistungsabsorption im menschlichen Körper als spezifische Absorptionsrate (SAR) und muss während der Bildgebung limitiert werden, um einen sicheren Einsatz des MRTs zu gewährleisten. Für die Bildgebung von Kleinkindern und Säuglingen wird diese Limitierung umso wichtiger. Bei ihnen handelt es sich nicht nur um eine der anfälligsten Patientengruppen, sie sind zusätzlich auch nicht in der Lage direkt physiologische Beschwerden zu kommunizieren. Um die SAR-Verteilungen durch eine spezielle Ganzkörperspule (Birdcage) vorherzusagen, wurden Simulationen an Phantomen durchgeführt und experimentell validiert.

Eine dedizierte Birdcage-Spule für die neonatale Magnetresonanztomographie wurde mit unterschiedlichen Phantomen bei einer Frequenz von 63,8 MHz für ein 1,5 T-System simuliert. Um die Sicherheit der Simulationsergebnisse zu erhöhen, wurden Validierungsexperimente auf Basis von Cellulose-Salz-Phantome nach ASTM-Standard F2182 durchgeführt. Der dazugehörige Messaufbau ist dargestellt in Abbildung 3.28. Ein quaderförmiges Phantom wurde zentriert in die Birdcage-Spule positioniert und einer kontinuierlichen Quadraturanregung von insgesamt 100 W ausgesetzt. Die zwei Eingangsleistungen des Birdcages wurden mithilfe von Richtkopplern und einem Netzwerkanalysator gemessen. Die Erwärmung im Phantom wurde durch faseroptische Temperatursensoren an vier Positionen entlang der zentralen Ebene aufgenommen. Die experimentell bestimmte Wärmeleistung konnte auf diese Weise mit einer entsprechenden Simulation verglichen werden.

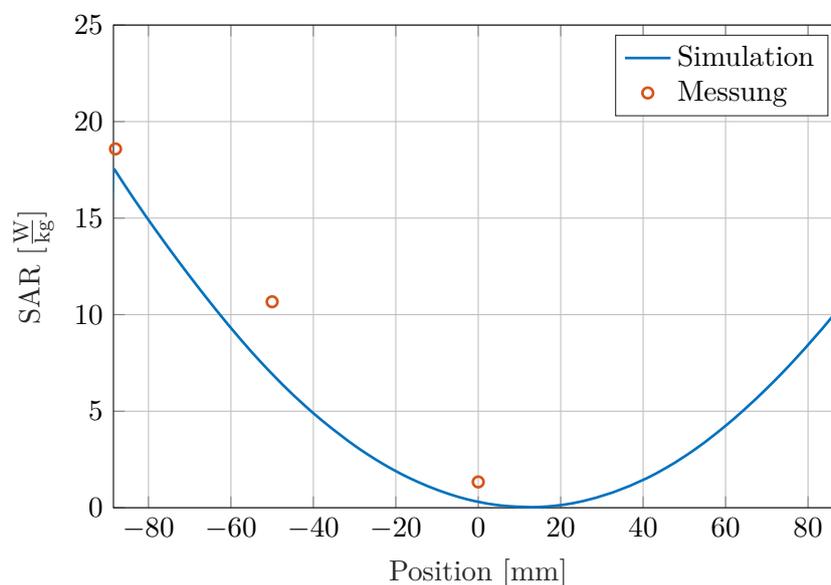
Das Validierungsexperiment weist eine durchschnittliche relative Abweichung von 30 % auf. Die beste Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment konnte an den Positionen mit hohen SAR-Niveaus festgestellt werden. In einem nächsten Schritt können komplexere Phantome evaluiert werden, indem 3D-gedruckte und geometrisch menschenähnliche Phantome mit ihren

²¹ von M. Sc. Robert Kowal, M. Sc. Enrico Pannicke, M. Sc. Thomas Gerlach und M. Sc. Marcus Prier

simulierten Äquivalenten verglichen werden. Erste Simulationen zeigten bei der Frequenz von 63,8 MHz nur geringe Unterschiede zwischen der Absorption in homogenen oder heterogenen Phantomen.



(a) Schematischer Messaufbau



(b) Vergleich der SAR-Verteilung

Abbildung 3.28: Messung der Erwärmung durch die Absorption von Radiofrequenzfeldern und Vergleich mit der simulierten Wärmeleistung

Entwurf eines Generators für die MR-kompatible irreversible Elektroporation²²

Zur Behandlung der stetig wachsenden Anzahl an Krebserkrankungen, werden kontinuierlich neue Therapieverfahren entwickelt und bereits vorhandene verbessert. Neben dem chirurgischen Eingriff, der Chemo- und Strahlentherapie existieren minimal-invasive Therapieverfahren, die die Belastung des Patienten während und nach der Therapie verringern sollen. In der Vergangenheit haben sich dabei ultraschall- und RF-basierte Methoden etabliert. Diese werden täglich im radiologischen Klinikalltag angewandt. Wärmebasierte Therapieverfahren, wie die RF-Ablation, sind aufgrund von Wärmetransportprozessen in ihrem Einsatzgebiet limitiert.

Eine Alternative zu diesen etablierten Methoden bietet die irreversible Elektroporation (IRE). Bei der IRE ist allerdings die Nadelpositionierung entscheidend für den Erfolg der Ablation. Daher

²² von B. Sc. Joris Hubmann, M. Sc. Thomas Gerlach, M. Sc. Enrico Pannicke

wäre eine Anwendung in einer MR-Umgebung mit Echtzeit-Bildgebung förderlich. In diesem Projekt soll daher ein MR-kompatibles Gerät für die irreversible Elektroporation entwickelt werden.

Das Prinzip der irreversiblen Elektroporation basiert auf der Zerstörung der semipermeablen Doppellipidschicht (Zellmembranen) der Körperzellen durch das Anlegen eines starken elektrischen Feldes (mindestens $1500 \frac{\text{V}}{\text{cm}}$). Zur Generierung dieser Felder werden Elektroden in den Patienten eingebracht. Zwischen den Elektroden bildet sich dann abhängig vom Gewebe und der Spannung ein elektrisches Feld aus, welches die Zellen zerstört. Damit es nicht zu thermischen Effekten kommt, werden die Felder gepulst appliziert mit Pulslängen zwischen $100 \mu\text{s}$ und 100ms .

Ein Generator zur Erzeugung der Pulse wurde entwickelt und getestet. Abbildung 3.29a zeigt den schematischen Aufbau des entwickelten IRE-Geräts. Das Ergebnis der IRE in der Kartoffel ist in Abbildung 3.29b dargestellt. Der dunkle Gewebereich wurde durch die IRE zerstört, wohingegen der helle Bereich nicht angegriffen wurde.

Für die kommenden Arbeiten soll die Eignung der IRE in einer MR-Umgebung untersucht werden.

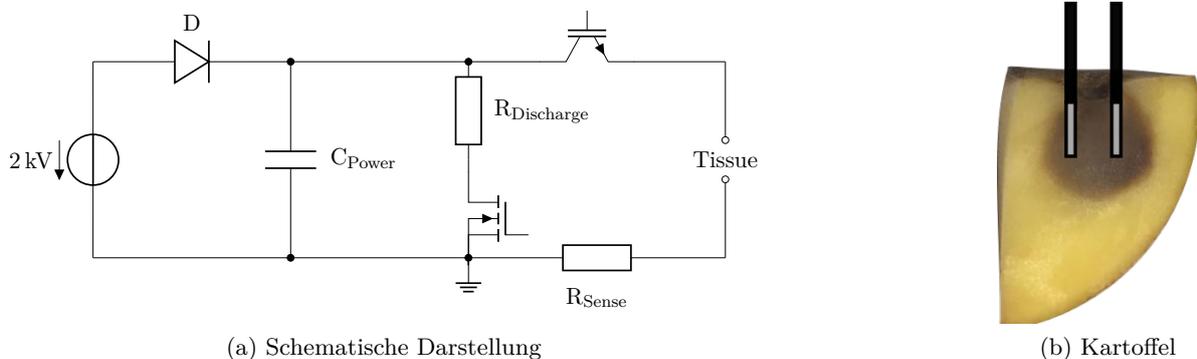


Abbildung 3.29: Schematische Darstellung des IRE-Geräts und Resultat der IRE in einer Kartoffel

MR-Bildgebung mit einer Ablationselektrode²³

Die Radiofrequenzablation ist ein hyperthermischer Ansatz zur Zerstörung von Tumoren und Metastasen. Für diesen minimal-invasiven Ansatz werden Elektroden mittels medizinischer Bildgebung in eine Zielregion positioniert. Die von der Elektrode ausgesendeten RF-Felder führen zu einer Wärmeentwicklung, die ausreichend ist, um Gewebe irreversibel zu zerstören. Die Nutzung der Magnetresonanztomographie für die Begleitung der RFA würde auch eine Echtzeit-Therapiekontrolle mittels MR-Thermometrie erlauben. Für eine zuverlässige Therapiekontrolle wird aber erwartet, dass das Therapiegerät die MR-Bildgebung nicht beeinflusst.

Durch die Vermeidung von externen Therapiegeräten in einer MR-Umgebung entfallen auch potentielle Störquellen für die MR-Bildgebung. Die Nutzung des Konzeptes des MRT Hybrid Ablationssystem bietet hierbei die Möglichkeit, dass die Leistung vom MR-internen RF-Verstärker für die RF-Ablation genutzt wird (siehe Abbildung 3.30a).

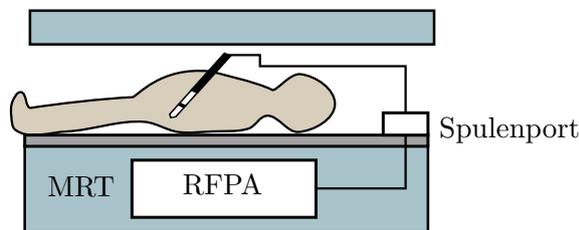
Durch den Anschluss der Ablationselektrode am RF-Port des MR-Gerätes ist die Ablationsfrequenz identisch zur Operationsfrequenz des MR-Gerätes. Hierdurch generiert das vom Ablationsstrom hervorgerufene Magnetfeld ein MR-Signal. Die Ablationselektrode selbst kann dadurch

²³ von M. Sc. Thomas Gerlach, M. Sc. Enrico Pannicke

als eine Sende-/ und Empfangsspule mit in Kombination zu konventionellen MR-Spulen genutzt werden.

Experimente in einem homogenen Phantom und einer Bipolarelektrode zeigten, dass die mit der Ablationselektrode aufgenommenen MR-Bilder einen stark inhomogenen Verlauf aufweisen (siehe Abbildung 3.30b). Trotzdem bietet diese Art der MR-Akquisition die Möglichkeit MR-Thermometrie-Karten ohne externe Interferenzen während einer Ablation aufzunehmen. Wenn die Ablationselektrode für den Empfang eines MR-Signales genutzt wird, sind die gemessenen Signalamplituden nahe der Ablationselektrode wesentlich größer, als wenn konventionelle MR-Bildgebungsspulen genutzt werden. Die MR-Signale weisen aber bei Nutzung der Ablationselektrode als Empfangskanal ein wesentlich größeres thermisches Rauschen auf.

In weiteren Arbeiten sollen die Eignung unterschiedlicher Elektrodengeometrien für die Ablation und für die MR-Bildgebung untersucht werden.



(a) Konzept des MRT-Ablations-Hybridsystems



(b) MR-Aufnahme bei Nutzung einer Ablationselektrode als Sende-/Empfangskanal

Abbildung 3.30: Konzept des MRT-Hybrid-Ablationssystems und MR-Aufnahme mit einer Ablationselektrode

Electromagnetic-Thermal Simulations of Electrodes for an MRI Hybrid Ablation System²⁴

An MRI hybrid ablation system is a concept to use the MR internal RF amplifier for RF ablation. 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 ablation electrode can be used as a transmit and receive channel for MR imaging.

Previous experiments have shown that the hybrid system can destroy tissue and simultaneously record MR temperature maps to monitor the thermal process in real time. However, the MR signals recorded with a bipolar ablation electrode show a strongly inhomogeneous distribution.

Aim of this study is to compare the heating efficiency and MR imaging capabilities of different electrode combinations for an MRI hybrid ablation system.

Simulations were performed in a homogeneous cylindrical phantom using CST for a frequency of 123 MHz. As an alternative to a classic single-shaft bipolar electrode, a bipolar umbrella electrode was designed for this study. The umbrella electrode is characterized by a multiple of

²⁴by B. Sc. Mishuk Mitra, M. Sc. Thomas Gerlach

expandable, thin wires at the end of the electrode shaft, which have direct electric contact to the surrounding tissue.

The specific absorption rate (SAR) for the umbrella electrode is shown in Fig. 3.31. High temperature developments can be expected near the thin wires of the ablation electrode. Next steps include the analysis of the influence of the electrode on MR imaging by calculating the B1+ field. Furthermore, open source human body models will be included in the simulations.

