



**50** Jahre  
gut vernetzt

## Festschrift

aus Anlass des 50-jährigen Bestehens des  
Lehrstuhls für Elektrische Energiesysteme

## Vorwort

„Wissen in Bewegung“, so lautet ein aktuelles Motto unserer Universität, frei nach dem alten Sprichwort „Nichts ist so beständig, wie der Wandel“. Dies beschreibt auch die Situation der Wissenschaft und Technik recht gut, zumal in den letzten Jahren die „Bewegung“ des Wissens besonders zu spüren gewesen ist. Neues Fachwissen kommt hinzu und ist für das Verstehen der Gegenwart sowie für die Gestaltung der Zukunft wegweisend. Bekanntes Wissen und alte Erfahrungen müssen sich der Zukunft stellen. Die Vernetzung des Bisherigen mit dem Neuen ist hier gefragt.

Der Lehrstuhl für Elektrische Energiesysteme der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg wurde im April 1975 gegründet. Die verantwortlichen Professoren und wissenschaftlichen Mitarbeitenden haben sich in diesen letzten 50 Jahren mit großer Leidenschaft der Herausforderung gestellt, neues Fachwissen in die elektrische Energietechnik einzuführen und gewinnbringend anzuwenden. Damit haben sie das Wissen in Bewegung gehalten. Dazu sind die digitale Signalverarbeitung in den 80er Jahren, die Stromrichtertechnik in den 90er Jahren, die regenerativen Energieumwandlungsverfahren um die Jahrtausendwende sowie Big Data und die künstliche Intelligenz mit dem maschinellen Lernen in der jüngeren Vergangenheit zu nennen. Unser Wissen hat sich fachübergreifend fortentwickelt – der Systemgedanke steht im Vordergrund.

Die Bewegung des Wissens war an unserem Lehrstuhl nicht nur in Wissenschaft und Forschung präsent, sondern auch in der Lehre sowie im Kontakt mit unseren unzähligen Studierenden, die sich über die letzten Jahrzehnte für die elektrische Energietechnik entschieden haben. Der Leitgedanke war für uns immer: „Lehren bedeutet nicht Fässer füllen, sondern Fackeln entzünden“. Die Begeisterung für Wissenschaft und Technik bei den Studierenden zu wecken, hat zudem fortwährend zu einer Weiterentwicklung der Lehrinhalte und Lehrformen geführt. Gleichzeitig haben unsere Unternehmungen eine Vielzahl von regelmäßigen Events und Aktivitäten mit den Studierenden auch außerhalb des Hörsaals hervorgebracht.

Die Erfolge wären natürlich nicht ohne die zahlreichen Kooperationspartner aus der Industrie und der öffentlichen Hand sowie die vielen Förderer und Freunde des Lehrstuhls möglich gewesen. Dafür sind wir ganz besonders dankbar. Unser Dank richtet sich hierbei sowohl an unsere finanziellen Unterstützer als auch an diejenigen, die mit wertvollen Anregungen aus der Praxis zu einer zukunftsorientierten Forschung und Lehre beigetragen haben.

Trotz der sich abzeichnenden strukturellen Veränderungen in der Hochschullandschaft, sind wir sehr optimistisch, dass der Lehrstuhl auch in der Zukunft seinen erfolgreichen Weg in bewährter Weise fortsetzen kann. Unser gemeinsames Ziel bleibt bestehen: Wir werden uns auch in Zukunft dafür einsetzen, das Wissen weiter in Bewegung zu halten.

Erlangen, im April 2025

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Matthias Luther    Univ.-Prof. Dr.-Ing. Johann Jäger

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Mitarbeitende</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Aktuelle Lehrveranstaltungen</b>	<b>21</b>
<b>3</b>	<b>Forschung</b>	<b>39</b>
3.1	Systemstabilität	41
3.2	Hochleistungstechnik	61
3.3	Schutztechnik	67
3.4	Drittmittelzuwendungen	81
3.5	Aktuelle öffentliche Verbundprojekte	92
<b>4</b>	<b>Labore und Versuchseinrichtungen des Lehrstuhls</b>	<b>97</b>
4.1	Hochspannungshalle und Hochstromanlage (Erlangen)	97
4.2	Drehstrom-Demonstrationsmodell (Erlangen)	101
4.3	Das flexible Niederspannungslabor (Auf AEG)	103
4.4	Echtzeitlabor (Auf AEG)	104
4.5	Netzleitwartenmodell (Erlangen)	106
<b>5</b>	<b>Leben und Arbeiten am Lehrstuhl</b>	<b>109</b>
5.1	Promotionen	109
5.2	Konferenzen	110
5.3	Öffentlichkeitsarbeit und Nachwuchs-förderung	111
5.4	Festliche Traditionen: Sommerfeste und Weihnachtsfeiern	113
5.5	Team Events	114
5.6	Darmstädter Kreis und Wanderausflüge	115
5.7	Skiausflüge	116
<b>6</b>	<b>Geschichte und Meilensteine des Lehrstuhls</b>	<b>119</b>
6.1	Chronologie	119
6.2	Entwicklung der studentischen Arbeiten	124
6.3	Promotionen und Habilitationen	125
6.4	Gremien- und Verbandsarbeit	138
<b>7</b>	<b>Literatur</b>	<b>141</b>
7.1	Vorträge und Publikationen	141
7.2	Lehrbücher des Lehrstuhl	142
7.3	Patentanmeldungen und Patente	144

# 1 Mitarbeitende

## 1.1 Lehrpersonal des Lehrstuhles



**Univ.-Prof. Dr.-Ing.  
Matthias Luther**

Ordinarius  
(2011)



**Univ.-Prof. Dr.-Ing.  
Johann Jäger**

Extraordinarius  
(2004)



**Dr.-Ing. Dieter Braisch**

Akademischer Oberrat  
Bereich Hochleistungstechnik  
(2015)



**Dr.-Ing. Gert Mehlmann**

Akademischer Oberrat  
Bereich Systemstabilität  
(2016)

## 1.2 Ehemalige Professoren



**Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c.  
Gerhard Hosemann**  
Gründer des Lehrstuhls  
(1975 - 1990)



**Prof. Dr.-Ing. habil.  
Ralf Gretsch**  
(1977 - 2003)



**Prof. Dr.-Ing. habil.  
Gerhard Herold**  
(1993 - 2012)

## 1.3 Lehrbeauftragte



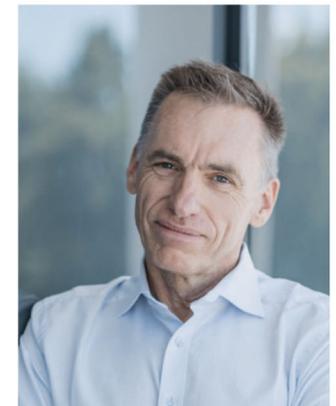
**Hon.-Prof. Dr.-Ing.  
Martin Konermann**  
Geschäftsführer Netze BW GmbH  
(1999)



**Dr.-Ing. Christoph Hahn**  
Global Head of Electrical Systems  
for Large Gas Turbines  
Siemens Energy AG  
(2018)



**Dr.-Ing. Christoph Maurer**  
Geschäftsführer Consentec GmbH  
(2019)



**Dr.-Ing. Peter Hoffmann**  
HoPe Energy Consulting GmbH  
(2023)

## 1.4 Ehemalige Lehrbeauftragte



**Hon.-Prof. Dr.-Ing.  
Leonhard Müller**  
BEWAG  
(1977 - 1997)



**Hon.-Prof. Dr.-Ing.  
Hans Edelmann**  
Siemens AG  
(1977 - 1982)

**Dipl.-Ing. Frank Scherschmidt**  
Kraftwerkunion, Erlangen  
(1982 - 1986)



**Dr.-Ing. Wolfram Junghans**  
Areva GmbH, Framatome GmbH  
(2013 - 2017)



**Dr.-Ing. Roland Eichler**  
Siemens AG  
(2016 - 2019)

## 1.5 Sekretariat



**Monika Bittan**  
Kaufmännische Verwaltung  
(2019)



**Nina Motschmann**  
Assistenz  
(2023)



**Martina Nachreiner**  
Assistenz  
(2023)

## 1.6 Technische Mitarbeitende



**Dipl.-Ing. (FH)  
Klaus Schneider**  
IT-Administration  
(2011)



**Josef Finsterwalder**  
Meister Mechanikwerkstatt  
(2020)



**Wolfgang Schläffer**  
Meister Elektrotechnik  
(2022)

## 1.7 Wissenschaftliche Mitarbeitende



**David Riebesel, M. Sc.**  
(2019)



**Elisabeth Scheiner, M. Sc.**  
(2019)



**Timo Wagner, M. Sc.**  
(2020)



**Tobias Lorz, M. Sc.**  
(2020)



**Stephan Müller, M. Sc.**  
(2020)



**Ilya Burlakin, M. Sc.**  
(2021)



**Georg Kordowich, M. Sc.**  
(2022)



**Jonathan Löbel, M. Sc.**  
(2022)



**Julian Richter, M. Sc.**  
(2021)



**Bernd Schweinhaut, M. Sc.**  
(2021)



**Dominik Frauenknecht,  
M. Sc.**  
(2022)



**Andreas Bammes, M. Sc.**  
(2023)



**Niloofar Kamalhosseini,  
M. Sc.**  
(2023)



**Timon Conrad, M. Eng.**  
(2023)



**Anushi Tripathi, M. Sc. M.E.**  
(2024)



**Gregor Becker, M. Sc.**  
(2024)



**Sebastian Streit, M. Sc.**  
(2023)



**Simon Linnert, M. Sc.**  
(2024)



**Christoph Mederer, M. Sc.**  
(2025)



**Berkay Tanis, M. Sc.**  
(2025)

## 1.8 Ehemalige Mitarbeitende

### Mechanik-Werkstatt

Fritz Reichel	1976 - 1990
Michael Spona	1991 - 1997
Johann Wolfrum	1975 - 2001
Matthias Oschmann	2001 - 2020

### Elektronik-Werkstatt

Dieter Leuschner	1978 - 2015
Werner Ruschig	1983 - 2021

### Zeichenbüro

Monika Beyer	1976 - 1983
Ingrid Willner	1983 - 2001
Stefan Domhardt	1990 - 2022

### Sekretariat

Maria Dostal	1975 - 1981
Edith Glaser	1982
Susanne Westhues	1982
Gertraud Stumpf	1983 - 1985
Helga Sobkowiak	1985 - 1989
Gertraud Stumpf	1988 - 1996
Ingeburg Ströβner	1989 - 2006
Johanna Biegel	1997 - 2021
Petra Schröder, ehem. Gambel	1994 - 2015
Sabine Vogel	2011 - 2013
Angelika Szabo	2013 - 2021
Christine Karl	2020 - 2021
Felicitas Raum	2022 - 2023