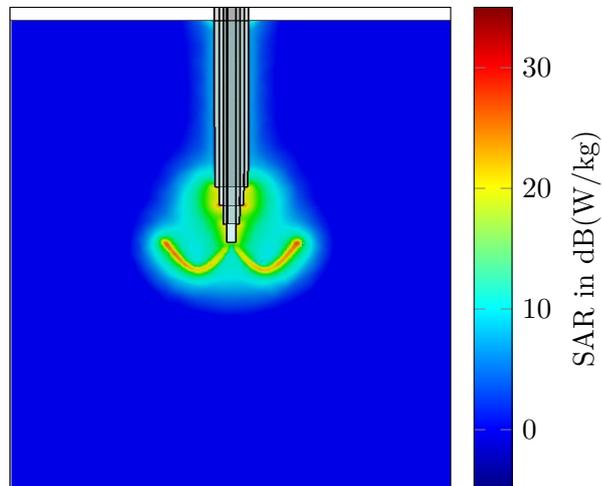


Figure 3.31: Simulations of the specific absorption rate (SAR) with the aid of a bipolar umbrella electrode inside a homogeneous liver phantom at 123 MHz

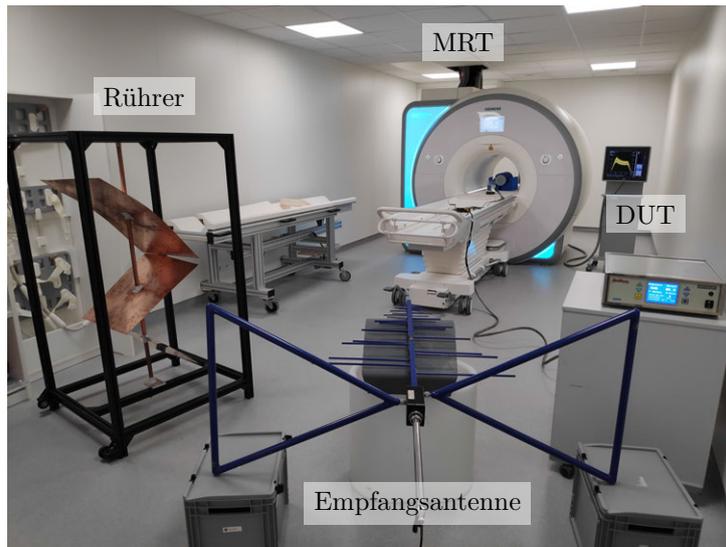
Implementierung eines Prüfverfahrens zur Evaluierung von Störeinkopplungen in der Magnetresonanztomographie²⁵

Das interventionelle MRT bietet neben dem hohen Weichteilkontrast, der fehlenden Strahlenbelastung für Anwender und Patienten, die Möglichkeit einer Therapiekontrolle für den behandelnden Arzt. Die für die Behandlung notwendigen Geräte befinden sich oftmals in der Schirmkabine des MRTs. Für diese Geräte, ist sicherzustellen, dass diese neben der Patientensicherheit auch die MR-Bildgebung nicht beeinflussen. Ein besonderes Feld der Beeinflussung stellen die hochfrequenten Emissionen externer Geräte dar. Für diese Art von Störungen gibt es derzeit kein einheitliches, standardisiertes Verfahren. Ein erstes Setup für die Evaluierung von Störeinkopplungen wurde am Lehrstuhl für EMV und in Zusammenarbeit mit dem Forschungscampus Stimulate entwickelt und implementiert.

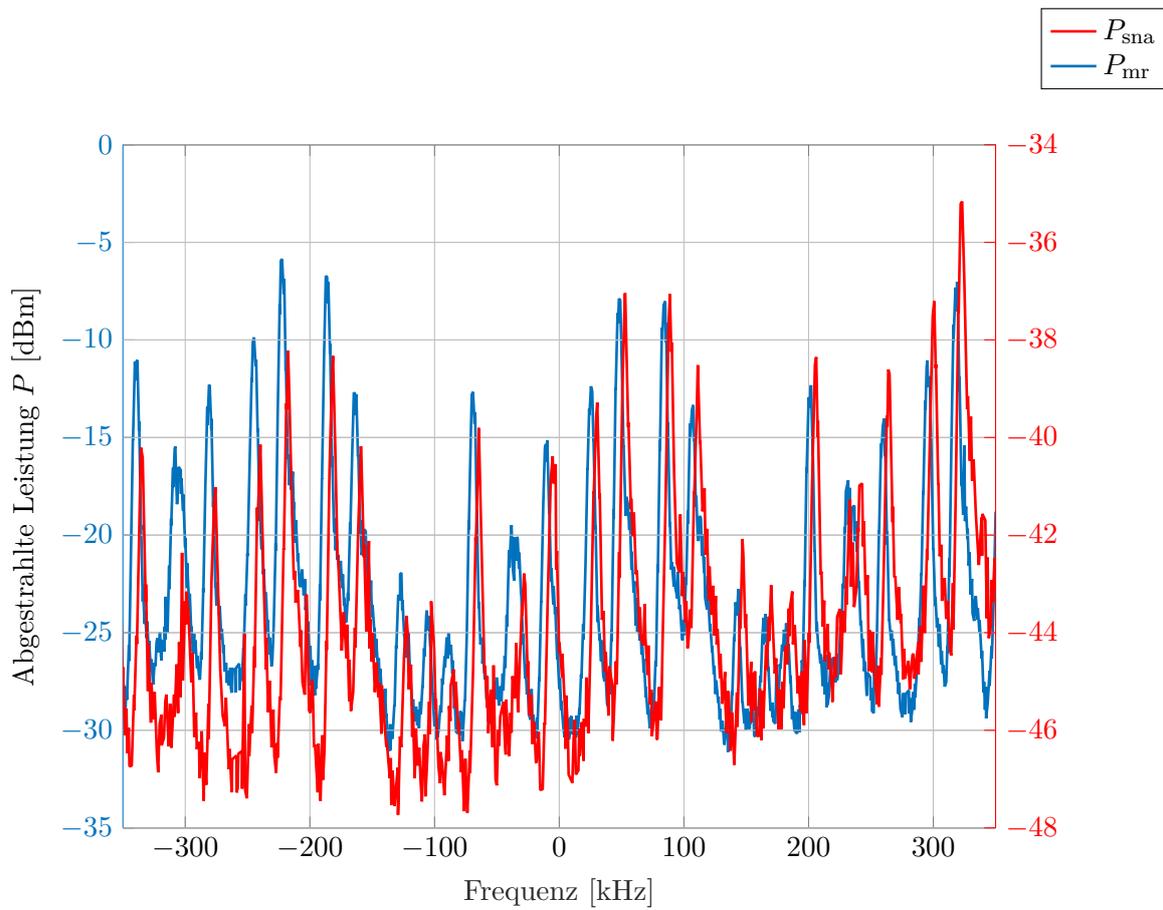
Die Prüfmethode basiert dabei auf der Modenverwirbelungskammer (MVK). In dieser sorgt ein sogenannter Modenrührer für eine statistisch isotrope und homogene Feldverteilung. Zudem kann die abgestrahlte Leistung der Geräte direkt gemessen werden. Das Prinzip dieser Prüfmethode, inklusive Messaufbau wurde auf die MR-Schirmkabine übertragen. In dieser herrschen spezielle Anforderungen, weshalb der Antrieb der Rührer pneumatisch betrieben wird. Die Grundlage des Setups zur Messung der Emission und der Schirmkabinengüte basiert auf dem bandbreitenreduzierten Zeitbereichsverfahren nach Krauthäuser.

Zur Validierung des Testsetups wurde eine Emissionsmessung eines Gerätes zur Mikrowellenablation durchgeführt (siehe Abbildung 3.32). Das aufgenommene Leistungsspektrum wurde dabei mit dem vom MRT gemessenen Spektrum verglichen. Dabei ließ sich eine gute qualitative Übereinstimmung erkennen, woraus sich schließen ließ, dass das Setup geeignet ist, um Störungen am MRT zu prognostizieren.

²⁵ von B. Sc. Bodo Gambal, M. Sc. Enrico Pannicke



(a) Setup zur Emissionsmessung



(b) Leistungsspektrum-Vergleich des Testsetups mit dem MRT

Abbildung 3.32: Testsetup zur Emissionsmessung mit aufgenommenem Leistungsspektrum

Reduzierung von Radiofrequenz-Interferenzen für die MR-geführte Mikrowellenablation²⁶

Mit der Erfindung der modernen medizinischen Bildgebung wurden erstmals bildgeführte minimal-invasive Eingriffe ermöglicht. Bei der Behandlung von Lebertumoren spielt daher die Ablation inzwischen eine große Rolle. Diese Art der Therapie kann bei wenigen kleineren Läsionen als Alternative zum invasiven chirurgischen Eingriff durchgeführt werden. Die Thermoablation basiert auf die Erzeugung von lokal hohen Temperaturen und der damit einhergehenden irreversiblen Zerstörung von Gewebe.

Eine Erhitzung des Gewebes kann beispielsweise mit Hilfe eines Mikrowellenablations-Generators (MWA) durchgeführt werden. Die nicht-invasive Aufnahme von Temperaturkarten mit der Magnetresonanztomographie (MRT) würde eine Echtzeit-Überwachung der thermischen Behandlung ermöglichen. Dies erfordert aber eine rauschfreie MR-Bildgebung. In der Klinik genutzte MWA-Generatoren produzieren jedoch Radiofrequenz-(RF)-Interferenzen, die die Bildgebung stören und die Überwachung erschweren.

Eine Möglichkeit, diese Störungen des Generators zu reduzieren und damit die Bildgebung zu verbessern, stellen sogenannte Klappferrite dar. Sie werden um das Mikrowellenkabel geklemmt und können dadurch die vom Kabel abgestrahlten Störungen dämpfen. Da diese Ferrite ferromagnetische Eigenschaften aufweisen, muss darauf geachtet werden, dass sie nicht zu nah an das Magnetfeld des Magnetresonanztomographen gebracht werden. Ein Schirmgeflecht aus Kupfer stellt eine weitere Möglichkeit zur Reduzierung der vom Kabel ausgehenden Störungen dar. Dieses wird über die gesamte Länge des Mikrowellenkabels angebracht.

Werden keine Maßnahmen zur Unterdrückung von RF-Interferenzen getroffen, weisen die MRT-Bilder ein hohes Rauschen auf (siehe Abbildung 3.33b). Dies zeigten Experimente mit einem klinisch zugelassenen MWA-Generator im Standby-Modus. Gegenüber einer Referenz-Messung (siehe Abbildung 3.33a) wurde ein Verlust des Signal-Rausch-Verhältnisses (SNR) von etwa 91 % gemessen. Nach Anbringen von sieben Klappferriten und einem Kupfer-Schirmgeflecht am Kabel wurde der SNR-Verlust auf etwa 60 % reduziert (siehe Abbildung 3.33c).

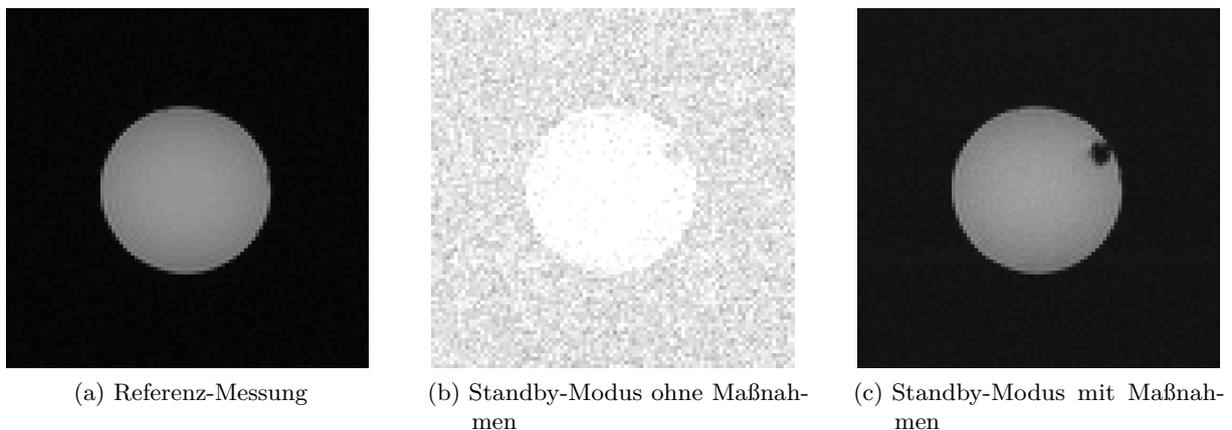


Abbildung 3.33: MRT-Bilder der Referenz-Messung sowie der Messung mit und ohne Entstör-Maßnahmen im Standby-Modus des Mikrowellenablationsgenerators

²⁶ von B. Sc. Karen Meyer zu Hartlage, B. Sc. cand. Joaquin Löning, M. Sc. Thomas Gerlach, M. Sc. Enrico Pannicke, Dr. Bennet Hensen

Effiziente Berechnung der Einkopplung und Abstrahlung durch elektrisch große Aperturen mit elektrisch langem Leiter im Inneren von Hohlraumresonatoren²⁷

Die ungewollte Einkopplung elektromagnetischer Felder durch Aperturen in Gehäuse und anschließend in innere Strukturen wird aufgrund steigender Taktraten zukünftig immer häufiger auftreten. Es ist daher unerlässlich, effiziente Berechnungsverfahren zu entwickeln, da übliche numerische Verfahren eine hohe Anzahl von Unbekannten benötigen. Vorteilhaft sind hier analytische Verfahren, die allerdings häufig auf die Behandlung elektrisch kleiner Aperturen und Leiter beschränkt sind. In dieser Arbeit wird dieser analytische Ansatz für einfache elektrisch große Aperturen und erstmalig unter der Berücksichtigung elektrisch großer Beladungen der Hohlraumresonators verallgemeinert.

Da im Inneren des Resonators eine starke Rückwirkung des abgestrahlten Feldes auf die erzeugenden Quellen vorliegt, muss dabei auch die Rückwirkung der gestrahlten Felder auf die Quellen berücksichtigt werden. Dazu wird das Problem mit Hilfe eines Regularisierungsansatzes in eine Nah- und eine Fernwechselwirkung zerlegt. Die Wirkung der Apertur wird durch einen äquivalenten magnetischen Strom modelliert und so auf das Problem vieler gekoppelter, elektrisch kleiner Aperturen zurückgeführt.

Das Ergebnis ist eine Koppel-Matrix aller elektrisch kleinen Elemente, deren Einträge analytisch und damit sehr effizient, bestimmt werden können. Das Verfahren, benannt als Method of Small Scatterer (MSS), wurde an Beispiel einer spezifischen Geometrie (siehe Abbildung 3.34) erläutert und durch einen Vergleich mit numerischen Ergebnissen verifiziert (J. Petzold und R. Vick, „Effiziente Berechnung der Einkopplung durch elektrisch große Aperturen in elektrisch lange Leiter im Inneren von Hohlraumresonatoren“, in *Internationale Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit*, H. Garbe, Hrsg., Köln: Apprimus Verlag, Wissenschaftsverlag des Instituts für Industriekommunikation und Fachmedien an der RWTH Aachen, März 2020, S. 171–178, ISBN: 978-3-86359-826-6).

Dieses Verfahren kann für verschiedene Anregungen genutzt werden. So ist es beispielsweise auch möglich, die Abstrahlung durch elektrisch große Aperturen, angeregt durch aktive, elektrisch große Dipole im Inneren des Gehäuses, zu berechnen (J. Petzold und R. Vick, „Efficient Calculation of the Radiation by an Electrically Large Slot in a Rectangular Cavity“, in *International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE)*, Paper Number 220, Rom, Italien, Sep. 2020, S. 5, ISBN: 978-1-7281-5579-1).

Netzwerkmodelle für geschirmte Kabel²⁸

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 Netzwerksimulationsprogrammen 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.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Netzwerkmodelle für geschirmte Leitungen basierend auf Leitungstheorie entworfen, die die Kopplung zwischen dem Außen- und Innenbereich des Schirmes

²⁷ von Dr.-Ing. Dipl.-Phys. Jörg Petzold

²⁸ von M. Sc. Moustafa Raya

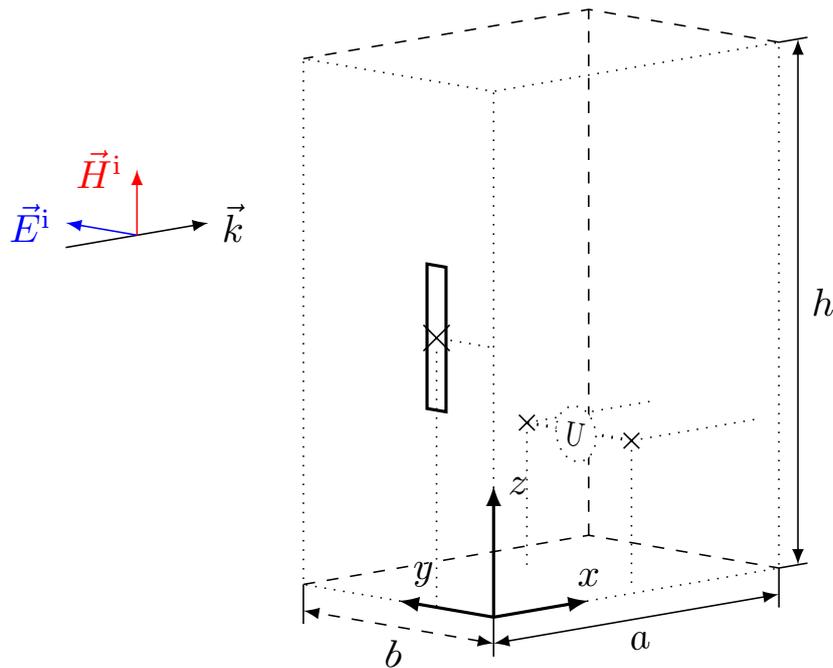


Abbildung 3.34: Geometrie einer geschlitzten, quaderförmigen Apertur. Im Inneren befindet sich ein elektrisch großer Dipol. Die Anregung wird entweder durch ein äußeres, einfallendes Feld oder eine Spannungsquelle am Dipol realisiert.

und umgekehrt berücksichtigen. Damit sind sie für eine netzwerkbasierende Systemanalyse geeignet. Die entworfenen Netzwerke können die induzierten Spannungen aufgrund einfallender ebener Wellen berechnen und eine leitungsgebundene EMV-Analyse im Frequenz- und Zeitbereich durchführen. Die Modelle können sowohl Einzelkoaxialkabel als auch geschirmte Mehrfachleiter repräsentieren.

Ein Simulationsbeispiel für ein abgeschirmtes Kabel unter Berücksichtigung der Feldkopplung ist in Abbildung 3.35 dargestellt. Eine gepulste ebene Welle mit dem Einfallswinkel θ und dem elektrischen Feld \vec{E}^i bestrahlt das Kabel. Die über D_1 induzierte Störspannung des internen Systems ist in Abbildung 3.36 dargestellt. Die Validierung erfolgt durch Vergleich der Ergebnisse mit der Simulationssoftware CST.

Kompetenzzentrum eMobility - Gesamtfahrzeug²⁹

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. Hierzu werden u. a. Netzwerkmodelle für das

²⁹ von M. Sc. Moustafa Raya

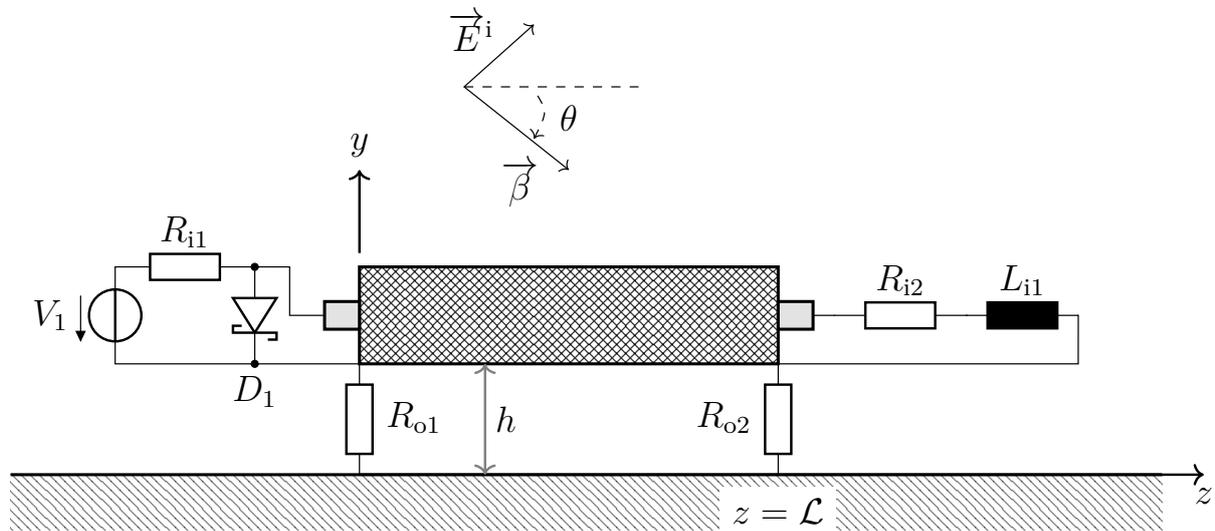


Abbildung 3.35: Simulationsbeispiel der geschirmten Leitung.

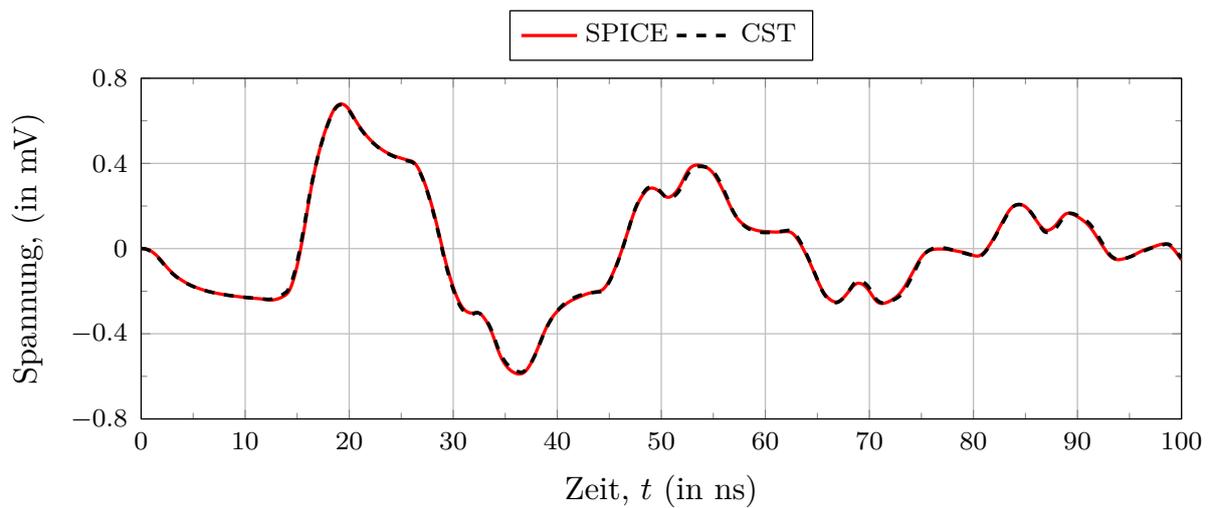


Abbildung 3.36: Simulationsergebnisse der geschirmten Leitung

EMV-Verhalten von Traktionsbatterien erstellt. Dies ist von großer Bedeutung, für die unmittelbare Anwendbarkeit der erzielten Ergebnisse in realen Systemen. Die Modelle werden bereits für einzelne Zellen entwickelt, wie in Abbildung 3.37 zu sehen ist. Hier wird eine Impedanzmessung mit einem Impedanzanalysator durchgeführt. Die Messergebnisse im Vergleich zu denen der Simulation sind in Abbildung 3.38 dargestellt.



Abbildung 3.37: Messaufbau einer Batteriezelle

Method of Modal Parameters for the Thin-Wire Open-Circuit Wiring Structures and the Singularity Expansion 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 into the physics of coupling phenomena, especially in time domain. In contrast, the analytical singularity expansion method (SEM) represents the scattering objects as a set of oscillators, thus giving a physically transparent tool for the description of the coupling phenomena, both in frequency and time domain. The set of SEM poles yields the main contribution for the response function (functional) of the transmission line to the excitation. It also defines the scattering amplitude, response in the time domain, etc. Studies of SEM poles were carried out earlier by analyzing the results of numerical calculations using the Method of Moments (NEC), or using approximate analytical methods for long horizontal wires above ground. Recently, we have proposed to use the previously developed method of modal parameters (MoMP) for the analysis of poles in short-circuited wire structures of arbitrary geometric shape.

In this work, we apply the method of modal parameters for investigation of SEM poles of open-circuit wires. The main accent is done for investigations of pieces of symmetrical wire structures: a straight finite wire in free space, a straight finite wire parallel to a PEC ground, a circle arc and a helix segment. The symmetry of these structures allows a fast calculation of matrix elements in the MoMP, especially for the straight wire where one can obtain explicit analytical result and investigate poles of high layers. The investigation has shown that the real part of the SEM poles for a finite straight wire in free space, a finite straight wire above a ground

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

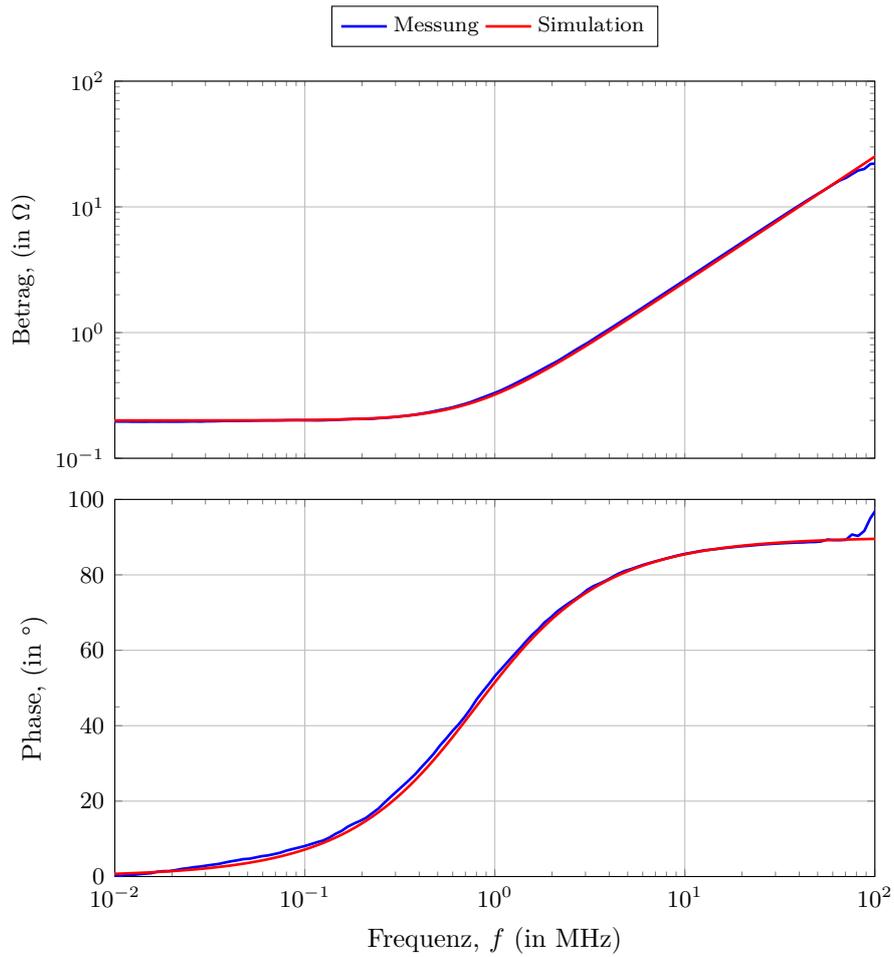


Abbildung 3.38: Impedanzmessung und Simulation einer Batteriezelle

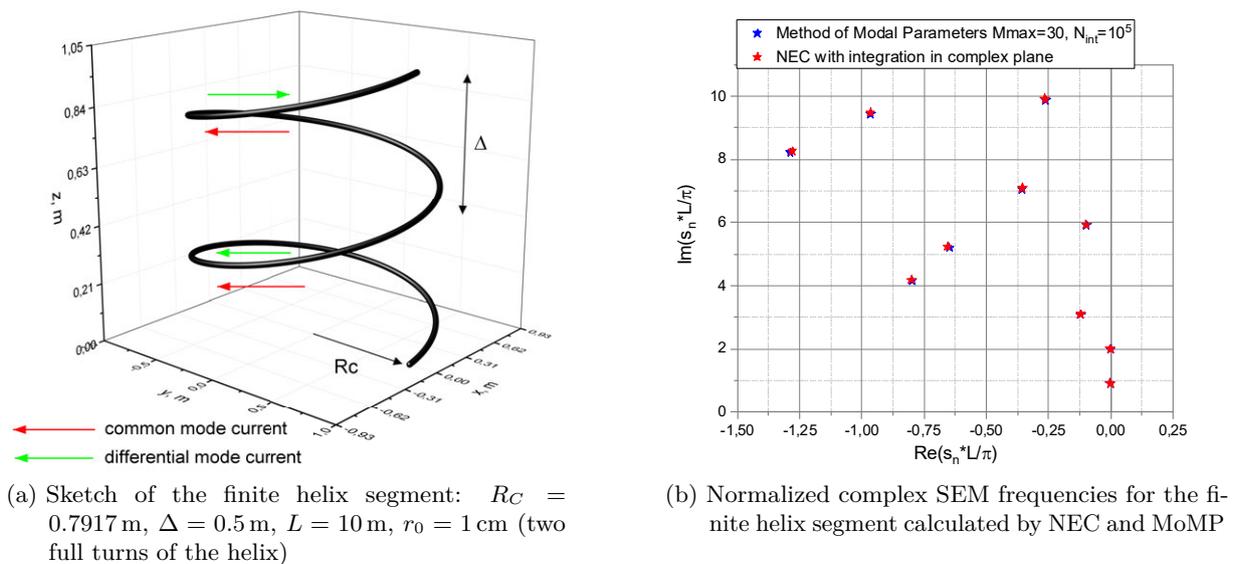


Figure 3.39: Method of modal parameters for the thin-wire open-circuit wiring structures and the singularity expansion method

plane and a circular arc wire increases monotonically with increasing the number of the pole. In contrast, for a large segment of the helix wire (see Fig. 3.39a), a more complex dependence of the real part of the SEM pole on its number n is observed (see Fig. 3.39b). This is due to the fact that for some numbers n of the pole there are effective „common modes“ of the current, which corresponds to strong radiation and a large real part of the SEM poles, and for some n there are effective „differential modes“, which corresponds to weak radiation and a small real part of the SEM poles.