### Wissenschaftliche Mitarbeitende

Tunçay Caylı	1975 - 1979
Dimitris Tsanakas	1975 - 1977
Gerhard Krost	1978 - 1982
Klaus Stimper	1978 - 1981
Reiner Kolb	1980 - 1985
Martin Waeber	1980 - 1985
Werner Ocker	1981 - 1985
Tadeusz Lobos	1982 - 1986
Rudolf Weber	1983 - 1989
Volker Eckhardt	1983 - 1987
Wolfgang Rürger	1983 - 1987
Christoph Sachsenweger	1983 - 1989
Thomas Stiller	1983 - 1986
Günter Kießling	1984 - 1988
Gerhard Dinkel	1985 - 1989
Gerhard Schmidt	1986 - 1990
Christoph Nietsch	1986 - 1990
Hubert Steigerwald	1986 - 1991
Washington H. Peralta	1987 - 1991
Norbert Vierheilig	1987 - 1992
Tadeusz Lobos	1987 - 1993
Erhard Walter	1988 - 1992
Christian Kuschnarew	1989 - 1992
Elmar Zeitler	1989 - 1992
Martin Neubauer	1990 - 1994
Peter Richter	1990 - 1993
Dimitris Tsanakas	1991 - 1991
Johann Jäger	1991 - 1996
Christof Pastors	1991 - 1995
Peter Schweighofer	1991 - 1995
Matthias Laukner	1992 - 1993
Michael Kunz	1994 - 1998
Joachim Schneider	1995 - 1998

Ralf Süßbrich	1998 - 2003
Roland Bauer	1999 - 2004
Wolfgang Gawlik	1999 - 2001
Timo Keil	2005 - 2010
Ahmed Gamil	2005 - 2007
Michael Sinseder	2005 - 2006
Ivana Mladenovic	2007 - 2015
Rafael Lubiatowski	2007 - 2011
Harald Hofmann	2008 - 2012
Jochen Fuchs	2010 - 2015
Maximilian Dauer	2011 - 2016
Markus Schröder	2012 - 2017
Dr.-Ing. Iwona Biernacka	2012 - 2016
Thomas Scharrer	2012 - 2016
Sebastian Höhn	2012 - 2015
Jakob Vogelsang	2012 - 2015
Xiang Gao	2012 - 2013
Stefan Henninger	2013 - 2019
Erik Fischer	2013 - 2016
Martin Biller	2014 - 2022
Kishan Veerashekar	2014 - 2020
Julian Lange	2014 - 2017
Friedmann Epplein	2014 - 2016
Bastian Liebelt	2014 - 2015
Michael Jaworski	2015 - 2022
Jakob Schindler	2015 - 2022
Robert Dimitrovski	2015 - 2020
Sabine Wellhöfer	2015 - 2017
Michael Richter	2016 - 2023
Janick Meyer	2017 - 2023
Jonas Prommetta	2017 - 2021
Thomas Graber	2017 - 2018
Kerstin Schmalfeld	2018 - 2022
Stefan Horn	2018 - 2019
Lisa Wagner	2018

Steffen Weghorn	2019 - 2023
Ananya Kuri	2019 - 2023
Christian Scheibe	2019 - 2023
David Knothe	2021
Philipp Heitz	2023

### **Wissenschaftliche Mitarbeitende auf Landesstellen**

Bardolf Engel		1975 - 1979
Hartmut Peters		1975 - 1980
Wilfried Raab		1975 - 1981
Dr.-Ing. Wolfgang Meyer	Akad. Oberrat	1976 - 2015
Dietmar Retzmann		1976 - 1982
Dirk Rittinghaus		1976 - 1983
Dr.-Ing. Karl Eichhorn	Akad. Direktor	1977 - 1992
Wilhelm Schubert		1980 - 1986
Dr.-Ing. Klaus Stimper		1981 - 1990
Gerhard Krost		1982 - 1985
Rainer Krebs		1983 - 1990
Egid Schneider		1983 - 1989
Oskar Sembach		1984 - 1999
Dr.-Ing. Werner Heinrich	Akad. Oberrat	1985 - 1995
Walter Gunselmann		1985 - 1992
Bernhard Arndt		1986 - 1992
Johann Schießl		1986 - 1987
Johann Niebler		1987 - 1987
Gerd Bayerlein		1987 - 1990
Stefan Schwetz		1987 - 1992
Uwe Linnert		1990 - 1995
Christian Kuschnarew		1992 - 1998
Claudia Sieberling		1992 - 1994
Elmar Zeitler		1992 - 1995
Matthias Laukner		1993 - 1999
Bernhard Strobl		1995 - 2001
Michael Schuster		1995 - 2001
Dr.-Ing. Christian Weindl	Akad. Oberrat	1995 - 2015

Dieter Braisch	2000 - 2005
Hubert Rubenbauer	2001 - 2007
Günter Ebner	2001 - 2007
Wolfgang Gawlik	2001 - 2004
Mathias Ramold	2004 - 2010
Manuel Weiland	2007 - 2013
Gert Mehlmann	2008 - 2013
Christian Freitag	2008 - 2013
Simon König	2010 - 2014
Anatoli Semerow	2011 - 2017
Christoph Hahn	2011 - 2017
Gaby Seifert	2011 - 2017
Christan Romeis	2011 - 2017
Simon Resch	2015 - 2023
Florian Mahr	2016 - 2024
Alexander Raab	2017 - 2024
Johannis Porst	2017 - 2023
Tobias Deß	2018 - 2021

### Promotionsstudium

Helmuth V. Hitzeroth	1996 - 2001
Bin Wu	1997 - 2002
Shang Li	1998 - 2002
Andreja Rasic	2008 - 2009

## 2 Aktuelle Lehrveranstaltungen

### 2.1 Vorlesungen und Übungen

#### Grundlagen der Elektrotechnik

*Pflichtfach, WS, 2V + 2Ü, 5 ECTS*

*Univ.-Prof. Dr.-Ing. Matthias Luther, Dr.-Ing. Gert Mehlmann*

Ausgehend von den Grundkonzepten der Elektrotechnik werden die wichtigsten Phänomene im Bereich der Elektrotechnik eingeführt und deren Anwendung anhand von praxisnahen Beispielen verdeutlicht.

Zunächst wird das elektrostatische Feld behandelt, wobei die elektrische Ladung, sowie das Coulomb'sche Gesetz im Fokus stehen. Anschließend werden die Berechnung der elektrischen Feldstärke, des elektrostatischen Potentials und der elektrischen Spannung vorgestellt. Darauf aufbauend folgt die Einführung des stationären elektrischen Strömungsfeldes. Hier werden die Begriffe Strom und Stromdichte erklärt, das Ohm'sche Gesetz hergeleitet und das Verhalten an Grenzflächen analysiert. In diesem Kontext wird auch die Anwendung der Kirchhoffschen Gesetze zur Analyse von Gleichstromnetzwerken vertieft.

Im Bereich des stationären Magnetfelds werden die Grundbegriffe des Magnetismus erläutert. Die im Magnetfeld auf bewegte Ladungen wirkenden Kräfte und die magnetische Feldstärke werden berechnet. Weitere Schwerpunkte liegen im Durchflutungsgesetz und der Bestimmung der Induktivität. Das zeitlich veränderliche elektromagnetische Feld wird durch das Induktionsgesetz eingeführt. Dabei werden Selbstinduktion, Gegeninduktivität und deren Bedeutung in einfachen Netzwerken behandelt. Zusätzlich werden die Prinzipien der Bewegungsinduktion (Generatorprinzip) und der Ruheinduktion (Transformatorprinzip) erklärt.

Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf zeitlich periodischen Vorgängen, insbesondere Wechselstromsystemen. Methoden der komplexen Wechselstromrechnung werden angewendet, um Wechselspannungen und -ströme zu analysieren. Die Ausgleichsvorgänge in Netzwerken werden durch die Untersuchung einfacher Schaltungen, wie beispielsweise der R-L-Serienschaltung, behandelt.

Abschließend werden Halbleiterbauelemente und deren ausgewählte Grundschaltungen betrachtet. Die Funktionsweise von Halbleiterdioden, Z-Dioden, Bipolartransistoren, Feldeffekttransistoren, Thyristoren und IG-Bipolar-Transistoren wird erklärt und in typischen Schaltungsanwendungen demonstriert.

## Grundlagen der elektrischen Energieversorgung

*Pflichtfach, SS, 2V + 2Ü, 5 ECTS*

*Univ.-Prof. Dr.-Ing. Matthias Luther*

Ausgehend von der Bedeutung und den Eigenschaften elektrischer Energie werden die Strukturen von Energieversorgungssystemen erläutert und die wichtigsten Systemelemente übersichtlich vorgestellt. Anschließend werden die Grundlagen der Wechselstromtechnik sowie die gebräuchlichen Koordinatentransformationen für Dreiphasensysteme und ihre wechselseitigen Zusammenhänge behandelt. Mithilfe dieser Transformationen werden die Hauptelemente symmetrischer Drehstromnetzwerke abgebildet und es erfolgt eine umfassende Darstellung der Modellierung und Berechnung von Drehstromnetzen im symmetrischen und unsymmetrischen Betrieb. Darüber hinaus werden die Leistungsverhältnisse in elektrischen Energiesystemen ausführlich behandelt, welche die Grundlage für deren Auslegung und Betrieb bilden. Den Abschluss bilden Überlegungen zur wirtschaftlichen Auslegung der elektrischen Energieversorgung.

## Betriebsmittel und Komponenten elektrischer Energiesysteme

*Pflichtfach, WS, 2V + 2Ü, 5 ECTS*

*Univ.-Prof. Dr.-Ing. Matthias Luther, Dr.-Ing. Dieter Braisch*

Die Lehrveranstaltung vermittelt grundlegendes Wissen über elektrische Energiesysteme und vertieft Kenntnisse über deren Betriebsmittel. Zu Beginn erhalten die Studierenden einen Überblick über die Struktur und den Aufbau moderner Energieversorgungssysteme. Darauf aufbauend werden die mathematischen Grundlagen für die Modellierung und Analyse der wichtigsten Komponenten erarbeitet. Im Fokus stehen Betriebsmittel wie Freileitungen, Kabel, Transformatoren, Generatoren und Speichersysteme, deren Eigenschaften, Erstschaltungen und Kenndaten detailliert behandelt werden.

Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf den Kriterien für die Dimensionierung und Auslegung von Anlagen sowie auf dem Aufbau und der Funktion von Schaltanlagen. Abschließend werden aktuelle Entwicklungen in der Leistungselektronik und Speichertechnik thematisiert, die für die Herausforderungen der Energiewende und die Planung zukunftsfähiger Energiesysteme von zentraler Bedeutung sind. Die Veranstaltung bietet damit eine fundierte Basis für das Verständnis und die Gestaltung nachhaltiger Energieversorgungssysteme.

## Betriebsverhalten elektrischer Energiesysteme

*Pflichtfach, SS, 2V + 2Ü, 5 ECTS*

*Univ.-Prof. Dr.-Ing. Matthias Luther, Dr.-Ing. Gert Mehlmann*

Die Lehrveranstaltung behandelt die Grundlagen des Betriebsverhaltens elektrischer Energiesysteme. Der Schwerpunkt liegt auf der Auslegung und dem Betrieb elektrischer Übertragungsnetze. Dabei wird sowohl auf die Transportaufgabe des Systems als auch auf die Bereitstellung von Systemdienstleistungen eingegangen.

Zu Beginn der Vorlesung erhalten die Studierenden einen Überblick über die Aufgaben der Systemanalyse elektrischer Energieversorgungssysteme und die notwendigen Grundlagen zur Durchführung von Netzberechnungen. Anschließend werden elektrische Netze im stationären Betrieb betrachtet. Hierzu wird die Methodik der Leistungsfluss- und Kurzschlussstromberechnung vermittelt. In diesem Zusammenhang wird auf den Einfluss der Sternpunktbehandlung und der Erdung eingegangen.

Weiterhin wird das Themenfeld der Systemstabilität untersucht, welche die Polradwinkel-, Spannungs- und Frequenzstabilität umfasst. Abschließend werden die Leistungs-Frequenz- sowie die Spannungsregelung elektrischer Energiesysteme behandelt.

## Power Electronics in Three-Phase AC Networks: HVDC Transmission and FACTS

*Pflichtfach, SS, 2V + 2Ü, 5 ECTS*

*Dr.-Ing. Christoph Hahn*

Das Modul wird in englischer Sprache präsentiert und vermittelt umfassendes Wissen über moderne leistungselektronische Betriebsmittel, die zur Übertragung elektrischer Energie eingesetzt werden. Zunächst wird die grundlegende Wirkungsweise dieser Betriebsmittel in Wechselstromnetzen erläutert.

Ein Schwerpunkt liegt auf dem stationären Verhalten netzgeführter Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungssysteme (HGÜ-Systeme), das für Planungszwecke von zentraler Bedeutung ist. Bei der Analyse selbstgeführter HGÜ-Systeme steht hingegen das dynamische Verhalten im Vordergrund. Hierbei wird insbesondere auf die für EMT-Simulationen relevante Modellierung und Regelung des Betriebsmittels eingegangen. Der Fokus liegt hierbei auf dem Systemverhalten des Betriebsmittels.

Darüber hinaus werden Wechselstrom-Übertragungssysteme behandelt, die als regelbare Kompensationsanlagen dienen (FACTS). Auch hier konzentriert sich die Betrachtung auf das stationäre Verhalten und dessen Einfluss auf das Gesamtsystem. Das Modul bietet somit eine ausgewogene Mischung aus theoretischen Grundlagen und praxisorientierten Aspekten der Systemplanung.

## Power System Operations and Control

*Wahlpflichtfach, SS, 2V + 2Ü, 5 ECTS*  
*Dr.-Ing. Peter Hoffmann*

Die Vorlesung behandelt den Betrieb und die Systemführung im europäischen Übertragungsnetz vor dem Hintergrund wachsender Herausforderungen wie Strommarktentwicklung, grenzüberschreitender Handel und den Ausbau erneuerbarer Energien. Sie thematisiert die Zusammenarbeit der Übertragungsnetzbetreiber, regulatorische Rahmenbedingungen, neue Betriebswerkzeuge sowie die Rolle der Verteilnetzbetreiber.

Die Vorlesung findet auf Englisch statt, um eine einheitliche Fachterminologie und Kommunikation zu gewährleisten. Ergänzt wird die Vorlesung durch die Möglichkeit eines Praktikums in der Netzführung eines Übertragungsnetzbetreibers (zuletzt TenneT TSO, davor Swissgrid AG).

## Hochleistungsstromrichter

*Pflichtfach, WS, 2V + 2Ü, 5 ECTS*  
*Dr.-Ing. Gert Mehlmann*

Dezentrale Erzeuger wie Windkraft- und Photovoltaikanlagen werden über Stromrichter an das elektrische Netz angebunden. Außerdem erfüllen Stromrichter eine zentrale Rolle bei der Energieübertragung. Ihr Einsatz erstreckt sich über alle Spannungsebenen – von der Niederspannungsebene für kleinere dezentrale Anlagen bis hin zur Hoch- und Höchstspannungsebene für Großanlagen und Übertragungsnetze. Der Einsatz von Stromrichtern muss aufgrund ihrer möglichen Netzurückwirkungen jedoch sorgfältig geplant und analysiert werden. Diese Rückwirkungen können sich unter anderem auf die Spannungsqualität, die Entstehung von Oberschwingungen und das dynamische Verhalten des Netzes auswirken.

Eine wesentliche Grundlage für die Planung ist daher das Verständnis der stationären Betriebsvorgänge in Drehstromsystemen, die mit leistungselektronischen Betriebsmitteln (Stromrichtersystemen) ausgestattet sind. Dabei spielen die charakteristischen Kenngrößen solcher Systeme eine entscheidende Rolle.

In der Lehrveranstaltung wird daher die analytische Berechnung dieser Kenngrößen detailliert gezeigt, um ein tiefgehendes Verständnis der stationären und dynamischen Vorgänge zu vermitteln. Im Rahmen der Vorlesung werden Stromrichter für Hochleistungsanwendungen ausführlich behandelt. Ausgehend von den verschiedenen Stromrichtertopologien und deren Funktionsweise wird in der Vorlesung das stationäre Betriebsverhalten selbst- und netzgeführter Stromrichter im Zustandsraum beschrieben. Ergänzend behandelt die Vorlesung Methoden zur harmonischen Analyse von Stromrichtern und die Grundprinzipien ihrer Regelung.

## Regenerative Energiesysteme

*Pflichtfach, WS, 2V + 2Ü, 5 ECTS*  
*Univ.-Prof. Dr.-Ing. Johann Jäger*

Die Lehrveranstaltung befasst sich mit der Nutzung regenerativer Primärenergiequellen zur Umwandlung in mechanische und schlussendlich elektrische Energie. Im Fokus stehen die physikalischen Grundlagen und Umwandlungsprozesse der Primärenergieträger Wasser, Wind, Biomasse, direkte Sonnenenergie und Erdwärme. Dabei werden die technischen Potenziale und die Möglichkeiten zur Erhöhung der Prozesswirkungsgrade aufgezeigt.

Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf den Randbedingungen beim Betrieb regenerativer Energiesysteme im elektrischen Energieversorgungsnetz. Es werden die Herausforderungen bei der Integration erneuerbarer Energiesysteme in bestehende Versorgungsstrukturen sowie deren Betriebsverhalten analysiert und diskutiert.

Ziel ist es, ein umfassendes Verständnis für die Nutzung regenerativer Energien zu vermitteln und aktuelle Entwicklungen sowie deren technische und physikalische Zusammenhänge zu beleuchten.

## Thermische Kraftwerke

*Wahlpflichtfach, SS, 2V + 2Ü, 5 ECTS*  
*Univ.-Prof. Dr.-Ing. Johann Jäger*

Die Lehrveranstaltung behandelt das gesamte Spektrum der Wärmekraftwerke, einschließlich der Nutzung regenerativer, fossiler und nuklearer Primärenergiequellen. Es werden thermische Prozesse zur Energieumwandlung, wie sie beispielsweise in Braunkohle- oder Gaskraftwerken stattfinden, thematisiert.

Grundlage der Inhalte bildet die Einführung in die technische Thermodynamik. Diese ermöglicht die Beschreibung und Analyse der Umwandlungsprozesse von thermischer in mechanische Energie, basierend auf den Hauptsätzen der Thermodynamik. Ein besonderer Schwerpunkt liegt auf dem Verständnis der Prozessoptimierung, den Grundprinzipien der Kraftwerkstechnik sowie der Regelung von Kraftwerken im elektrischen Verbundnetz. Das Ziel der Veranstaltung besteht darin, ein fundiertes Wissen über die Prozesse und Herausforderungen in thermischen Kraftwerken zu vermitteln.

## Elektrische Energieversorgung mit erneuerbaren Energiequellen

*Wahlpflichtfach, WS, 2V + 2Ü, 5 ECTS*

*Univ.-Prof. Dr.-Ing. Johann Jäger, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Matthias Luther*

Die Integration erneuerbarer Energiequellen stellt eine zentrale Herausforderung und zugleich einen Schlüssel zur nachhaltigen Energieversorgung der Zukunft dar. Die Lehrveranstaltung vermittelt daher einen Überblick entlang der gesamten Kette von regenerativen Energiesystemen : von der Energieumwandlung über den Energietransport bis hin zur Verteilung und Nutzung. Besondere Schwerpunkte liegen auf der Analyse moderner Technologien zur Netzdienlichkeit von regenerativen Energieanlagen, der Planung und Regelung dezentraler Netzstrukturen, der Integration von Speichersystemen sowie der Sicherstellung der Netzstabilität.

Die Vorlesung verknüpft theoretische Grundlagen mit anwendungsorientierten Übungen, in denen die Studierenden praxisrelevante Fragestellungen lösen. Ziel ist es, die Zusammenhänge moderner Energienetze zu verstehen, Methoden zur Analyse und Optimierung anzuwenden sowie Lösungsansätze für reale Herausforderungen zu entwickeln. Eine Besonderheit der Lehrveranstaltung ist die Unterstützung durch zahlreiche Gastdozenten. Diese geben besonders aktuelle Einblicke in die Problemstellungen und Aufgabenbereiche in der Industrie, was insbesondere für Studierende am Ende des Masterstudiums sehr interessant ist.