The Regge Method for the Semi-circular Loop Above Ground³¹

One of the main problems in electromagnetic compatibility is an analysis of electromagnetic field coupling with wiring structures, which have a number of applications. To solve this problem usually direct numerical methods are used, e. g. the method of moments. However, these methods do not allow deep research into the physical essence of the problem under consideration. This can only be achieved by using analytical or semi-analytical methods. The exact analytical solutions that are possible for structures with high symmetry are important: an infinite straight wire, a circular wire, a helix wire and their combinations that keep symmetry, for example, an infinite straight wire over an PEC surface. Here, we consider a circular half-loop perpendicular to the PEC ground. This structure is the only finite wiring structure for which there is an exact solution to the mixed-potential integral equations. This solution can be obtained by Fourier series for any type of excitations, including distributed excitations (e. g. by an external plane wave) or lumped excitations (e. g. by a voltage source). The solution for the lumped excitation is especially important because it is a Green's function for the current and yields the solution for a loaded wire.

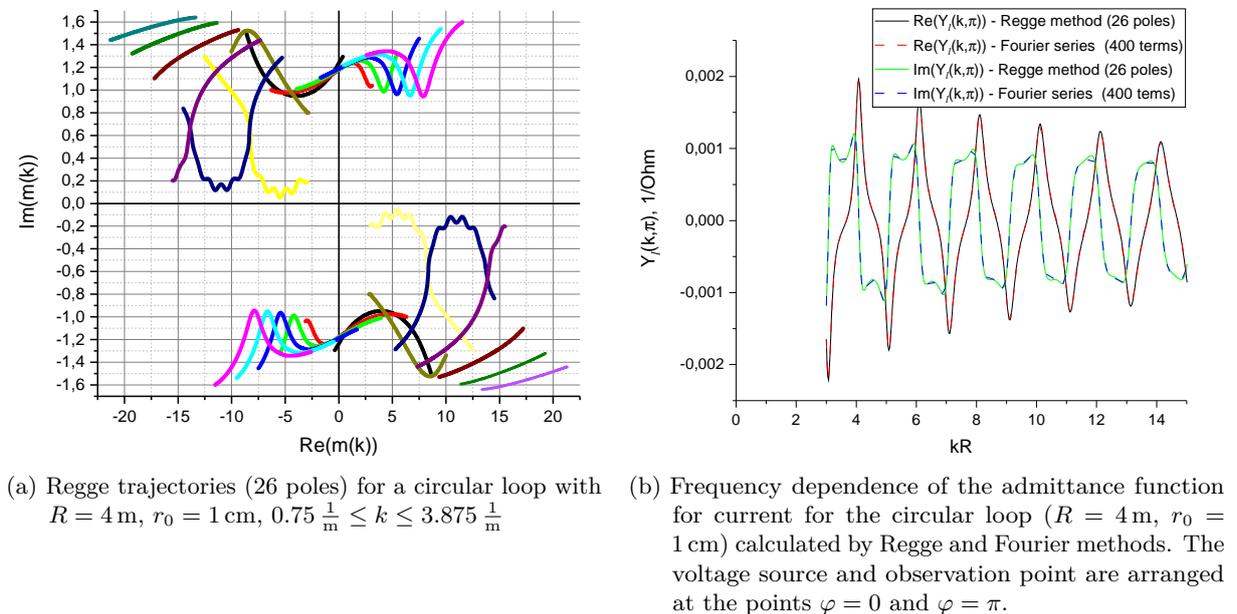


Figure 3.40: Method of modal parameters for the thin-wire open-circuit wiring structures and the singularity expansion method

To obtain this solution with appropriate accuracy, one has to use 100 to 400 terms in the Fourier series. In our previous paper, we have shown, how to simplify this Fourier solution and, using the phenomenological physical method, approximately obtained the main term of the current excited

³¹ von Dr. rer. nat. Sergey Tkachenko, M. Sc. Felix Middelstädt und Prof. Dr.-Ing. Ralf Vick

by lumped source. This current is analog of TEM mode excited by a lumped source in the infinite straight wire above a PEC ground. In this work we use the Watson-Regge transformation and represent the Fourier sum as an integral in the complex plane of the parameter m , which is an integer in the classical Fourier solution. 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, in analogue with scattering theory in quantum mechanics. The positions of the poles on the complex plane depend on the frequency and form so called Regge trajectories (see Fig. 3.40a). The sum over the Regge poles is an exact solution of the problem and equals the sum of Fourier series (see Fig. 3.40b). The term corresponding to the pole with the smallest imaginary part coincides with the phenomenological solution. Moreover, after some manipulation on this term, one can obtain the SEM poles of the first layer for the wiring structure.

Numerische Simulation der Einkopplung transienter elektromagnetischer Felder in nichtlinear-abgeschlossene Leitungsnetzwerke mit einem SPICE-Netzwerksimulator³²

Die Einkopplung externer elektromagnetischer Felder in Versorgungs-, Verbindungs- und Kommunikationskabel bestimmt maßgeblich die gestrahlte Störfestigkeit der daran angeschlossenen Systeme und Baugruppen. Kabelbäume können dabei als Leitungsnetzwerke modelliert werden, auf denen durch Feldeinkopplung angeregte Strom- und Spannungswellen entlang der Einzelleitungen propagieren und an Knotenpunkten sowie Abschlüssen transmittiert bzw. reflektiert werden.

Häufig sind Leitungsenden mit nichtlinearen Halbleiterbauelementen abgeschlossen, z. B. als Überspannungsschutz. Deren Berücksichtigung erfordert eine Simulation im Zeitbereich. Dabei können die als verlustarm angenommenen Leitungen als Kette von L - C -Gliedern modelliert werden, siehe Abbildung 3.41. Das einfallende Feld einer ebenen Welle wird entsprechend der Agrawal-Formulierung als verteilte Spannungsquellen entlang der Leitung und als konzentrierte Spannungsquellen an den Leitungsenden wirksam.

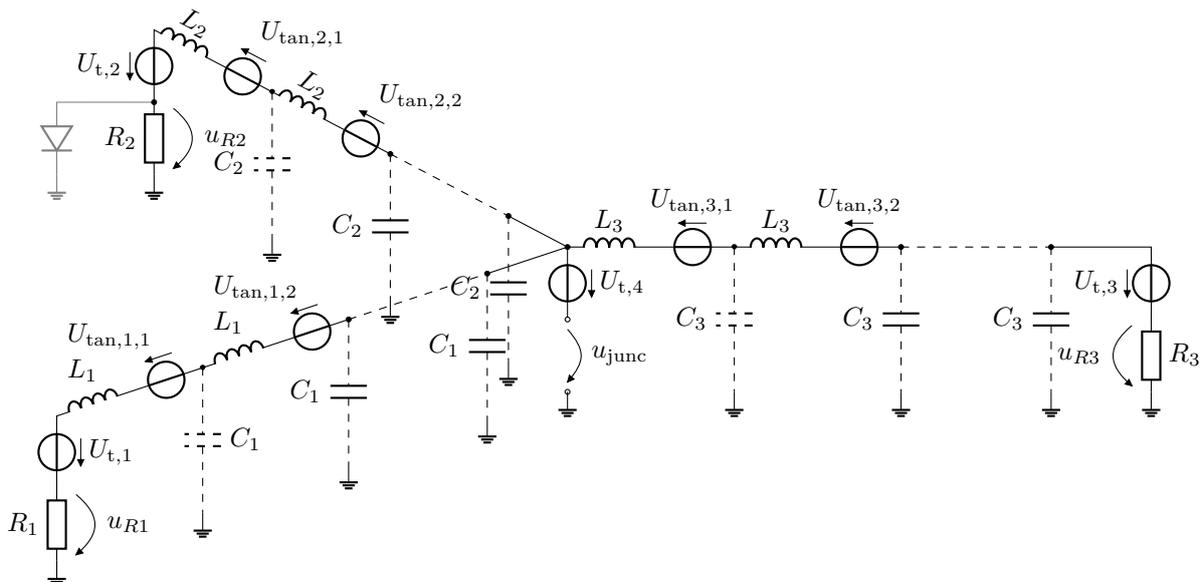


Abbildung 3.41: Ersatzschaltbild eines beispielhaften, nichtlinear-abgeschlossenen Leitungsnetzwerks aus drei Leitungen mit einem gemeinsamen Knotenpunkt

³²von Dr.-Ing. Mathias Magdowski

Bei der transienten Simulation müssen diese Quellen $U_{\text{tan},m,n}$ an der n -ten Position der m -ten Leitung sowie die Quellen $U_{\text{t},o}$ am o -ten Abschluss bzw. Knotenpunkt des Netzwerks mit der je nach Einfallrichtung und Polarisation skalierten und zeitlich verschobenen Zeitfunktion des Feldes beaufschlagt werden. Dazu können die Quellen z. B. in einer Numeriksoftware wie MATLAB sehr einfach berechnet und direkt in einem ebenfalls in MATLAB programmierten Netzwerksimulator auf Basis der modifizierten Knotenspannungsanalyse zur Simulation des Leitungersatzschaltbildes benutzt werden. Nachteilig ist dabei die komplexe Umsetzung nichtlinearer Lasten. Eine ideale Diode entsprechend der Shockley-Gleichung lässt sich noch vergleichsweise einfach berücksichtigen. Praktischere Dioden- und Transistormodelle, die mehr halbleiterphysikalische Eigenschaften beinhalten, sind jedoch deutlich komplexer in der Umsetzung.

Die in diesem Projekt entwickelte Idee ist, vorhandene SPICE-basierte Netzwerksimulatoren für die transiente Simulation der Feldeinkopplung in ein Leitungsnetzwerk zu nutzen. Die entsprechenden Netzlisten mit den zahlreichen unterschiedlichen Spannungsquellen werden anhand der Simulationsparameter automatisiert aus MATLAB heraus erstellt. Vorteilhaft ist dann die Nutzbarkeit der großen Fülle an vorhandenen und teilweise proprietären Halbleiterbauelementbibliotheken sowie die Möglichkeit der automatischen Zeitschrittwahl zur besseren Effizienz und Konvergenz der numerischen Lösung.

Im Projekt wurde erstmalig ein numerisches Simulationsverfahren für die transiente Feldeinkopplung pulsformiger ebener Wellen in Leitungsnetzwerke mit nichtlinearen Abschlüssen entwickelt, das auf üblichen SPICE-kompatiblen Netzwerksimulatoren basiert. Gegenüber ähnlichen vorhandenen Verfahren sind viele weitere Halbleiterbauelementmodelle nutzbar. Weiterhin wird die Effizienz und numerische Stabilität des Simulationsverfahrens erhöht.

Field Homogeneity and Isotropy Analysis of a Reverberation Chamber Equipped with a Pair of Hemispherical Diffractors³³

In order to analyze the possible improvement of field homogeneity and isotropy by two additional copper hemispheres mounted on the wall and floor of a reverberation chamber (see Fig. 3.42), the electric field strength has been measured at eight positions in the working volume of the chamber. The measurement has been carried out over wide frequency range using fast field sensors. The experimental results are analyzed in terms of the standard validation procedure for an empty reverberation chamber according to Annex B of the IEC 61000-4-21 as well as to the field anisotropy coefficients defined in Annex J of this standard. The results show that the copper hemispheres hardly improve the field uniformity and slightly lower the quality factor of the chamber.

Analytische Näherung des Reflexionskoeffizienten mit Hilfe der Induced-EMF-Methode³⁴

Der Reflexionskoeffizient von Leitungsabschlüssen spielt in vielen praktischen Anwendungen eine große Rolle. In der Regel versucht man Reflexionen bei der Signalübertragung zu vermeiden, um Störungen möglichst gering zu halten.

Die klassische Leitungstheorie liefert einen bekannten Ausdruck für den Reflexionskoeffizienten in Abhängigkeit der Abschlussimpedanz und der charakteristischen Impedanz der Leitung. Die klassische Leitungstheorie betrachtet jedoch nur transversal elektromagnetische (TEM) Moden. Diese Einschränkung ist für kleine Frequenzen bzw. große Wellenlängen verglichen mit den transversalen Abmessungen der Leitung legitim und liefert genaue Ergebnisse. Die

³³ von Dr.-Ing. Mathias Magdowski

³⁴ von M. Sc. Felix Middelstädt



Figure 3.42: Measurement setup with copper hemispheres on the wall and the floor of a reverberation chamber with dimensions of $5.3\text{ m} \times 3.7\text{ m} \times 3\text{ m}$

Datenraten und Signalfrequenzen werden jedoch in vielen Anwendungsgebieten größer und andere Lösungsverfahren werden benötigt.

Einfach zu bedienende numerische Löser liefern für beliebige Leitungsgeometrien Zahlenwerte, die interpretiert werden können. Man erhält aber selten einen tieferen Einblick in die physikalischen Vorgänge, die im Hintergrund ablaufen. Daher wurde in der Vergangenheit eine analytische, iterative Methode entwickelt, die die klassische Leitungstheorie für höhere Frequenzen erweitert. Die Methode liefert relativ genaue Ergebnisse und enthält Informationen über die höheren Moden (neben dem TEM-Mode). Die Leitungsgeometrie am Port ist ebenfalls in der Lösung beinhaltet.

Aus theoretischer Sicht ist die Einordnung der neuen iterativen Methode interessant. Die Frage, die sich dabei stellt ist: Ist die iterative Methode einzigartig oder können die gleichen Ergebnisse auch mit anderen bekannten Methoden gefunden werden? In diesem Projekt wurde gezeigt, dass die relativ bekannte Induced-EMF-Methode das gleiche analytische Ergebnis für den Reflexionskoeffizienten liefert. Als Zwischenergebnis wurde der Reflexionskoeffizient mit der Eingangsimpedanz allgemein verknüpft.