## Planung elektrischer Energieversorgungsnetze

*Pflichtfach, WS, 2V + 2Ü, 5 ECTS*

*Univ.-Prof. Dr.-Ing. Johann Jäger*

Das Modul behandelt unterschiedliche Aufgabengebiete der Planung elektrischer Netze zur Energieübertragung und -verteilung. Es werden sowohl öffentliche Netze der Energieversorgungsunternehmen als auch Industrienetze betrachtet. Zu den Aufgaben gehören unter anderem die Erstellung von möglichst genauen Lastprognosen, Spannungshaltung, Kurzschlussstromberechnung, die Auswahl geeigneter Netzstrukturen, sowie die Sternpunktbehandlung, auf die besonderer Fokus gelegt wird. Dabei werden alle gängigen Methoden behandelt. Zudem werden sowohl die physikalischen als auch die technischen Kriterien, sowie die entsprechenden technischen Kenngrößen und Berechnungsverfahren besprochen. Des Weiteren werden für eine vollumfängliche Netzplanung auch wirtschaftliche Aspekte betrachtet.

## Schutz- und Leittechnik

*Wahlpflichtfach, SS, 2V + 2Ü (Blended Learning), 5 ECTS*

*Univ.-Prof. Dr.-Ing. Johann Jäger*

„Schutz- und Leittechnik“ behandelt die Grundlagen der Schutztechnik für die elektrische Energieversorgung und Teilgebiete der Leittechnik. Schutztechnik ist ein unverzichtbarer Bestandteil der elektrischen Energieversorgung, da sie den Schutz von Mensch und Betriebsmittel gewährleisten soll. Im Hinblick auf die steigende Komplexität hinsichtlich des Netzausbaus und Zubaus von Erneuerbaren Energie Anlagen bleibt ein Verständnis der Schutztechnik essentiell.

Zunächst werden mögliche fehlerfreie und fehlerbehaftete Netzzustände im Hinblick auf die Verarbeitung in den Schutzgeräten analysiert und analytisch beschrieben. Anschließend werden die wichtigsten Schutzkriterien und -algorithmen mit und ohne inhärenter Fehlerortselektivität besprochen und technisch bewertet.

Die Schutzgerätetechnik fasst unterschiedliche Schutzkriterien zusammen und passt die Funktionalität an die vorherrschenden Netzverhältnisse an. Darauf aufbauend werden Schutzkonzepte für unterschiedliche Netzstrukturen und die Bedeutung der Koordination der Schutzgeräte untereinander aufgezeigt.

## Hochspannungstechnik

*Wahlpflichtfach, WS, 2V + 2Ü, 5 ECTS*

*Dr.-Ing. Dieter Braisch*

Es wird ein Einblick in die physikalischen und technischen Grundlagen der Hochspannungstechnik vermittelt. Die Spannungsbelastung der Betriebsmittel und die daraus entstehende elektrische Beanspruchung der Isolierstoffe soll qualitativ bewertet und quantitativ ermittelt werden können. Hierzu werden die physikalischen Vorgänge beim Durchschlag in gasförmigen, flüssigen und festen Isolierstoffen näher betrachtet. Im Rahmen der Isolationskoordination in elektrischen Netzen wird der Schutz vor Überspannungen in Form von Wanderwellen durch Blitzeinschläge und Schaltvorgänge anhand von Überspannungsableitern betrachtet. Bei Schaltvorgängen werden die physikalischen Grundlagen der Lichtbogenlöschung und Spannungsfestigkeit abhängig von den Schaltgerätetypen vermittelt.

## Markt und Netze - Systemlösungen für die Energiewende

*Wahlpflichtfach, SS, 3V + 1Ü, 5 ECTS*

*Univ.-Prof. Dr.-Ing. Matthias Luther, Dr. Ing. Christoph Maurer*

Zentral für eine nicht nur technisch machbare, sondern auch ökonomisch effiziente Dekarbonisierung des europäischen Energieversorgungssystems ist der institutionelle Rahmen z. B. für Energiemärkte und den Umgang mit Energie-Infrastrukturen. Die Lehrveranstaltung vermittelt einen Überblick über diesbezügliche Fragen. Sie beginnt mit einer Einführung in Energiebilanzen und -szenarien und diskutiert Maßnahmen zum Umgang mit CO<sub>2</sub>-Emissionen und dem Klimawandel. Nach einer Erläuterung wesentlicher methodische Ansätze der ökonomischen Kostenrechnung erfolgt eine Einführung in die Funktionsweise von Energiemärkten. Daran anschließend werden Fragestellung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien und der Gewährleistung von Versorgungssicherheit vor dem Hintergrund der Energiewende und den resultierenden Herausforderungen für die Stromnetze diskutiert. Die Vorlesung schließt mit einem Überblick über die Flexibilisierung des Stromsystems durch erzeugungs- und lastseitige Flexibilitätspotenziale und die Dekarbonisierung der Sektoren Wärme und Verkehr durch Sektorkopplungstechnologien.

## Internationale Energiewirtschaft und Unternehmensführung

*Wahlpflichtfach, WS, 2V + 2Ü, 5 ECTS*

*Prof. Dr. Ing. Martin Konermann*

Nach einer Analyse der Weltenergiebilanz werden die Entwicklung und die aktuelle Struktur der Elektrizitätswirtschaft in Deutschland (Erzeugung, Verteilung, Anwendung beim Endverbraucher) umfassend beschrieben. Es erfolgt eine Analyse der wichtigsten Teilnehmer am Elektrizitätsmarkt. Die durch die Liberalisierung aufgrund der neuen Gesetzgebung in der Europäischen Union und des neuen deutschen Energiewirtschaftsgesetzes zu erwartenden Veränderungen werden aufgezeigt. Darauf aufbauend werden im internationalen Bereich die Energiewirtschaften Westeuropas (u.a. Österreich, Schweiz, Großbritannien) und Osteuropas (u.a. Tschechien, Ungarn, Polen) sowie beispielhaft für die asiatischen Wachstumsmärkte die Energieversorgung Thailands analysiert.

Der dritte Teil beschäftigt sich mit den Chancen und Risiken der Globalisierung, die sich für deutsche Energieversorgungsunternehmen (EVU) ergeben. Dabei stellt sich das Problem der Unternehmensbewertung und der Investitionsabsicherung im Ausland; es wird dargestellt, welche Methoden, Probleme und Lösungsmöglichkeiten existieren.

Das abschließende Kapitel gibt einen Überblick über die Unternehmensführung von EVU. Hierbei wird beschrieben, welche technischen und welche kaufmännischen Funktionen (Controlling, Finanzierung) zur Führung eines modernen EVU erforderlich sind.

## Digitale Netzberechnung

*In Vorbereitung*

Ingenieure lösen Probleme heutzutage selten per Hand oder mit dem Taschenrechner. Auch in der elektrischen Energietechnik kommen bei Netzberechnungen nahezu ausschließlich spezialisierte Simulationsprogramme zum Einsatz. Das Modul Digitale Netzberechnung vermittelt die fachlichen Kompetenzen, die für einen reflektierten und effektiven Umgang mit solchen Werkzeugen erforderlich sind.

Zu Beginn werden die Grundlagen der Modellierung elektrischer Betriebsmittel sowie wesentliche Aspekte der Numerik behandelt.

Der Schwerpunkt des Moduls liegt anschließend auf den gängigen Arten von Netzberechnungen, darunter stationärer Lastfluss, EMT-, RMS-Simulation und Modalanalyse. Neben den spezifischen Modellvereinfachungen wird hierbei auch die zugrunde liegende Algorithmik erläutert.

Ziel des Moduls ist es, den Studierenden ein fundiertes Verständnis dafür zu vermitteln, wie die gängigen Simulationsanwendungen im Hintergrund funktionieren und welche Einstellungen für die gewünschten Ergebnisse notwendig sind. Damit werden sie in die Lage versetzt, Simulationssoftware kompetent und kritisch einzusetzen.

## 2.2 Praktika

### Arbeitstechnik

*Pflichtfach, WS, 2,5 ECTS*

*Wissenschaftliche Mitarbeitende*

Die Veranstaltung „Arbeitstechnik“ ist ein wichtiger Bestandteil des ersten Semesters im Bachelorstudiengang Elektrotechnik Elektronik und Informationstechnik. Sie zielt darauf ab, die Studierenden an der FAU willkommen zu heißen, in das Studium einzuführen sowie grundlegende Fähigkeiten für ein erfolgreiches Studium und den späteren Berufsweg zu vermitteln.

Die Studierenden sollen in die Lage versetzt werden, ihre Studienzeit effizient zu gestalten, Präsentationen professionell durchzuführen und wissenschaftliche Arbeiten korrekt zu verfassen. Darüber hinaus werden soziale Kompetenzen wie Teamfähigkeit und Kommunikationsstärke gefördert, die für den späteren beruflichen Erfolg unerlässlich sind.

### Elektrische Energieversorgung

*Wahlpflichtfach, WS, 2,5 ECTS*

*Dr.-Ing. Gert Mehlmann*

Mit dem Praktikum wird das Ziel verfolgt, den Studierenden ein breites, fundiertes und anwendungsorientiertes Wissen zu vermitteln.

Ein wesentlicher Bestandteil des Praktikums ist die digitale Netzberechnung. Hierbei erwerben die Teilnehmerinnen und Teilnehmer wichtige Grundlagen zur Modellierung, Analyse und Bewertung elektrischer Netze. Ergänzt wird die digitale Netzberechnung durch praktische Versuche an einem Drehstromdemonstrationsmodell (DDM). Dieses Modell ermöglicht es, wesentliche Prozesse und Mechanismen aus der realen Netz- und Kraftwerkstechnik nachzustellen und zu analysieren. Ein besonderer Fokus liegt auf den Themen Netzschutz und Netzsynchrosation von Synchronmaschinen. Die Studierenden lernen, wie Schutzsysteme in elektrischen Netzen funktionieren, welche Schutzmechanismen in unterschiedlichen Netzsituationen greifen und wie Synchronmaschinen sicher an ein bestehendes Netz angeschlossen werden. Ein weiterer wichtiger Aspekt des Praktikums ist die Untersuchung von Wanderwellenphänomenen an Kabeln und Freileitungen im Labor.

### Stromrichter in der Energieversorgung

*Wahlpflichtfach, SS, 2,5 ECTS*

*Dr.-Ing. Gert Mehlmann*

Das Praktikum baut auf der Vorlesung Hochleistungsstromrichter auf und richtet sich gezielt an Studierende im Masterstudium der Elektrotechnik oder verwandter Fachrichtungen. Den Studierenden wird in sieben aufeinander abgestimmten Versuchen sowie einem vorbereitenden Tutorium ein fundiertes und praxisnahes Wissen zu Stromrichtern und deren Anwendung in der modernen Energieversorgung vermittelt. Die Versuche decken ein breites Themenspektrum ab und behandeln zentrale Fragestellungen der Stromrichtertechnik. Dazu gehören die Regelung von netz- und selbstgeführten Stromrichtern, Basic Design, der Einsatz von Stromrichtern in Microgrids, Versuche an einem Labor-MMC-Umrichters sowie der Adaptivschutz bei Zwischensystemeinspeisungen von Stromrichtern.