Sicherung der Versorgungsqualität durch optimierten Einsatz verteilter, aktiver Oberschwingungsfiler in Verteilnetzen (SiQuaNetz)³⁵

Netzurückwirkungen, die ihre Ursache in der Ausbreitung von nicht-sinusförmigen Strömen haben, können zu negativen Beeinflussungen wie vorzeitigem Altern, einer verminderten Betriebsfähigkeit oder gar der Zerstörung von Betriebsmitteln und Endgeräten führen. Aufgrund der Zunahme leistungselektronischer Schaltungen sowie der Abnahme großer Kraftwerksleistungen im elektrischen Netz stellt der Umgang mit einer beschleunigten Zunahme von Netzurückwirkungen eine große Herausforderung für die Stabilisierung der Energieversorgung dar. Eine etablierte Möglichkeit zur Reduktion von nicht-sinusförmigen (auch Oberschwingungsbehafteten) 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

³⁵ von M. Sc. Benjamin Hoepfner

Verbrauchern kann eine Stromkompensation jedoch auch zu einer Verschlechterung der Spannung am Anschlusspunkt des Verbrauchers/Filterns führen.

In dem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten und mit mehreren Partner durchgeführten Verbundprojekt *SiQuaNetz*, wird ein neuartiger Ansatz zur Eindämmung von Netzrückwirkungen 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 dabei zu stabilisieren, Oberschwingungen zu kompensieren und Resonanzen zu minimieren. Dabei sollen mehrere Filter Kommunikationslos innerhalb eines Systems gleichzeitig so agieren, dass sie sich die notwendige Kompensationsleistungen aufteilen. Die Abbildung 3.43 soll dieses Prinzip verdeutlichen.

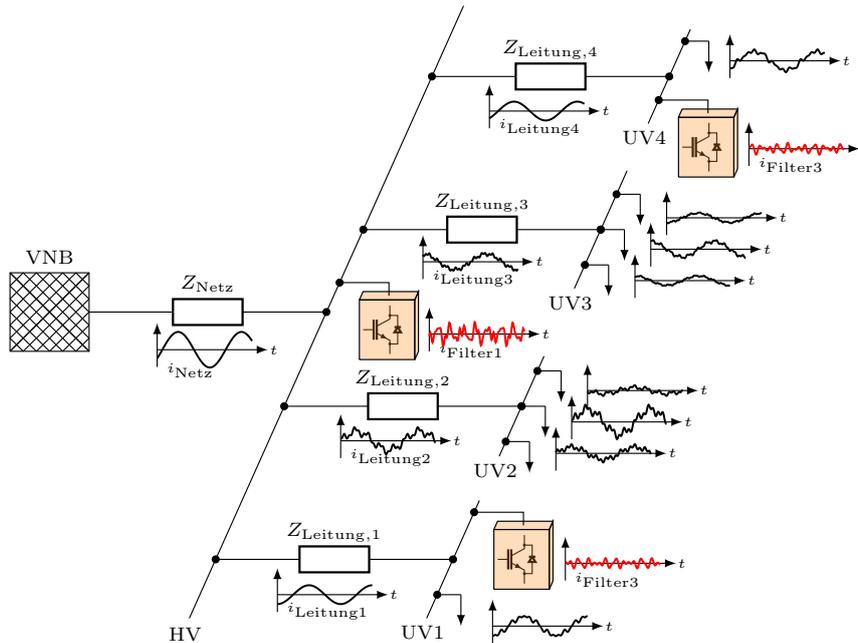


Abbildung 3.43: Prinzipdarstellung verteilter OberschwingungsfILTER

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

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Störfestigkeitsuntersuchungen von zivilen Drohnen gegen elektromagnetische Strahlung³⁶

Unbemannte Luftfahrzeuge (Drohnen) waren lange Zeit dem Militär vorbehalten. Der Preisverfall und die steigenden technischen Möglichkeiten von Elektronik und Sensorik haben zu einer Vielzahl an zivil verfügbaren elektromotorisch betriebener Drohnen geführt, deren Einsatzgebiete sich u. a. von Foto- und Videoaufnahmen über Such- und Rettungsaktionen bis zur Frachtzustellungen erstrecken. Mit diesem Wachstum nehmen Zwischenfälle an kritischen Infrastrukturen wie z. B. Flughäfen stark zu.

Als Reaktion darauf haben mehrere Länder neue Regulierungen für den zivilen Luftraum erlassen. Das Risiko krimineller bzw. terroristischer Nutzung sinkt damit allerdings nicht. Für die zivile

³⁶ von Dipl.-Ing. Max Rosenthal

Abwehr dieser Drohnen gibt es aktuell keine zuverlässigen Konzepte. Derzeitige Schutzkonzepte sehen u. a. Abfangdrohnen mit Netzen, Projektile oder abgerichtete Greifvögel vor. Auf dem Markt für Abwehrsysteme existieren auch Systeme, die auf elektromagnetischer Strahlung basieren. Durch breitbandige Störsignale wird dabei die Funkverbindung zwischen Drohne und Basisstation gestört, welche die Drohne in den meisten Fällen zum Landen zwingt. Umfangreiche Untersuchungen zu den Wirkmechanismen elektromagnetischer Strahlung auf zivile Drohnen gibt es bisher nicht.

Aus diesem Grund ist es Ziel der Untersuchung, die Möglichkeiten der effizienten Störung bzw. Zerstörung von Drohnen durch den Einsatz von elektromagnetischen Quellen nachzuweisen. Im ersten Schritt sollen mithilfe von kommerziell erhältlichen Drohnen, wie in Abbildung 3.44 dargestellt, messtechnische Untersuchungen zur Störfestigkeit durchgeführt werden, um kritische Frequenzen und Feldstärken zu ermitteln, bei denen die Funktionsfähigkeit der Drohnen eingeschränkt wird. Anhand dieser Daten sollen Störmechanismen identifiziert und elektromagnetische Einkopplungspfade näher untersucht werden.



Abbildung 3.44: Beispielhafte Drohne für die Untersuchung der Störfestigkeit gegen elektromagnetische Strahlung

3.3.3 Promotionen

Dr.-Ing. Jörg Petzold: Analytische Beschreibung der Kopplung elektromagnetischer Felder durch Aperturen in Resonatoren

Gutachter:

- Prof. Ralf Vick, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
- Prof. Frank Gronwald, Universität Siegen

verteidigt am 27. Januar 2020 an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (siehe Abbildung 3.45)

Die Dissertation baut auf den Grundlagen der elektromagnetischen Feldtheorie eine neue Systematik zur Beschreibung der Kopplung elektromagnetischer Felder zwischen verschiedenen Umgebungen auf. Es wird der Halbraum und der quaderförmige Hohlraumresonator, ein Modell für typische Gerätegehäuse, diskutiert. Dabei wird eine analytische Lösung unter der Einschränkung elektrisch kleiner Aperturen hergeleitet und anhand numerischer Verfahren verifiziert.

Anschließend wird das Verfahren für eine einfache elektrisch große Apertur verallgemeinert. Als Ausgangspunkt dient hierbei die Modellierung des eingekoppelten Stromes auf einem elektrisch dünnen, langen und geraden Draht. Die Integralgleichung für das elektrische Feld wird auf eine neuartige Weise durch ein Diskretisierungsverfahren gelöst. Eine der Besonderheiten der sich



Abbildung 3.45: Gratulation an Jörg Petzold am Otto-von-Guericke-Denkmal

durch die Diskretisierung ergebenden Matrixgleichung gegenüber üblichen Lösungsverfahren ist die analytische und damit sehr schnelle Bestimmung aller Matrixelemente.

Das Verfahren wird anschließend auf einen langen dünnen Schlitz in einem Hohlraumresonator übertragen. Weiterhin wird die Gesamtmatrix in Nah- und Fernwechselwirkungen separiert. Somit können verschiedene Abstrahlungsumgebungen vergleichsweise einfach berücksichtigt werden. Untersuchungen des Fernfeldes des Schlitzes zeigen, dass es möglich ist, den Einfluss der inneren Hohlraumresonanzen auf das äußere Feld effizient zu berechnen (siehe Abbildung 3.46).

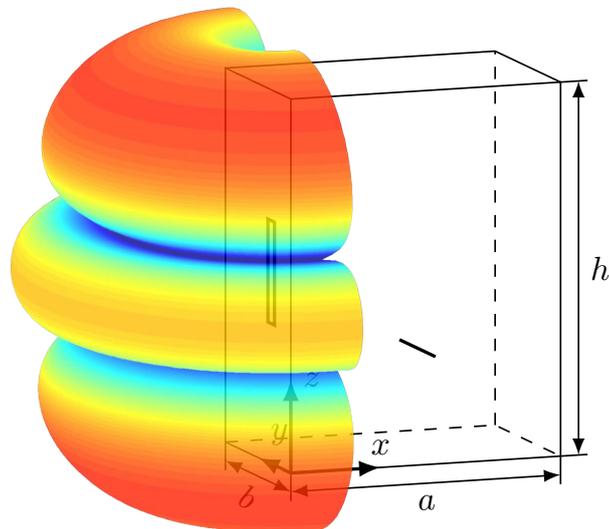


Abbildung 3.46: Abstrahlung eines elektrisch langen Schlitzes in einem quaderförmigen Hohlraumresonator

3.3.4 Veröffentlichungen

Zeitschriften- und Konferenzbeiträge

- [1] M. Magdowski, „Personalisierte Aufgaben und passende Musterlösungen zu den Grundlagen der Elektrotechnik automatisiert mit LaTeX, pgfplots und CircuiTikZ erstellen“, *Die TeXnische Komödie*, Jg. 31, Nr. 4, H. Voß, Hrsg., S. 34–44, Dez. 2019. Adresse: https://archiv.dante.de/DTK/PDF/komoedie_2019_4.pdf.
- [2] J. Petzold und R. Vick, „Effiziente Berechnung der Einkopplung durch elektrisch große Aperturen in elektrisch lange Leiter im Inneren von Hohlraumresonatoren“, in *Internationale Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit*, H. Garbe, Hrsg., Köln: Apprimus Verlag, Wissenschaftsverlag des Instituts für Industriekommunikation und Fachmedien an der RWTH Aachen, März 2020, S. 171–178, ISBN: 978-3-86359-826-6.
- [3] M. Magdowski und R. Vick, „Numerische Simulation der Einkopplung transienter elektromagnetischer Felder in nichtlinear-abgeschlossene Leitungsnetzwerke mit einem SPICE-Netzwerksimulator“, in *Internationale Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit*, H. Garbe, Hrsg., Köln: Apprimus Verlag, Wissenschaftsverlag des Instituts für Industriekommunikation und Fachmedien an der RWTH Aachen, März 2020, S. 179–186, ISBN: 978-3-86359-826-6.
- [4] M. Al-Hamid, N. Aggarwal und R. Vick, „Vergleich zwischen drei Störfestigkeitsmessmethoden an Kfz-Unterbaukomponenten“, in *Internationale Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit*, H. Garbe, Hrsg., Köln: Apprimus Verlag, Wissenschaftsverlag des Instituts für Industriekommunikation und Fachmedien an der RWTH Aachen, März 2020, S. 231–238, ISBN: 978-3-86359-826-6.
- [5] M. Rosenthal, R. T. Jacobs, K. Pasche und E. Suthau, „Rückwirkung von Positioniersystemen auf die Feldverteilung in einer GTEM-Zelle“, in *Internationale Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit*, H. Garbe, Hrsg., Köln: Apprimus Verlag, Wissenschaftsverlag des Instituts für Industriekommunikation und Fachmedien an der RWTH Aachen, März 2020, S. 291–297, ISBN: 978-3-86359-826-6.
- [6] M. Ehses, T. Gerlach, E. Pannicke, R. Müller und R. Vick, „Nutzung von Mantelwellensperren für die MR-geführte Mikrowellenablation“, in *Internationale Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit*, H. Garbe, Hrsg., Köln: Apprimus Verlag, Wissenschaftsverlag des Instituts für Industriekommunikation und Fachmedien an der RWTH Aachen, März 2020, S. 407–412, ISBN: 978-3-86359-826-6.
- [7] B. Hoepfner und R. Vick, „Detektion symmetrischer Oberschwingungskomponenten durch generalisierte Integratoren zweiter Ordnung“, in *Internationale Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit*, H. Garbe, Hrsg., Köln: Apprimus Verlag, Wissenschaftsverlag des Instituts für Industriekommunikation und Fachmedien an der RWTH Aachen, März 2020, S. 491–498, ISBN: 978-3-86359-826-6.
- [8] O. Cleyne, G. Santa-Maria, M. Magdowski und D. Thévenin, „Peer-graded individualized student homework in a single-instructor undergraduate engineering course“, *Research in Learning Technology*, Jg. 28, Mai 2020. DOI: 10.25304/rlt.v28.2339.
- [9] M. Magdowski, „Personalisierbare Aufgaben und anonymer Peer Review mit Erklärvideos als Einreichung – Wie kann man Bulimielernen verhindern, kontinuierliche Mitarbeit fördern und zeitnahe sowie individuelle Rückmeldung ermöglichen?“, in *So gelingt E-Learning! – Reader zum Higher Education Summit 2019*, München: Pearson Deutschland GmbH, Juli 2020, S. 98–105, ISBN: 978-3-8632-6309-6. Adresse: <https://www.pearson-studium.de/cp-so-gelingt-e-learning-epdf.html>.

- [10] J. Petzold und R. Vick, „Efficient Calculation of the Radiation by an Electrically Large Slot in a Rectangular Cavity“, in *International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE)*, Paper Number 220, Rom, Italien, Sep. 2020, S. 5, ISBN: 978-1-7281-5579-1.
- [11] M. Raya, M. Magdowski und R. Vick, „SPICE-Based Lumped Circuit Model of Shielded Cables for EMC Analyses“, in *International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE)*, Paper Number 227, Rom, Italien, Sep. 2020, S. 5, ISBN: 978-1-7281-5579-1.
- [12] R. Vick, J. Petzold, M. Rosenthal und J. Kasper, „Investigation of Emission Requirements above 1 GHz towards 5G“, in *International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE)*, Paper Number 377, Rom, Italien, Sep. 2020, S. 8, ISBN: 978-1-7281-5579-1.
- [13] M. Magdowski, E. Suthau, K. Pasche, R. T. Jacobs und R. Vick, „Field Homogeneity and Isotropy Analysis of a Reverberation Chamber Equipped with a Pair of Hemispherical Diffractors“, in *International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE)*, Paper Number 381, Rom, Italien, Sep. 2020, S. 6, ISBN: 978-1-7281-5579-1.
- [14] 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*, S. 4, 2020, ISSN: 2637-6423. DOI: 10.1109/LEMCPA.2020.3020751.
- [15] M. Raya und R. Vick, „SPICE Models of Shielded Single and Multiconductor Cables for EMC Analyses“, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Jg. 62, Nr. 4, S. 1563–1571, Aug. 2020, ISSN: 1558-187X. DOI: 10.1109/TEMC.2020.3006391.
- [16] T. Gerlach, J. Alpers, E. Pannicke, C. Hansen, O. Speck und R. Vick, „Power Control for an MRI Ablation Hybrid System“, in *Proceedings of the 2020 ISMRM & SMRT Virtual Conference and Exhibition*, 2020.
- [17] R. Kowal, M. Prier, E. Pannicke, S. Röhl, R. Vick und O. Speck, „From PCB to Simulation: A Workflow Instruction for Designing Birdcage Models from Production Data“, in *ESMRMB 2020 Online, 37th Annual Scientific Meeting*, 2020, S. 163–164. DOI: 10.1007/s10334-020-00876-y.
- [18] R. Kowal, M. Prier, E. Pannicke, T. Gerlach, S. Röhl, R. Vick und O. Speck, „Specific Absorption Rate in a Dedicated Birdcage Coil for Nenoatal MRI“, in *ESMRMB 2020 Online, 37th Annual Scientific Meeting*, 2020, S. 40–41. DOI: 10.1007/s10334-020-00874-0.

Dissertationen und Bücher

- [1] J. Petzold, *Analytische Beschreibung der Kopplung elektromagnetischer Felder durch Aperturen in Resonatoren*, 1. Aufl., Ser. Res Electricae Magdeburgenses 80. Magdeburg: Lindemann, A. u. a., 2020, ISBN: 978-3-944722-91-7.

Beiträge zu Kolloquien u. a. Vorträge

- [1] M. Magdowski, „Personalisierbare Aufgaben und anonymer Peer Review“, in *MatheMINT-Webinarreihe – Mathematik in den MINT-Fächern: Kreative Lehr-Lern-Konzepte digital umgesetzt*, Leibniz-Universität Hannover, Dez. 2019. Adresse: <http://www.ecult.me/personalisierte-aufgaben-und-anonymer-peer-review/>.
- [2] M. Magdowski, „Personalisierbare Aufgaben und anonyme Peer Reviews“, in *Webinarreihe "Lehrimpulse aus den Verbundhochschulen Sachsen-Anhalts"*, Netzwerk digitale Hochschullehre, Jan. 2020. Adresse: <https://www.youtube.com/watch?v=nFxohjyscRc>.

- [3] M. Magdowski, „Personalised Tasks and Anonymous Peer Grading“, in *Transforming Assessment Webinar Series*, Apr. 2020. Adresse: http://transformingassessment.com/events_1_april_2020.php.
- [4] M. Magdowski, „Personalisierbare Aufgaben & anonymer Peer Review“, in *Hochschuldidaktische Workshops des Zentrums für Lehre und Lernen (ZLL)*, Technische Universität Hamburg (TUHH), Juli 2020. Adresse: <https://www.slideshare.net/MathiasMagdowski/zllworkshop-an-der-tuhh-personalisierbare-aufgaben-und-anonymer-peer-review>.
- [5] M. Magdowski. (März 2020). „Tipps zur Online-Lehre in der Corona-Krise an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg“, Adresse: <https://youtu.be/e0kVn-ja6uU>.
- [6] M. Magdowski, „Wie kann man pragmatische und effiziente Prüfungen für die Online-Lehre entwickeln?“, in *Tage der digitalen Lehre*, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Mai 2020. Adresse: <https://www.slideshare.net/MathiasMagdowski/wie-kann-man-pragmatische-und-effiziente-prufungen-fr-die-onlinelehre-entwickeln>.
- [7] M. Magdowski, „EMC Professional Talk – EMC Measurements in Reverberation Chambers“, in *Technical Teleconference of the Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Germany Section Electromagnetic Compatibility (EMC) Society Chapter*, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Juli 2020. Adresse: <https://www.slideshare.net/MathiasMagdowski/emc-measurements-in-reverberation-chambers>.
- [8] M. Magdowski, „Und was machen Sie so? – Wissenschaftskommunikation außerhalb Akademia“, in *Workshops für das Wissenschaftsmanagement*, Personalentwicklung/Recruiting der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Online-Workshop über Zoom, Aug. 2020. Adresse: <https://www.slideshare.net/MathiasMagdowski/und-was-machen-sie-so-wissenschaftskommunikation-auerhalb-akademia>.
- [9] H. Steinbeck und M. Magdowski, „Bit-Gespräch: Fails, Erfolge und Semesterresümee“, in *gudeEducation*, Sep. 2020. Adresse: <https://youtu.be/4gFnafewNZU>.
- [10] H. Steinbeck und M. Magdowski, „Bit-Gespräch: Onboarding, WiSe is coming, Lerngruppen und Motivation“, in *gudeEducation*, Okt. 2020. Adresse: <https://youtu.be/x7evAUq87fM>.
- [11] H. Steinbeck und M. Magdowski, „Bit-Gespräch: Hagener Manifest, Semester-Start 20/21 und Diverses aus der #digitaleLehre-Filterblase“, in *gudeEducation*, Nov. 2020. Adresse: <https://youtu.be/y9ssrGoa89Q>.
- [12] M. Magdowski und T. Schallschmidt, „Anreize für unterstützende Studierende bei MINT-Workshops“, in *6.MINT.Barcamp unter dem Motto »Nachhaltig vernetzt«!*, Körber-Stiftung, Kehrwieder 12, 20457 Hamburg, Sep. 2020. Adresse: <https://www.slideshare.net/MathiasMagdowski/anreize-fr-untersttzen-de-studierende-bei-mintworkshops>.
- [13] M. Magdowski, „Is there a real distinction between the so-called chaotic chambers and the more traditional reverberation chambers?“, in *Quaestiones Disputatae’ during the virtual ‘International Symposium on Electromagnetic Compatibility’*, Sep. 2020. Adresse: <https://www.slideshare.net/MathiasMagdowski/is-there-a-real-distinction-between-the-socalled-chaotic-chambers-and-the-more-traditional-reverberation-chambers>.
- [14] M. Magdowski, „Ich leuchte mit meiner Diode“, in *Online-Workshop zum intoMINT-Abschluss*, Hochschule Anhalt, Fachbereich Informatik und Sprachen, Projekt intoMINT4.0, Sep. 2020. Adresse: <https://www.slideshare.net/MathiasMagdowski/ich-leuchte-mit-meiner-diode-onlineworkshop-zum-intomintabschluss>.
- [15] M. Magdowski, „Wozu braucht man eine 4 m × 6 m × 8 m große Mikrowelle?“, in *Science Slam*, FestungMark, Hohepfortewall 1, 39104 Magdeburg: Kulturfest #MD2025 mit Public Viewing, Okt. 2020.

- [16] M. Magdowski, „Numerische Modellierung – Einführung in die Elektromagnetische Modellierung“, in *Seminar 20SE-2.32 EMV - Elektromagnetische Verträglichkeit*, Wissenschaftliche Leitung: Heyno Garbe, Hrsg., Argelsrieder Feld 11, 82234 Weßling/Oberpfaffenhofen: Carl-Cranz-Gesellschaft e.V. – Gesellschaft für technisch-wissenschaftliche Weiterbildung, Nov. 2020.
- [17] M. Magdowski und K. Vorwerk, „#7: Ist die Lehre an der Uni durch die Coronakrise digitaler?“, in *In die Uni reingehört. Der Podcast zur Arbeitswelt an der OVGU*, Pressestelle der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Mai 2020. Adresse: <https://www.ovgu.de/folge7.html>.

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 2020 bearbeiteten Themen mit Bezug auf leistungselektronische Bauelemente und Systeme werden im folgenden Abschnitt detaillierter erläutert.

3.4.2 Forschungsprojekte

Impact of threshold voltage instabilities of SiC MOSFETs on the methodology of power cycling tests³⁷

Background When power cycling SiC MOSFETs steep temperature gradients intendedly lead to thermo-mechanical stress degrading the package. The observation of package degradation, however, is impeded by trapping effects in the chip caused by the gate bias. For proper analysis and understanding these superimposed effects need to be separated. For this purpose the electrically induced threshold voltage (V_{th}) instability has been investigated under gate conditions like in a power cycling test bench and at constant temperature, using devices without package degradation.

³⁷ von M. Sc. Carsten Kempiak

Approach and design of experiment The effect of the gate bias without superimposed influences of temperature or package degradation has been investigated with three exemplary commercial 1200 V discrete SiC MOSFETs and one comparable Si MOSFET for reference as devices under test (DUTs). They have been mounted on a heat plate at constant temperature. There was no load current flow during the on-time $t_{\text{on}} = 3\text{ s}$ where $V_{\text{GS,on}} = 15\text{ V}$ was applied. $T_{\text{vj,max}}$ has been estimated with the $V_{\text{SD}}(T)$ -method in the beginning of the off-time $t_{\text{off}} = 6\text{ s}$ where $V_{\text{GS,off}} = \{-6\text{ V}; -10\text{ V}; -15\text{ V}\}$ was applied.

The exemplary gate profile is displayed in Fig. 3.47a. All measurements have been carried out under thermal equilibrium condition by using an oscilloscope with 12 bit vertical resolution resulting in approx. 1 mV resolution for the V_{SD} measurement and approx. 2 mV resolution for the V_{th} measurement. The simplified measurement circuit is shown in Fig. 3.47b. In addition to the necessary switch S_1 to apply the $V_{\text{SD}}(T)$ -method, three low power switches S_2 , S_3 and S_4 are added to the test setup, permitting to sense V_{th} with a constant current measurement approach ($V_{\text{GS}} = V_{\text{DS}}$).

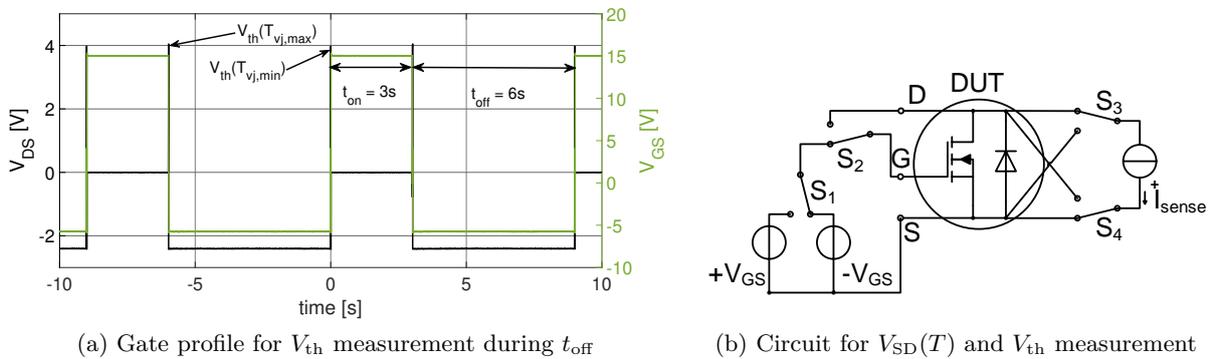


Figure 3.47: Exemplary gate profile and simplified circuit developed for combined $V_{\text{SD}}(T)$ and V_{th} sensing

The temperature T_{vj} needs to be determined as accurately as possible during power cycling. In the case of power cycling SiC MOSFETs, usually the $V_{\text{SD}}(T)$ -method is used for this purpose. For its application, a calibration is necessary. This has as usual been carried out under constant gate conditions by applying $V_{\text{GS,off}} = -10\text{ V}$ and by using exactly the same test setup as for the latter measurements. Therefore, any differences in the temperature readings can only be caused by the different gate conditions.

Results and discussion Some results of the $V_{\text{SD}}(T_{\text{vj,max}})$ measurement are depicted in Fig. 3.48. These measurements were carried out at constant $T_{\text{vj}} = 175\text{ }^\circ\text{C}$ and varying $V_{\text{GS,off}}$ right after turning off the DUT. The pre-determined calibration at $V_{\text{GS,off}} = -10\text{ V}$ was used to calculate the corresponding temperature reading of the $V_{\text{SD}}(T)$ -method. The Si MOSFET behaves as expected: T_{vj} is independent on $V_{\text{GS,off}}$ and the $V_{\text{SD}}(T)$ -method yields the correct temperature. Device B behaves quite similar to the Si MOSFET. Device A and C, however, reveal a different behaviour: T_{vj} is drastically overestimated when $V_{\text{GS,off}} = -6\text{ V}$ is applied to device A, while in case of device C T_{vj} is underestimated; for both devices a changing temperature is measured during the first approximately 2 ms, which is caused by the V_{th} hysteresis: After switching a SiC MOSFET on or off, a step change in V_{th} occurs, which affects V_{SD} if the gate channel is not fully closed. The application of $V_{\text{GS,off}} \leq -10\text{ V}$ to device A, however, yields the correct temperature reading. This is not the case for device C, where only the same $V_{\text{GS,off}}$ as had been used during calibration yields approximately the correct value.