Das Praktikum wird im Speicher- und im Echtzeitlabor des Lehrstuhls durchgeführt. Die Kombination von Echtzeitsimulation und praktischen Versuchen im Speicherlabor bildet die ideale Grundlage, um den Teilnehmerinnen und Teilnehmern die Funktionsweise, Regelung und Anwendung von Stromrichtern in elektrischen Netzen anschaulich zu vermitteln.

### Hochspannungstechnik

*Wahlpflichtfach, WS und SS, 2,5 ECTS*

*Dr.-Ing. Dieter Braisch*

Das Praktikum baut auf der Vorlesung Hochspannungstechnik auf und richtet sich gezielt an Studierende im Masterstudium der Elektrotechnik oder verwandter Fachrichtungen. Für die Versuchsdurchführung stehen den Studierenden die Hochspannungsprüfhalle sowie zwei weitere Hochspannungsprüfkabinen des Lehrstuhls zur Verfügung. In vier Versuchen werden exemplarisch typische Problemstellungen der Hochspannungstechnik behandelt. Nach einer einführenden Erläuterung der jeweiligen Aufgabenstellung bauen die Studierenden die Versuche selbstständig auf, führen Messreihen durch, dokumentieren wissenschaftlich die Ergebnisse und bewerten diese abschließend.

Die behandelten Themen umfassen unter anderem Isoliertechnik, Hochfrequenztechnik, Messtechnik und chemische Aspekte der Hochspannungstechnik.

Aufgrund der potenziellen Gefahren durch Hochspannung erfolgen die Versuche erst nach einer umfassenden Sicherheitsbelehrung und unter strengen Sicherheitsvorkehrungen. Die Studierenden werden dabei kontinuierlich betreut. Diese Sicherheitsaspekte stellen einen zentralen Bestandteil des Praktikums dar und vermitteln ein grundlegendes Verständnis für den sicheren Umgang mit Hochspannung.

## 2.3 Hauptseminare

### Moderne Trends in der elektrischen Energieversorgung

*Wahlpflichtfach, WS und SS, 2,5 ECTS  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Johann Jäger*

Im Seminar wird eine Bandbreite von Themen behandelt, die aktuelle Problemstellungen sowie zukünftige Entwicklungen in der Energieversorgung betreffen. Dabei werden die Themen an aktuellen Forschungsfragen oder Erkenntnissen ausgerichtet, um für die Studenten einen Einblick in die Entwicklungen in der Energietechnik zu ermöglichen.

Das Seminar findet sowohl im Sommer- als auch Wintersemester statt und läuft in einem offenen Rahmen um eine flexible Zusammenarbeit zwischen Student und Betreuer zu erlauben. Die Abgabe der Arbeit wird durch einen Vortrag abgerundet, um die Fähigkeiten zur Präsentation von wissenschaftlichen Ergebnissen zu fördern.

### Nachhaltige Energiesysteme

*Wahlpflichtfach, WS und SS, 2,5 ECTS  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Matthias Luther*

In diesem Seminar werden die Grundlagen des Nachhaltigkeitsbegriffs vermittelt, um darauf aufbauend relevante Forschungsfragen im Bereich der elektrischen Energieversorgung bearbeiten zu können. Die Studierenden können aus einer Vielzahl von Fragestellungen wählen und erarbeiten gemeinsam mit ihrem Betreuer eine wissenschaftliche Arbeit, die durch einen entsprechenden Vortrag ergänzt wird.

Der Fokus liegt auf der Vermittlung von Methodenkompetenzen, die für zukünftige Abschlussarbeiten unerlässlich sind. Insbesondere wird die Fähigkeit geschult, Wissen systematisch zu recherchieren, miteinander zu verknüpfen und gezielt zur Beantwortung der Fragestellung aufzubereiten. Neben der schriftlichen Ausarbeitung wird besonderer Wert auf die Qualität des Vortrags sowie die Entwicklung eines klaren wissenschaftlichen Storylinings gelegt.

### Elektrische Energieversorgung

*Wahlpflichtfach, WS und SS, 2,5 ECTS  
Dr.-Ing. Gert Mehlmann*

Das Seminar legt seinen inhaltlichen Schwerpunkt auf aktuelle Themen aus dem Bereich der Netzberechnung und -simulation. Dabei werden sowohl grundlegende theoretische Konzepte als auch praxisnahe Anwendungen behandelt, um den Teilnehmerinnen und Teilnehmern ein umfassendes Verständnis für die Herausforderungen und Lösungsansätze in der modernen Energieversorgung zu vermitteln.

Das Seminar findet regelmäßig jedes Semester statt und wird überwiegend in den Semesterferien abgehalten, um eine intensive und konzentrierte Auseinandersetzung mit den Inhalten zu ermöglichen. Ein besonderes Highlight des Seminars sind die Gastvorträge von Experten aus der Industrie, die wertvolle Einblicke in aktuelle Fragestellungen und Entwicklungen in der Energietechnik geben. Diese praxisorientierten Beiträge bieten den Teilnehmern nicht nur einen direkten Bezug zur realen Arbeitswelt, sondern zeigen auch konkrete Anwendungen der theoretischen Inhalte auf. Ziel des Seminars ist es, den Studierenden sowohl das notwendige Fachwissen als auch die Fähigkeit zur eigenständigen Bearbeitung von Fragestellungen aus dem Bereich der elektrischen Energieversorgung zu vermitteln. Darüber hinaus bietet das Format Raum für Diskussionen und Austausch zwischen den Studierenden, Lehrenden und den eingeladenen Fachleuten aus der Praxis.

### Hochspannungs- und Diagnosetechnik

*Wahlpflichtfach, WS und SS, 2,5 ECTS  
Dr.-Ing. Dieter Braisch*

Im Seminar werden aktuelle Problemstellungen und zukünftige Entwicklungen in der Hochspannungstechnik behandelt. Dabei werden Methodenkompetenzen vermittelt, die für zukünftige Abschlussarbeiten nötig sind: Systematische Recherche neuer Problemstellungen samt Lösungsansätzen, sinnvolle Zusammenfassung der Ergebnisse in einer schriftlichen Ausarbeitung und einem Vortrag. In der anschließenden Diskussion wird auf die Fragen der Hörer eingegangen.

## 2.4 Exkursionen

Exkursionen sind ein essenzieller Bestandteil der akademischen Ausbildung am Lehrstuhl und ermöglichen den Studierenden wertvolle Einblicke in die praktische Anwendung der erlernten Inhalte. Neben der traditionsreichen Pflingstexkursion werden auch regelmäßig kürzere Exkursionen im Rahmen von Lehrveranstaltungen angeboten, die gezielt auf spezifische Themenbereiche der Energietechnik ausgerichtet sind.

### 2.4.1 Exkursionen zu Lehrveranstaltungen

Neben der großen Pflingstexkursion sind auch kleinere eintägige Exkursionen Bestandteil der Lehrveranstaltungen, um praxisnahe Einblicke zu ermöglichen. Diese Exkursionen bieten den Studierenden die Möglichkeit, spezifische Anlagen und Prozesse direkt vor Ort kennenzulernen und das parallel in den Lehrveranstaltungen vermittelte Wissen in der realen Praxis anzuwenden.

Am Lehrstuhl gibt es Exkursionen, die regelmäßig jedes Jahr stattfinden. In der Lehrveranstaltung Betriebsmittel und Komponenten elektrischer Energiesysteme wurde zusammen mit der Lehrveranstaltung Hochspannungstechnik in den letzten beiden Jahren die Bayrischen Kabelwerke in Roth sowie das Transformatorwerk von Siemens Energy in Nürnberg besichtigt. Im Rahmen der Lehrveranstaltung Betriebsverhalten elektrischer Energiesysteme wird typischerweise eine Netzleitstelle besichtigt, zuletzt die Leitstelle der Bayernwerke und die Leitstelle von TenneT in Dachau. Darüber hinaus erhalten Studierende in der Lehrveranstaltung Power Electronics in Three-Phase AC Networks regelmäßig Einblicke in die Umrichtertechnologien durch die Exkursion zur Converter Factory von Siemens Energy nach Nürnberg.



Exkursion Dachau 2019



Exkursions-Grillen 2023

Besonderer Dank gebührt Prof. Luther, Dr. Braisch und Dr. Hahn, sowie den zahlreichen Wissenschaftlichen Mitarbeitenden, die sich in den vergangenen Jahren für die Organisation und Durchführung der Exkursion engagiert haben.



Exkursion Bayka 2024



Exkursion Siemens Trafowerk 2025

### 2.4.2 Unsere große Exkursion

Die große Exkursion oder auch die „Pflingstexkursion“ ist eine mehrtägige, traditionsreiche Studienreise des Lehrstuhls, die Studierenden einen direkten und praxisnahen Einblick in die Energietechnik ermöglicht. Ursprünglich fand die Exkursion jedes Jahr in der vorlesungsfreien Woche nach Pflingsten statt – daher der Name, der sich bis heute gehalten hat. Diese Tradition reicht bis zu den Anfängen des Lehrstuhls zurück. Im Laufe der Zeit haben sich die Rahmenbedingungen und Vorlesungszeiten immer wieder geändert, doch die Exkursion selbst blieb bis heute als besonderes Highlight des Studiums fest verankert.

Inhaltlich steht die Besichtigung von verschiedenen Anlagen und Betrieben im Zentrum der Reise. So besichtigen die Teilnehmenden Kraftwerke unterschiedlichster Art, beispielsweise Kern-, Kohle-, Wasser- oder GuD-Kraftwerke, besuchen Schaltanlagen und Netzleitstellen und erhalten darüber hinaus Einblicke in Produktionsprozesse oder andere energieintensive Industriezweige. Gerade dabei wird deutlich, welche enorme Bedeutung und Komplexität die Elektrische Energietechnik in der Praxis besitzt. Das in den Vorlesungen erworbene fundierte Wissen lässt sich durch die direkte Anschauung vor Ort vertiefen und besser begreifen.

Ein zentrales Element der Pflingstexkursion ist der enge Austausch zwischen Studierenden, Lehrenden und den Fachleuten vor Ort. In diesem Rahmen können die angehenden Ingenieurinnen und Ingenieure erste berufliche Kontakte knüpfen und erleben gleichzeitig, wie vielseitig die Einsatzfelder in der Energietechnik sind. Dass die Reise von echtem Teamgeist geprägt ist, zeigt sich nicht zuletzt auch in der gemeinsamen Unterbringung (z. B. in Hostels oder Jugendherbergen) sowie bei geselligen Abenden, die den Zusammenhalt in der Gruppe stärken.