In addition, also a short-term V_{th} shift was observed. With respect to power cycling, this short-term shift during t_{off} may affect T_{vj} sensing when using the $V_{\text{SD}}(T)$ -method. Furthermore,

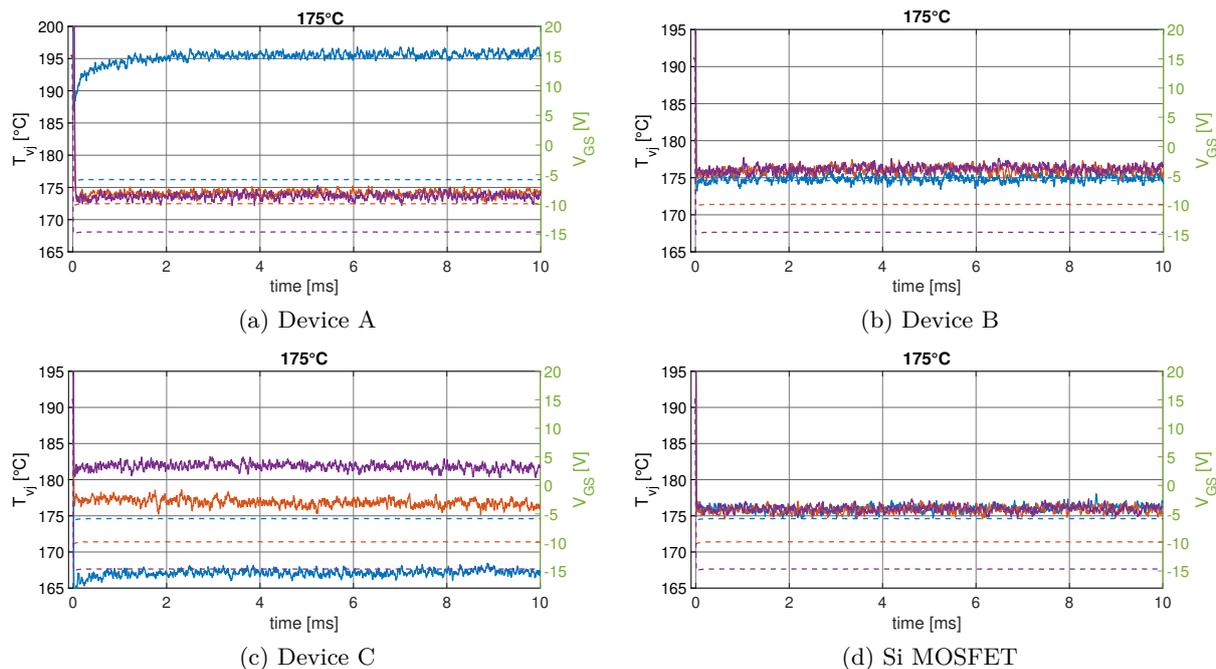


Figure 3.48: Results of the $V_{SD}(T)$ -method applied to different commercial 1200V SiC MOSFETs and one Si MOSFET for reference at constant junction temperature of 175 °C and varying turn-off gate voltages $V_{GS,off} = \{-6 \text{ V}; -10 \text{ V}; -15 \text{ V}\}$; $I_{sense} = 5 \text{ mA}$; $V_{GS,on} = 15 \text{ V}$

since such a short-term V_{th} shift is also present during t_{on} , it will also affect the induced thermo-mechanical stress and therefore the gained lifetime.

Conclusion V_{th} instabilities of SiC MOSFETs occurring during power cycling tests have been investigated. They may severely disturb T_{vj} sensing with the $V_{SD}(T)$ -method. This means that a universally fixed $V_{GS,off}$ is obviously not applicable to all SiC MOSFETs. Instead before starting a power cycling test a suitable value has to be identified for each device type; if this would fail the $V_{SD}(T)$ -method is not applicable. Furthermore, the observed fully reversible short-term V_{th} shift will affect the losses in the devices and thus the induced thermo-mechanical stress. It needs special consideration with respect to the parameter settings of the power cycling test.

Accelerated qualification of highly reliable chip interconnect technology by power cycling under thermal overload³⁸

Background and approach Recent highly reliable interconnect technologies like silver sintering, diffusion soldering and copper bond wires are increasingly used in power semiconductor devices. They permit to achieve a higher reliability or to operate the devices at elevated junction temperature, either resulting in a higher power density compared to prior art or permitting operation in a harsh environment with elevated temperature. These benefits in the real application however evolve new challenges for the qualification process of power electronic packages: The much higher lifetime also yields a significantly higher qualification time, increasing qualification costs and time-to-market for new products. Furthermore, considering the use at higher operation temperatures in real applications, the acceleration factor of power cycling tests compared to the

³⁸von M. Sc. Carsten Kempiaak

application is reduced when maintaining the usual temperature limits. Therefore, advancing the established package qualification tests like power cycling to speed up the qualification process is highly desirable. Care must however be taken that the underlying failure mechanism will not be changed to remain application-like. Thus, the possibility to adjust the stress parameters during power cycling beyond given limitations needs to be carefully investigated. Lifetime models reveal that the lifetime of power electronic packages depends on many parameters where the junction temperature swing has by far the biggest impact. Therefore, performing power cycling tests under thermal overload conditions – beyond the specified operating range of the component – to further increase the temperature swing is a promising approach to shorten the test time. The scope of this investigation is limited to interconnects in vicinity to the chip, in particular on its top side: When applying a short load current turn-on time it can be expected that mainly the structures close to the chip are stressed by the increased temperature swing and a highly accelerated qualification of the chip interconnects is possible without triggering a failure mechanism e.g. in the system solder layer which still experiences a moderate temperature swing due to the thermal time constants.

Device under test For this investigation special engineering samples with a Si IGBT in a standard housing have been built. The bottom side of the IGBT is sintered onto a DCB while a copper bondbuffer is sintered on its top-side, carrying eight thick copper bond wires for the emitter connection. The IGBT is rated for a maximum junction temperature of 175 °C.

Experimental setup, results and analysis Based on previous experiences with the top side connections of the chip, continuously growing cracks in the Al metallisation between the chip and the bondbuffer is the expected failure mechanism. It shall also be triggered in the described power cycling tests under thermal overload conditions.

All of them have been performed with a fixed load current as well as a fixed on- and off-time, adjusted once in the beginning of the test. Progressing degradations will consequently increase the losses and in turn the temperature swing. As usual an increase of the conduction voltage drop $V_{CE,sat}$ of +5 % is used as indicator for a failure in the conductive path and an increase in the thermal resistance R_{th} of +20 % to indicate a failure in the thermal path, respectively.

Exemplary power cycling results under thermal overload condition are shown in Fig. 3.49a: The +5 % $V_{CE,sat}$ criterion is met after 30 000 cycles without an increase in R_{th} , indicating a dominant failure mechanism in the conductive path. After this failure threshold was met, the test run was continued and in addition to the increase of $V_{CE,sat}$, also R_{th} starts to increase, indicating additional degradation in the thermal path. In Fig. 3.49b, the resulting lifetime for a medium junction temperature $T_{vj,m} = 120$ °C, a load current on-time $t_{on} = 0.5$ s and a load current off-time $t_{off} = 1.5$ s is summarised and a Coffin-Manson model derived, which in turn is compared to published lifetime models.

It is important to note that the test conditions under which these models had been derived need to be considered, as mathematical extrapolations might not be physically correct. For the SkiM63-model e.g. only power cycling tests with temperature swings in the range from 64 K to 113 K were carried out, as illustrated in Fig. 3.49b.

Obviously, the fast power cycling tests under thermal overload conditions reduce the test time drastically. The measured power cycling data derived for different temperature swings look qualitatively similar to Fig. 3.49a for all test runs. Therefore, the same dominating failure mechanism can be expected. Micrographic analyses confirm, in addition, that the intended failure mechanism has been triggered during power cycling.

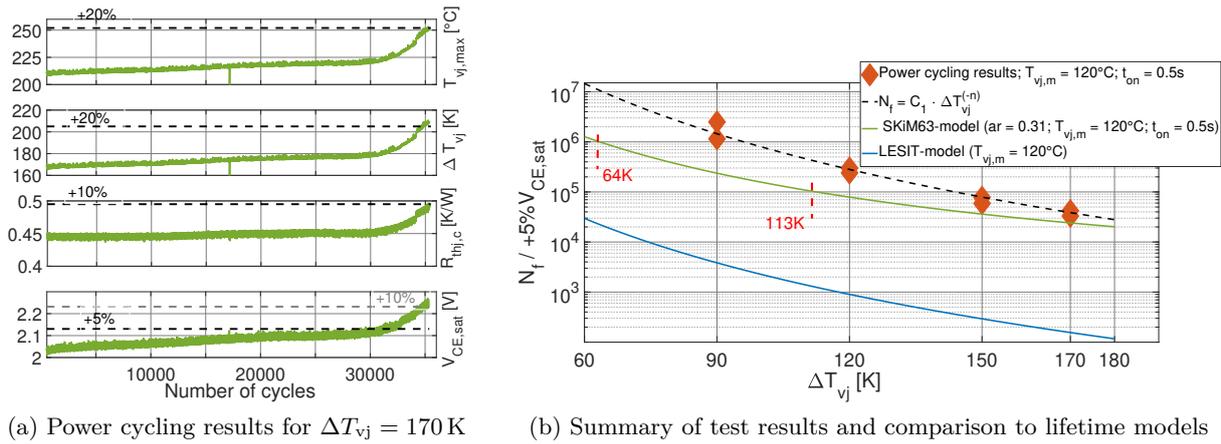


Figure 3.49: Power cycling results for $T_{vj,m} = 120\text{ }^\circ\text{C}$, $t_{on} = 0.5\text{ s}$, $t_{off} = 1.5\text{ s}$; derived Coffin-Manson model: $C_1 = 2 \times 10^{17}$; $n = 5.7$

Conclusion Power cycling tests of engineering samples with highly reliable chip interconnects under thermal overload conditions have been performed. The investigated approach is capable to drastically reduce the test time. The tests reveal a high power cycling capability, limited by the dominating failure mechanism of a delamination of the top side metallisation, which was intended to trigger and which has been confirmed by failure analysis.

3D-Leistungselektronik³⁹

In automotive and other applications there is a trend towards cost-efficient integrated power electronics. The technology to embed power semiconductor devices in printed circuit boards (PCB) is promising in this respect. Embedding the active and passive electronic components leads short connections, reduced package thickness if thin components are available, potentially enhanced thermal performance for components assembled on the heat sink and advantageous electromagnetic compatibility (EMC).

In a cooperation project, a modern semiconductor switch GS66506T from GaN Systems based on gallium nitride (GaN) with a mechanical size of $5\text{ mm} \cdot 4.9\text{ mm} \cdot 0.05\text{ mm}$ is used to build an embedded power section. The project aims at building a three-phase inverter with 400 V input voltage and 2.5 kW output power. To prepare the embedded solution, an initial design using a conventional PCB is being realised. It shall also serve as a benchmark to illustrate the potential of the embedded solution.

Besides low on-resistance the GaN switch has fast switching characteristics. This helps to reduce switching losses. However, the related high dv/dt and di/dt may cause voltage overshoot, gate voltage fluctuation, and control signal instability. It is required to consider these phenomenons and design the circuit in an appropriate way to limit them. A double pulse test (DPT) based on a half-bridge circuit has initially been carried out to explore these issues thoroughly (see Fig. 3.50). The half-bridge is a basic topology applied in various power modules. It can be easily reproduced to build a three-phase inverter.

³⁹von M. Sc. Tianyu Li



Figure 3.50: The double pulse test platform based on half-bridge topology

Temperature-dependent electrical characteristics of a Ga_2O_3 Schottky diode⁴⁰

The wide-bandgap semiconductor gallium oxide (Ga_2O_3) has recently stirred interest as a possible material for power electronics. With a large bandgap of 4.6 eV to 4.9 eV, the theoretical breakdown field of $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ is about 2 to 3 times higher than that of SiC or GaN. Furthermore, high-quality $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ bulk substrates can be fabricated by standard melt-growth techniques.

Despite its low thermal conductivity and absence of p -type doping, these properties have led to intense research on gallium oxide devices for power electronics. While first Schottky barrier diodes (SBDs) and field-effect transistors (FETs) with breakdown voltages of several kV have been demonstrated (see Fig. 3.51), the development of such devices is still at an early stage and they are not yet commercially available.

In order to gain an impression of potential Ga_2O_3 power electronics, one of the first packaged $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ Schottky barrier diodes has been electrically characterised. To this end, static current-voltage and capacitance-voltage profiles have been measured and simulated at different junction temperatures.

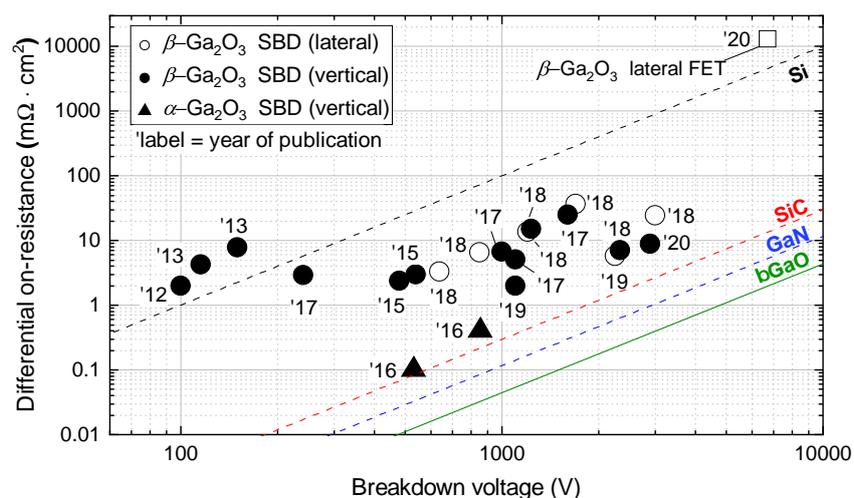


Figure 3.51: Unipolar on-resistance versus breakdown-voltage limits for important power semiconductors (lines) and exemplary achievements reported for gallium oxide devices (symbols).

⁴⁰von M. Sc. Florian Wilhelmi, ZF

Traction DC-DC converter based on SiC-MOSFETs⁴¹

Most electric vehicles are using a 150 V to 450 V battery. Significantly higher voltage levels like 800 V are typically found in power trains of electric trucks or powerful electric sport cars. The advantages of an 800 V system are quite obvious – a reduction in the current values for the same power and thus a subsequent reduction in power losses. In order to implement a power train topology taking advantage of the higher voltage level, a structure with an intermediate DC/DC-converter according to Fig. 3.52 can be used.

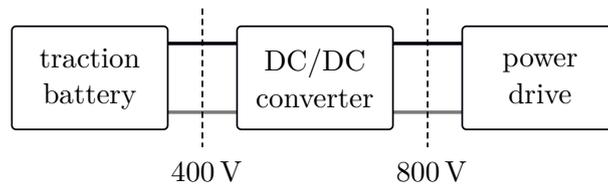


Figure 3.52: Block diagramme of the power train structure

A bidirectional non-isolated multi-phase DC/DC-converter topology has been chosen. As the dc link voltage is decisive for the required rated blocking voltage and fast switching transistors are required, a commercially available 1.2 kV SiC-MOSFET will be used.

The control strategy is focused on controlling the high-side voltage with average-current mode control. The control loop is shown in Fig. 3.53a: The disturbance signal in this case is a load current which represents the dc link current of a drive inverter, performing a step of -10 A at 5 ms and of $+20$ A at 25 ms in the MATLAB Simulink simulation shown in Fig. 3.53b.