Besonderer Dank gebührt Prof. Gretsche, Prof. Herold und Prof. Jäger, sowie den zahlreichen wissenschaftlichen Mitarbeitenden, die sich in den vergangenen Jahren für die Organisation und Durchführung der „Pfungstexkursion“ engagierten.

### Stationen der letzten 25 Jahre

2000: Weimar und Dresden

2001: München und Wien

2002: Berlin, Greifswald und Rostock

2003: Budapest

2004: Deutschland-Nordwest - Emden und Düsseldorf

2005: Zürich und Freiburg

2006: Arnheim, Den Haag und Delft

2007: Tirol, Bergamo und Mailand

2008: Kassel, Hameln und Hamburg

2009: Zürich, Basel und Freiburg

2010: Arnheim, Den Haag und Delft

2011: Leipzig und Dresden

2012: Hamburg, Hannover, Geesthacht und Husum

2013: Stuttgart und Karlsruhe

2014: Rheinisches Braunkohlerevier - Bonn, Jülich und Wegberg

2015: Graz und Wien

2016: München, Bregenz, Leibstadt und Freiburg

2017: Berlin

2018: Rund um den Bodensee - Heidenheim, Leibstadt und München

2019: Hannover, Hamburg und Kassel

2020: Ausfall aufgrund von Corona

2021: Ausfall aufgrund von Corona

2022: Leipzig und Dresden

2023: Bodensee, Basel und Freiburg

2024: Leipzig und Dresden

2025: München, Augsburg und Stuttgart

Die nachfolgenden Abbildungen beschreiben einige markante Stationen und Schnappschüsse.



GuD Nossener Brücke 2000



Braunkohletagebau Welzow-Süd 2000



HS-Schaltanlage Oberbachern 2001



Hauptschaltleitung Karlsfeld 2001



Geselliger Abend 2003



Busfahrt nach Budapest 2003



Elektronen-Synchrotron (DESY) Hamburg 2019



ICE Werk Hamburg 2019



Tagebau Vereinigtes Schleenhain 2022



Kraftwerk Irsching Exkursion 2023



Talsperre Hohenwarte 2024



Kraftwerk Schkopau 2024

### 3 Forschung

Die Forschung am Lehrstuhl für Elektrische Energiesysteme umfasst die Entwicklung, die Analyse und den Betrieb von nachhaltigen elektrischen Energiesystemen. Hierbei liegt der Fokus besonders auf der Modellierung und Analyse großer Netzstrukturen mit hoher Durchdringung von leistungselektronischen Umrichtern, der Bewertung der Systemstabilität aktiver Verteilnetze und dem Netzschutz. Weitere Forschungsthemen liegen im Bereich der hybriden Speichersysteme und Microgrids sowie deren netzdienliche Steuerung und Optimierung.

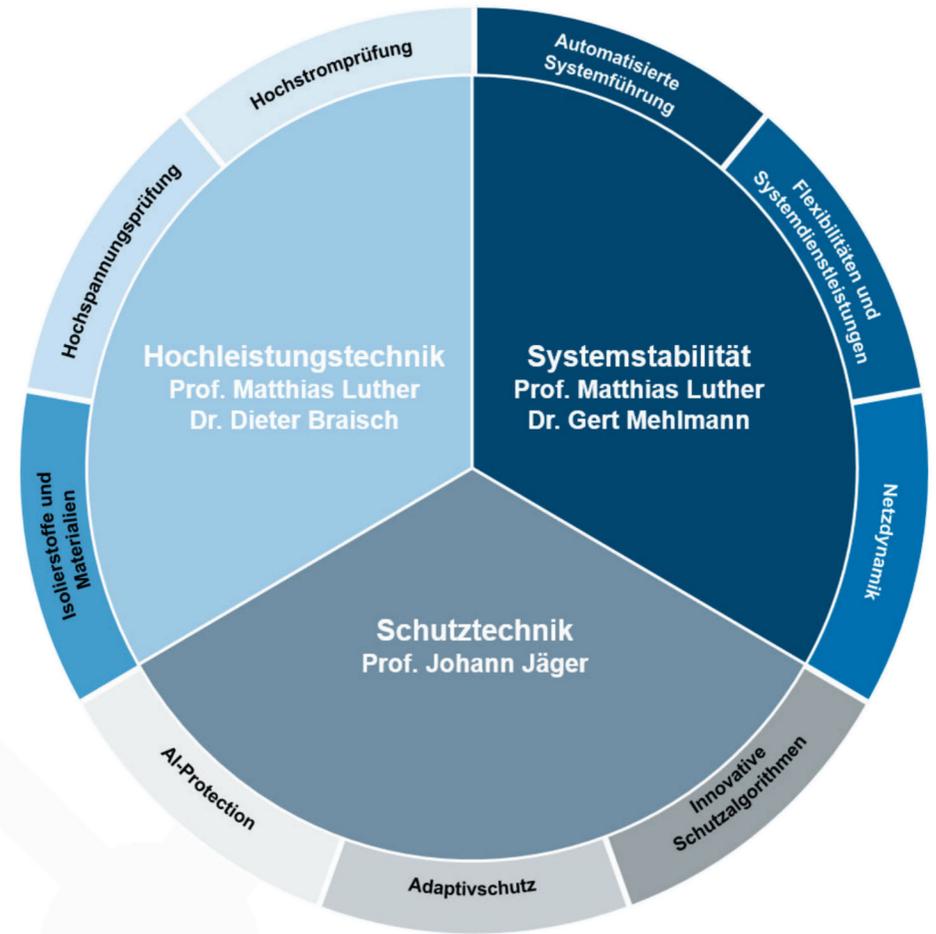


Abb. 1: Aktuelle Forschungsthemen

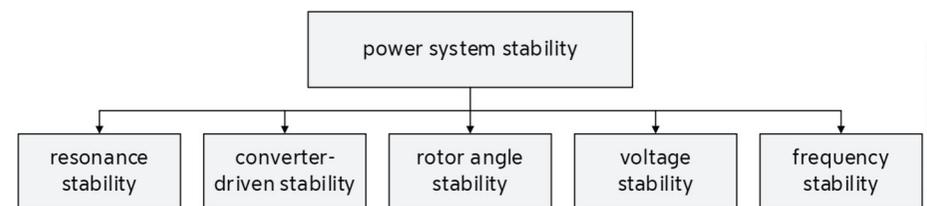
Da die elektrische Energieversorgung ein großes zusammenhängendes System darstellt, gibt es einige Synergien zwischen den einzelnen Fachbereichen, bei denen die Arbeitsgruppen in Forschungsprojekten zusammenarbeiten und sich gegenseitig fachlich ergänzen.

Innerhalb der elektrischen Energieversorgung lassen sich die in Abb. 1 dargestellten Schwerpunkte und Zuständigkeiten identifizieren. Die Systemstabilität umfasst die Automatisierte Systemführung, Flexibilitäten und Systemdienstleistungen, und nicht zuletzt die Netzdynamik selbst. Dem Bereich der Hochleistungstechnik gehören die Disziplinen der Hochstrom- und Hochspannungsprüfung, sowie die Erforschung von Isolierstoffen und Materialien an. Das Forschungsgebiet der Schutztechnik reicht von innovativen Schutzalgorithmen, über Adaptivschutz bis hin zu AI-Protection.

## 3.1 Systemstabilität

### 3.1.1 Überblick

Ein stabiler Netzbetrieb ist die grundlegende Voraussetzung zum Erhalt der Versorgungssicherheit in elektrischen Energieversorgungssystemen. Mit der Energiewende und der zunehmenden Integration dezentraler und regenerativer Erzeuger wächst jedoch die Komplexität Systemstabilität langfristig sicherzustellen. Dabei ist Stabilität ein komplexer Begriff, der verschiedene physikalische Aspekte des Netzverhaltens umfasst. Klassisch wird zwischen Spannungsstabilität, Frequenzstabilität und Polradstabilität unterschieden. Mit der zunehmenden Integration leistungselektronischer Komponenten und dezentraler Erzeuger in modernen Stromnetzen erweitern sich die klassischen Stabilitätsbetrachtungen um neue Phänomene. Hierzu zählen Wechselwirkungen leistungselektronischer Erzeuger (converter-driven stability), welche durch die Regelung von Stromrichtern entstehen und zu ungewollten Schwingungen oder Abschaltungen führen können. Des Weiteren können harmonische Ausgleichsvorgänge (harmonic stability) auftreten durch die Ausbreitung und Überlagerung von Oberschwingungen, die vor allem durch leistungselektronische Betriebsmittel verursacht werden.



Quelle: CIGRE/IEEE

Abb. 2: Klassifizierung der Netzstabilität

Die Stabilität eines Stromsystems muss dabei stets im Kontext von Störungen betrachtet werden, sei es durch Netzfehler, Lastsprünge oder Änderungen in der Erzeugung. Der Begriff Power Quality (im deutschen oft nur Spannungsqualität) ergänzt die Systemstabilität als weiteres zentrales Qualitätsmerkmal in der elektrischen Energieversorgung.

Power Quality beschreibt die Abweichung von Sollwerten bei Spannung, Frequenz und Strom im quasistationären Betrieb. Sie fungiert somit als Gütefaktor oder Qualitätskriterium. Darüber hinaus kann eine unzureichende Power Quality direkten Einfluss auf die Stabilität des Systems haben. Beispielsweise können Spannungseinbrüche, Oberschwingungen oder Flicker die systemischen Limitierungen einzelner Netzabschnitte überschreiten und zu größeren Problemen mit der Systemstabilität führen. So können Oberschwingungen beispielsweise die Regelkreise leistungselektronischer Betriebsmittel stören, was zu Instabilitäten und ungeplanten Abschaltungen führen kann.

## Automatisierte Systemführung

Die Entwicklung automatisierter Systemführungsprozesse gerät aufgrund der sich ändernden Erzeugungslandschaft und der Integration leistungsflusssteuernder Akteure vermehrt in den Fokus. Zu den betrachteten Akteuren gehören sowohl leistungselektronische Stellglieder (HGÜ, FACTS, Grid Booster) als auch der Netzschutz. Durch die aktive und systemdienliche Regelung derzeit rein passiv betriebener Akteure, werden neuartige Betriebsführungsprozesse ermöglicht und können den klassischen Konzepten gegenübergestellt werden.

Vor dieser Problemstellung verfolgt der Lehrstuhl den Ansatz die Stabilität des Netzes zu bewerten und durch präventive und kurative Systemeingriffe zu verbessern. Neu entwickelte Regelungskonzepte und Systemautomatiken sollen Eingriffe in Echtzeit ermöglichen und die dabei die zeitlichen Restriktionen im operativen Betrieb optimieren. Als Werkzeuge stehen hierbei klassische offline Berechnungsverfahren für die stationäre und dynamische Netzsicherheitsrechnung zur Verfügung. Neu entwickelte Prozesse zur stationären und dynamischen Netzsicherheitsrechnung, Regelungen und Betriebsführungskonzepte können hinsichtlich ihrer Praxistauglichkeit mittels digitaler Zwillinge und Hardware-in-the-Loop im Echtzeitsimulationslabor erprobt und verifiziert werden.

## Flexibilitäten und Systemdienstleistungen

Das Energiesystem der Zukunft wird sehr stark von dezentraler Erzeugung und Sektorenkopplung geprägt sein. Da die regenerativen Erzeugungsanlagen aufgrund ihrer geringen gesicherten Leistung konventionelle Kraftwerke nicht eins zu eins ersetzen können, werden innovative Betriebsmittel und -konzepte zur Wahrung der Systemstabilität benötigt. Im Fokus stehen hier vor allem flexible Betriebsmittel wie Batteriespeicher und sektorenggekoppelte Betriebsmittel wie mobile Speicher und wasserstoffbasierte Anlagen, die in das Gesamtsystem integriert werden müssen. Um die aufkommenden bidirektionalen Leistungsflüsse bewältigen und die Stabilität der verschiedenen Netzebenen trotz fluktuierender, dezentraler Einspeisung gewährleisten zu können, werden innovative Lösungen sowohl auf Systemebene als auch im Bereich Netzregelung und IKT benötigt.

Am Lehrstuhl werden hierbei Forschungsthemen im Bereich hybrider Kraftwerke, Mikronetze, sowie netzdienlicher und neuartiger Regelungen für das Energie- und Anlagenmanagement der Zukunft verfolgt.

Diese werden mit Hilfe von Offline- und Echtzeitsimulationen entwickelt und anschließend an echten Betriebsmitteln getestet. Hierzu wurde das flexible Niederspannungslabor in Nürnberg aufgebaut. Dort ist ein hybrides Mikronetz mit PV-Anlagen, Speichern und Testlasten realisiert, an denen die entwickelten Konzepte im Rahmen von Hardware-in-the-Loop-Versuchen im realen Betrieb validiert werden.

## Netzdynamik

Aufgrund der Substitution konventioneller Kraftwerke durch umrichterbasierte Erzeugungsanlagen und der steigenden Anzahl aktiver Betriebsmittel verändert sich die Netzdynamik grundlegend. Vor dem Hintergrund sinkender Momentanreserve und einer angestrebten Höherauslastung des Übertragungsnetzes ist eine umfangreiche Analyse des Systemverhaltens erforderlich.

Am Lehrstuhl wird daher an der Modellierung, Simulation und Bewertung von Netzmodellen im deutschen und europäischen Kontext gearbeitet. Für die Modellierung von elektrischen Netzen und Betriebsmitteln kommen kommerzielle Softwaretools wie DIgSILENT PowerFactory, PSS Netomac oder PSCAD zum Einsatz. Darüber hinaus werden neue Ansätze verfolgt, um kritische Systemzustände zu identifizieren und hinsichtlich verschiedener Stabilitätsaspekte zu bewerten.

### 3.1.2 Hybridkraftwerke zur Flexibilisierung der Einspeisung erneuerbarer Energien

*Julian Richter, M. Sc.*

Wind- und Photovoltaikparks (PV) stellen mittlerweile wesentliche Säulen der Stromerzeugung dar. Bisher werden diese direkt in die jeweilige Spannungsebene des Stromnetzes eingespeist, was mit zunehmender Volatilität und steigender Netzauslastung einhergeht. Kritische Netzsituationen führen dabei nicht selten zur Abregelung von erneuerbaren Energieanlagen, wodurch wertvolle Energiepotenziale ungenutzt bleiben. Zusätzlich verdrängen Erneuerbare Energieanlagen zunehmend konventionelle Einspeisungen und mit ihnen deren Flexibilitätspotentiale. Diese müssen in Zukunft von Speichersystemen (z. B. Batterien oder Power-to-X) bereitgestellt werden. Eine Herausforderung besteht also darin, erneuerbare Energien effizient und stabil in das Stromnetz zu integrieren, um eine klimaneutrale Energieversorgung unter Wahrung der Systemstabilität zu gewährleisten.

Ein entscheidender Faktor in diesem Kontext ist die Technologie, auf der erneuerbare Energien basieren. Windkraft- und PV-Anlagen, sowie Batteriespeicher, Elektrolyseure und Brennstoffzellen arbeiten größtenteils mit Gleichstrom (DC). Die Netzkopplung zwischen der DC- und AC-Seite erfolgt über einen Gleichstrom-Zwischenkreis, wobei ein Wechselrichter die Umwandlung übernimmt. Dieses technische Merkmal bietet neue Möglichkeiten zur Optimierung der Netzintegration. Anstatt jede erneuerbare Energieanlage individuell an das Netz anzuschließen, wird in einem innovativen Konzept eine Bündelung geeigneter Technologien – etwa Windkraft, Photovoltaik und Speicher – in einem sektorenggekoppelten Hybridkraftwerk mit Mittelspannungs-Gleichstromnetz (MVDC) untersucht.

Diese Hybridkraftwerke ermöglichen eine gemeinsame Einspeisung der verschiedenen regenerativen Energiesysteme und flexiblen Betriebsmittel in das Netz und ermöglichen dadurch eine stabilere und planbarere Energieversorgung.

Das Konzept bietet Vorteile: Durch die Speicherung von Energie können Schwankungen im Stromangebot kurz- und langfristig ausgeglichen werden, wodurch eine gleichmäßigere Einspeisung aus erneuerbaren Energien ermöglicht wird.

Anstatt überschüssige Energie in Zeiten hoher Produktion abregeln zu müssen, kann sie zwischengespeichert und gezielt zu Zeiten erhöhter Nachfrage abgerufen werden. Dies trägt maßgeblich zur Wahrung der Systemstabilität bei und verhindert unnötige Energieverluste.

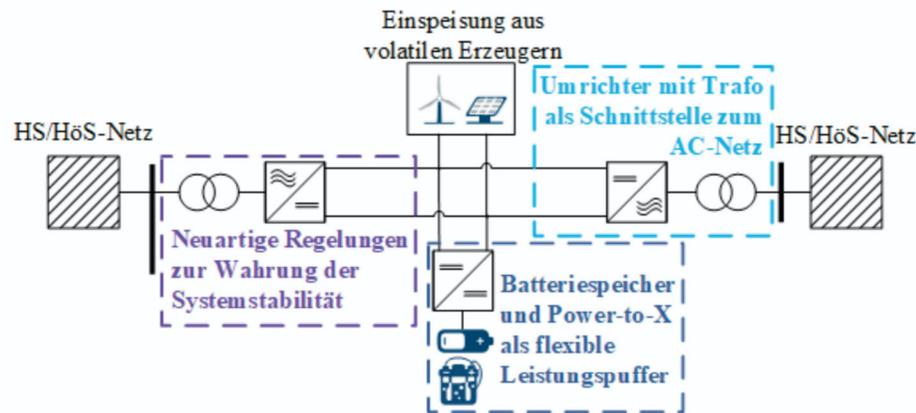
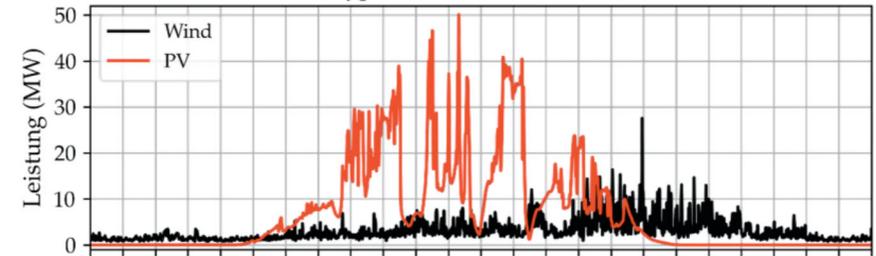


Abb. 3: Übersicht eines Hybridkraftwerks mit zwei Netzanschlusspunkten

In einem zukünftigen Energiesystem, das auf hohen Anteilen von Wind- und Solarstrom basiert, sind netzbildende Erzeugungseinheiten essenziell für die Systemstabilität. Das Hybridkraftwerk erlaubt durch die flexiblen, reaktionsschnellen Betriebsmöglichkeiten von konverterbasierten Speichersystemen einen Einsatz von netzbildenden Umrichtern an den Kopfstationen direkt auf Hoch- und Höchstspannungsebene. Damit einhergehend ist die inhärente Bereitstellung verschiedener Systemdienstleistungen wie Momentanreserve, Leistungs-Frequenzregelung, Spannungshaltung und Schwarzstartfähigkeit.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Hybridkraftwerke eine vielversprechende Lösung zur Flexibilisierung erneuerbarer Energien darstellen. Durch die Bündelung und Speicherung der erzeugten Energie wird nicht nur eine planbare Einspeisung ermöglicht, sondern auch die Notwendigkeit von Abregelungen reduziert und essenzielle Systemdienstleistungen bereitgestellt.

a) Typische Wind und PV Profile



b) Leistungen innerhalb von DC-Einspeisenetzen

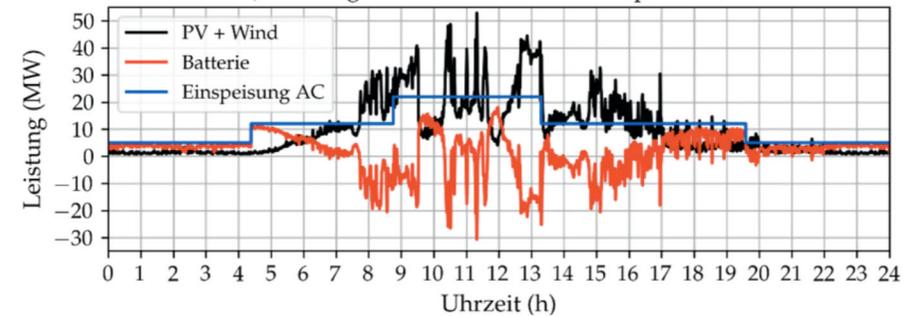


Abb. 4: Beispielhafter Tagesverlauf der Leistungen innerhalb des Hybridkraftwerks und am Netzanschlusspunkt

### 3.1.3 Einfluss der Modulation auf harmonische Interaktionen in umrichterdominierten Netzen

Andreas Bammes, M. Sc.