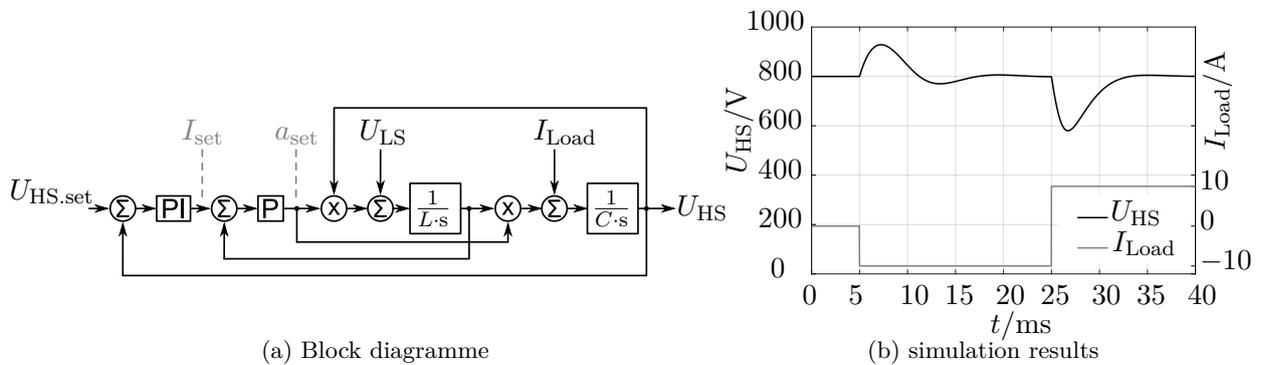


Figure 3.53: Control loop

The ability to connect batteries in various configurations and with different nominal voltages, maintaining a constant high DC voltage level at the input of the electric drive is a main advantage of using the power train with the intermediate DC/DC converter. The use of modern power switches, i. e., SiC-MOSFETs, allows to achieve a high efficiency of the converter and relatively small dimensions.

Batterietechnologien zur Sicherung eines stabilen Netzbetriebes – GridBatt

Der Lehrstuhl für Leistungselektronik beteiligt sich am Verbundprojekt GridBatt, vgl. Abschnitt 3.2.2.

⁴¹von M. Sc. Anton Chupryn

3.4.3 Promotionen

Dr.-Ing. Lars Middelstädt: Transiente Effekte in leistungselektronischen Schaltungen mit schnellschaltenden Leistungshalbleitern unter besonderer Berücksichtigung der elektromagnetischen Verträglichkeit

Gutachter:

- Prof. Andreas Lindemann, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
- Prof. Klaus F. Hoffmann, Helmut-Schmidt-Universität Hamburg

verteidigt am 5. Oktober 2020 an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (siehe Abbildung 3.54)



Abbildung 3.54: Gratulation an Lars Middelstädt am Otto-von-Guericke-Denkmal

Das Schalten von neuen Leistungshalbleitern innerhalb von wenigen ns stellt hohe Ansprüche an ein korrespondierendes Schaltungslayout sowie an das Design passiver Komponenten im Bezug auf minimierte parasitäre Elemente. Dies ist unter anderem für die elektromagnetische Verträglichkeit von Bedeutung.

Die Arbeit analysiert und bewertet transiente Effekte von schnellschaltenden Leistungshalbleitern mit speziellem Fokus auf die elektromagnetische Verträglichkeit und schlägt Maßnahmen zur Verbesserung vor. Das erhöhte Störpotential von Schaltungen mit Wide-Bandgap-Transistoren gegenüber Schaltungen mit konventionellen Si-IGBTs wird im Detail untersucht. Anhand eines beispielhaften DC/DC-Wandlers werden allgemeingültige Designrichtlinien für passive Komponenten sowie für das Schaltungslayout entwickelt. Hierbei werden sowohl die intra-EMV als auch geleitete und gestrahlte Störungen anhand von Messergebnissen analysiert und bewertet. Untersuchungen zum Einfluss von Halbleiterparametern zeigen deutlich, dass schaltbedingte Oszillationen im Resonanzkreis der Kommutierungszelle entstehen und parasitäre Antennenstrukturen anregen. Dadurch wird das Störspektrum oberhalb von 30 MHz maßgeblich vergrößert.

Die zur selektiven Analyse des Schaltverhaltens im Frequenzbereich entwickelte Methode ermöglicht es, zwischen den Einflüssen des Ein- und Ausschaltverhaltens auf das Störspektrum zu unterscheiden. Anhand von experimentellen Parametervariationen werden so vereinfachte Modelle für die Ein- und Ausschaltoszillation extrahiert. Auf deren Basis können analytische Ausdrücke unter der Beachtung der Anfangswerte aufgestellt werden. Diese vermitteln ein grundlegendes Verständnis konkreter Ursachen der Anregung der Oszillationen.

Darauf aufbauend wird in dieser Arbeit eine Optimierungsstrategie entwickelt, um Schaltoszillationen zu vermeiden. Hiermit werden die Oszillationen durch genau eingestelltes Schalten minimiert. Somit ist es möglich, mit einer mittleren Schaltgeschwindigkeit zeitgleich Schaltverluste zu reduzieren und EMV-kritische Oszillationen zu eliminieren. Für das Einschalten bedeutet dies das korrekte Einstellen der Überstromspitze.

Dass dies über die Gate-Ansteuerung umsetzbar ist, wird anhand von Simulationen sowie Versuchen gezeigt. Als einfachster Ansatz stellt ein RC -Glied im Gate-Kreis das Schaltverhalten bei definierter Stromsteilheit variabel ein und führt so zu einer Eliminierung der Einschaltoszillation. Bestätigt wird dies an einem Doppelpulsversuchsstand mit CoolMOS-MOSFET und SiC-Schottky-Diode. Eine Alternative sind aktive Treiber. Simulationsergebnisse zeigen, dass bereits ein zusätzlicher Transistor im Gate-Kreis zur Minimierung von Oszillationen im Lastkreis beitragen kann. Der Einsatz eines integrierten aktiven Treibers mit einstellbarem Gate-Profil in einem Brückenweig mit GaN-HEMTs bestätigt die Validität der entwickelten Strategie. Sowohl eine effiziente Vorgehensweise zur Erstellung eines optimierenden Gate-Profiles als auch validierende EMV-Messungen der gestrahlten Störungen werden vorgestellt (siehe Abbildung 3.55).

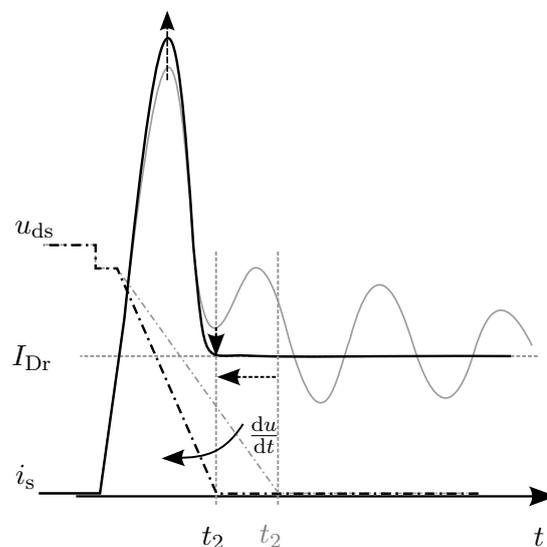


Abbildung 3.55: Einstellen der Spannungsflanke, um Stromoszillation zu minimieren

Somit zeigen sowohl Simulations- als auch Messergebnisse die Anwendbarkeit der Optimierungsstrategie und deren positiven Einfluss auf das EMV-Verhalten für unterschiedliche Schaltungen und Leistungshalbleiter.

3.4.4 Veröffentlichungen

Zeitschriften- und Konferenzbeiträge

- [1] F. P. Pribahnsnik, M. Bernardoni, M. Nelhiebel, M. Mataln und A. Lindemann, „Piezoelectric Properties of GaN-on-Si Heterostructures and Their Implications on Lifetime During Switching Operation“, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Jg. 35, Nr. 10, S. 10 873–10 878, Okt. 2020, ISSN: 1941-0107. DOI: 10.1109/TPEL.2020.2977752.
- [2] C. Kempiak und A. Lindemann, „Investigation of the threshold voltage shift of SiC MOSFETs during power cycling tests“, in *PCIM Europe digital days 2020; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, Juli 2020, S. 1–8.
- [3] C. Kempiak, A. Lindemann, S. Idaka und E. Thal, „Comparative study of determining junction temperature of SiC MOSFETs during power cycling tests by a Tj sensor and the VSD(T)-method“, in *CIPS 2020; 11th International Conference on Integrated Power Electronics Systems*, März 2020, S. 1–6.

Dissertationen und Bücher

- [1] L. Middelstädt, *Transiente Effekte in leistungselektronischen Schaltungen mit schnellschalenden Leistungshalbleitern unter besonderer Berücksichtigung der elektromagnetischen Verträglichkeit*, 1. Aufl., Ser. Res Electricae Magdeburgenses 81. Magdeburg: Lindemann, Andreas u. a., 2020, ISBN: 978-3-944722-95-5. DOI: 10.24352/UB.OVGU-2020-148.

3.4.5 Veranstaltungen

Technologietransfermesse „Innovation trifft Wirtschaft“⁴²

Am 23.01.2020 fand erstmals die vom Technologie- und Gründerzentrum (TUGZ) der Otto-von-Guericke-Universität (OVGU) Magdeburg organisierte Transferveranstaltung „Innovation trifft Wirtschaft“ in der Festung Mark statt. Hierbei hatten Unternehmen die Möglichkeit, kostenlos mit Erfindern der OVGU ins Gespräch zu kommen, sich inspirieren zu lassen, Kontakte zu knüpfen und konkrete Verwertungsmöglichkeiten auszuloten. Unter anderem vertreten war Herr Carsten Kempiak vom Lehrstuhl für Leistungselektronik, der seine Erfindung „Vorrichtung und Verfahren zur aktiven Erzeugung und Einprägung von Blindleistung in induktive Übertragungssysteme“ anhand eines virtuellen Prototypen präsentierte:

Prinzipbedingt emittieren induktive Energieübertragungssysteme, wie sie beispielsweise zur kontaktlosen Versorgung von Flurförderfahrzeugen in der Intralogistik oder perspektivisch zum kontaktlosen Laden von Elektrofahrzeugen im Bereich der Elektromobilität zum Einsatz kommen, Streufelder, deren induktiver Blindleistungsbedarf zur effizienten Energieübertragung kompensiert werden muss. Nach dem Stand der Technik werden hierfür analoge Kompensationskondensatoren primär- und sekundärseitig verbaut, wodurch sich unter Laborbedingungen Systemwirkungsgrade oberhalb von 90 % erzielen lassen. In der realen Anwendung treten jedoch Abweichungen vom

⁴² von M. Sc. Carsten Kempiak

idealen Abgleich – z. B. infolge von Bauteiltoleranzen, Alterungserscheinungen, Temperaturdrift oder Kopplungsvariationen – auf, die sowohl die Effizienz als auch die übertragbare Wirkleistung erheblich reduzieren können, wodurch Überdimensionierungen notwendig werden.

Erfindungsgemäß wird diese Problemstellung durch die Kombination eines leistungselektronischen Stellgliedes und der Einkopplung direkt in den Resonanzkreis erstmals gelöst, wodurch sich Parametervariationen dynamisch, kontinuierlich und effizient im Betrieb durch Resonanznachführung ausgleichen lassen. Zudem kann durch die gezielte Verstimmung der Resonanz das Stellprinzip auch zur Regelung der Ausgangsgrößen genutzt werden, wodurch, neben der Einsparung eines zusätzlichen Stellgliedes, auch der Wirkungsgrad im Teillastbereich im Vergleich zum Stand der Technik gesteigert wird. Diese Vorteile kommen insbesondere bei Systemen mit höheren Übertragungsleistungen und variabler Positionierung zum Tragen – wie beispielsweise im Bereich Elektromobilität, Intralogistik oder Bahntechnik üblich.

Patentfamilie: WO2018233766

Ansprechpartner: Carsten Kempfiak, carsten.kempfiak@ovgu.de

CIPS 2020

In the next decades, power electronic system development will be driven by energy saving systems, intelligent energy management, power quality, system miniaturisation and high reliability. Monolithic and hybrid system integration will include advanced device concepts including wide bandgap devices, new packaging technologies and the overall integration of actuators or drives (mechatronic integration).

The International Conference on Integrated Power Electronics Systems (CIPS) is consequently focused on the following main aspects which are today more important than ever

- assembly and interconnect technology for power electronic devices and converters
- integration of hybrid systems and mechatronic systems with high power density
- systems' and components' operational behaviour and reliability

to increase functionality, energy efficiency and system reliability while decreasing cost. Basic technologies for integrated power electronic systems as well as upcoming new important applications are presented in interdisciplinary invited papers.

General Chairs of the conference co-organised by VDE-ETG and the European Center for Power Electronics (ECPE) are Leo Lorenz, ECPE e.V., and Thomas Harder, ECPE e.V. while Andreas Lindemann, Otto von Guericke University Magdeburg and Nando Kaminski, University of Bremen serve as Technical Chairs.

The physical part of the conference in 2020 regrettably had to be canceled shortly prior to the scheduled dates 24–26 March because of the actual pandemic situation at Berlin. Nevertheless, content-rich proceedings with all published contributions are available, i. e., ETG-Fachbericht 161, 11th International Conference on Integrated Power Electronics Systems, 2020, 616 pages, 140 mm × 124 mm, Slimlinebox, CD-ROM ISBN 978-3-8007-5225-6 or e-book ISBN 978-3-8007-5226-3.

3.5 Institutsebene

3.5.1 Technische Gremien und Verbände

- Prof. Leidhold:
 - VDE und ETG Mitglied
 - IEEE Member
- Prof. Lindemann:
 - Mitgliedschaften und Gremien
 - * Senior Member des Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)
 - * Chair of Awards Committee der IEEE Power Electronics Society (PELS)
 - * Counselor der IEEE Student Branch „Otto von Guericke“, Magdeburg
 - * Past Chairman 2005–2006 des Joint IAS/PELS/IES German Chapters
 - * Mitglied von VDE und energietechnischer Gesellschaft im VDE (ETG)
 - * Mitglied des Fachbereichs Q1 (Leistungselektronik und Systemintegration) der ETG
 - * 2. stellvertretender Vorsitzender des Fakultätentages für Elektrotechnik und Informationstechnik e.V.
 - 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)

3 Forschung

- 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
 - * Scientific Advisory Board PESS 2020 IEEE Power and Energy Student Summit
 - * Scientific Advisory Board NEIS 2020
 - * 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