Die zunehmende Integration von Umrichtern in unsere Stromnetze infolge des wachsenden Anteils regenerativer Energien führt zu einer Zunahme harmonischer Interaktionen. Um den historisch existierenden Strom- und Spannungssinus möglichst genau nachzubilden, werden die auf Halbleiterschaltern basierenden Umrichter mit einem Modulator ausgestattet. Dieser erzeugt durch Variation der Pulsbreite Schaltsequenzen, die an den zugrundeliegenden Referenzsinus angepasst sind. Hierdurch ergibt sich die Notwendigkeit, die Stabilitätsbetrachtungen auf den kHz-Frequenzbereich zu erweitern, da sich typische Schaltfrequenzen zur Umrichtermodulation in diesem Spektrum befinden. In diesem Bereich können harmonische Interaktionen sowohl zwischen Umrichtern selbst als auch zwischen Umrichtern und anderen Netzkomponenten auftreten. Während die Wechselwirkungen zwischen Regelung und Netzstruktur intensiv erforscht werden, ist der Einfluss des Modulators auf diese Phänomene bislang wenig untersucht. Diese Kausalität ergibt sich aus der Tatsache, dass der Modulator meist aus der Perspektive des Betriebsmittels entwickelt wird – mögliche Auswirkungen auf das Netz werden dabei bislang vernachlässigt.

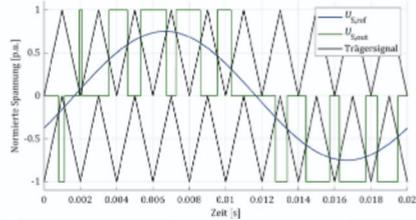


Abb. 5: Beispielhafte Darstellung einer Sinus-Dreieck-PWM

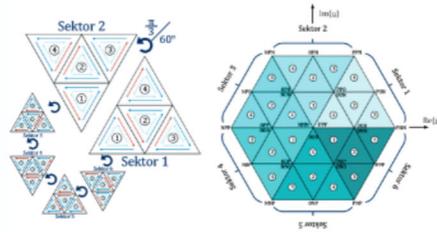


Abb. 6: Beispielhafte Darstellung einer Raumzeiger-PWM eines 3-Level Umrichters

Das Ziel des vorgestellten Forschungsvorhabens ist es, genau diesen Einfluss der Modulation auf das Stabilitätsverhalten in umrichterdominierten Stromnetzen zu untersuchen. Analysiert werden hierfür die Zusammenhänge zwischen Umrichtermodulation und supersynchronen harmonischen Interaktionen. Nach der simulativen Implementierung verschiedener mathematisch repräsentierter Modulationsverfahren sollen folgende Forschungshypothesen untersucht werden:

- Der Modulator hat einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf harmonische Interaktionen zwischen den Umrichtern selbst sowie zwischen Umrichtern und dem Netz.
- Bereits die Einhaltung einfacher Raumzeiger-Symmetriebedingungen im Modulator kann zur Vermeidung von Netzurückwirkungen führen.
- Höhere Schaltfrequenzen des Modulators erleichtern die Dämpfung der Oberschwingungen, führen aber zu höheren Verzerrungen an den Umrichterklappen und können in bestimmten Konfigurationen bei benachbarten Umrichtern kritischer sein als niederfrequente Modulationsverfahren.
- Die harmonische Interaktion zwischen Modulator und Regelung des einspeisenden Umrichters sowie zwischen benachbarten Umrichtern ist möglich und stark von der Schaltzahl abhängig.
- Ein Paradigmenwechsel bei der Gestaltung des Modulators nach Anforderungen aus Netzperspektive ist notwendig, wobei das Betriebsmittel die Randbedingungen definiert.

Methodisch werden im Zuge des Vorhabens eigenwertbasierte Analysen sowie impedanzbasierte Verfahren eingesetzt, um kritische Resonanzstellen zu identifizieren und deren Kopplung mit harmonischen Oberschwingungen zu untersuchen. Ebenso findet eine Charakterisierung der für die Untersuchungen notwendigen Modelltiefe statt. Durch die simulative Änderung der in Modulationsverfahren variablen Parameter (z. B. Schaltfrequenz oder Modulationsgrad) werden verschiedene realistische Betriebsszenarien repliziert.

Als Ergebnis wird angestrebt, potenzielle Fehlerquellen durch den Modulator zu identifizieren, die für ein Abweichen von einer sicheren Betriebsführung sorgen können, um durch deren Kenntnis den Weg zu einem umrichterdominierten Stromnetz zu ebnet. Als Forschungsergebnis sollen deshalb Guidelines abgeleitet werden, die Rahmenbedingungen für Modulationsverfahren in Abhängigkeit von der jeweiligen Betriebsumgebung definieren. Diese sollen anschließend durch die Realisierung eines Power-Hardware-in-the-Loop-Testnetzes im Zusammenspiel von Echtzeitsimulatoren und Verstärkern in den Laboren am Standort Nürnberg validiert werden.

### 3.1.4 Optimierung eines sektorgekoppelten Niederspannungsnetzes mithilfe von Digitalen Zwillingen

*Timo Wagner, M. Sc.*

Die Transformation der Energieerzeugung bringt tiefgreifende strukturelle Veränderungen in den Strom-, Wärme- und Transportsektoren mit sich. Durch die Elektrifizierung des Mobilitäts- und Wärmesektors werden alle drei Sektoren miteinander verknüpft, sodass Wechselwirkungen entstehen. Diese bringen große Vorteile, etwa die Optimierung und Steuerung von Energieflüssen, bergen aber auch Risiken wie beispielsweise eine höhere Netzauslastung durch den Zubau großer Verbraucher oder die verstärkte volatile Einspeisung erneuerbarer Energien.

Der verstärkte Einsatz von Elektrofahrzeugen und Wärmepumpen erzeugt neue, dynamische Lastprofile und erhöht die Anforderungen an Netzkapazität, -stabilität und Versorgungsqualität. Zudem führt die Einspeisung aus erneuerbaren Energieanlagen zu einer teilweisen Umkehr der klassischen Leistungsflüsse von der Höchst- zur Niederspannungsebene, was zusätzliche Herausforderungen für das Netzmanagement mit sich bringt.

Um diesen Herausforderungen zu begegnen, wird parallel zur Elektrifizierung die Digitalisierung vorangetrieben. Sie ermöglicht eine verbesserte Überwachung der Netzinfrastruktur. Besonders im Niederspannungsnetz schreitet der Ausbau erneuerbarer Stromerzeugung rasch voran, während die Beobachtbarkeit vielerorts noch unzureichend ist. Daher ist die konsequente Digitalisierung von entscheidender Bedeutung, um den Zustand des elektrischen Netzes jederzeit zu kennen und in kritischen Situationen angemessen reagieren zu können. Die Digitalisierung und Flexibilisierung des Niederspannungsnetzes umfasst zunächst die Integration von Sensorik und Aktorik. Transformatorstationen werden dabei mit moderner Messtechnik ausgestattet, und gemäß §14a EnWG erfolgt die flächendeckende Installation von Smart Metern an jedem Netzanschlusspunkt der Haushalte. Die durch Sensorik erfassten Datenströme ermöglichen eine präzisere Überwachung und Visualisierung des Netzzustands.

Dadurch können kritische Szenarien frühzeitig erkannt und das Netz effizienter und näher an seiner maximalen Auslastung betrieben werden.

Über die Aktorik werden Steuermechanismen in das Niederspannungsnetz integriert, die gezielt auf Verbrauchs- und Erzeugungsanlagen zugreifen und so eine optimierte Steuerung des Leistungsflusses ermöglichen. Dies erlaubt beispielsweise eine flexible Anpassung des Lastverhaltens, eine Symmetrierung der Netzlast oder eine gezielte Reduktion von Einspeisespitzen. Eine effiziente Datenverarbeitung ist dabei von zentraler Bedeutung, um die relevanten Informationen für das Netzmanagement aufzubereiten und Handlungsanweisungen für die Aktoren abzuleiten.

Hierbei lassen sich manuelle, teilautomatisierte und automatisierte Eingriffe unterscheiden. Eine effektive Methode zur Verarbeitung der entstehenden Datenströme und zur Ableitung von Handlungsempfehlungen stellt der Digitale Zwilling dar.

Der Einsatz des Digitalen Zwillings bietet eine innovative Möglichkeit zur Datenverarbeitung und effektiven Nutzung der gewonnenen Informationen. Als virtuelle Repräsentation einer physischen Entität ist der Digitale Zwilling unter Verwendung von Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) eng mit dem realen System verbunden. Durch den Digitalen Zwilling lassen sich verschiedene Dienste und Funktionen realisieren, darunter:

Live-Monitoring, das eine kontinuierliche Überwachung des Netzzustandes ermöglicht und frühzeitig auf kritische Betriebssituationen hinweist.

Automatische Steuerungsmaßnahmen, die auf Echtzeitinformationen basieren und die Betriebseffizienz sowie die Netzsicherheit erhöhen. Simulationsbasierte Analysen, die präventive und kurative Maßnahmen sowie Optimierungen untersuchen und die Netzplanung und den -betrieb langfristig verbessern.

Für die Datenanbindung, Simulation und Regelung des physischen Niederspannungsnetzes als Digitalen Zwilling eignet sich ein Echtzeitsimulator, der die Simulationsumgebung für den Digitalen Zwilling bereitstellt. Der Echtzeitsimulator bietet zahlreiche Schnittstellen für analoge und digitale Signale sowie typische energietechnische Kommunikationsprotokolle. Darüber hinaus können über Hardware-in-the-Loop (HiL)-Simulationen physische Hardwarekomponenten angeschlossen und getestet werden, etwa eine Regelungseinheit mit einem Optimierungsalgorithmus für das Netzgebiet.

Der Digitale Zwilling kann zudem als Simulation für eine Leitwarte eingesetzt werden, um ein umfassendes Operator-Training durchzuführen, ohne die Integrität des realen Stromnetzes zu gefährden. Hierzu wird der Betriebsfall des Digitalen Zwillings von der Echtzeit-Datenanbindung getrennt und als eigenständige Echtzeitsimulation ausgeführt. Diese Simulation wird an die Leitwarte angebunden, sodass innerhalb der Echtzeitsimulation verschiedene Szenarien ausgelöst werden können.

Dadurch erhalten die Netzbetreiber die Möglichkeit, kritische Situationen gezielt zu trainieren und somit ihr Handlungsrepertoire zu erweitern sowie ihre Reaktionsfähigkeit in solchen Szenarien zu verbessern. Das gesamte Konzept ist in der nachfolgenden Abb. 7 dargestellt.

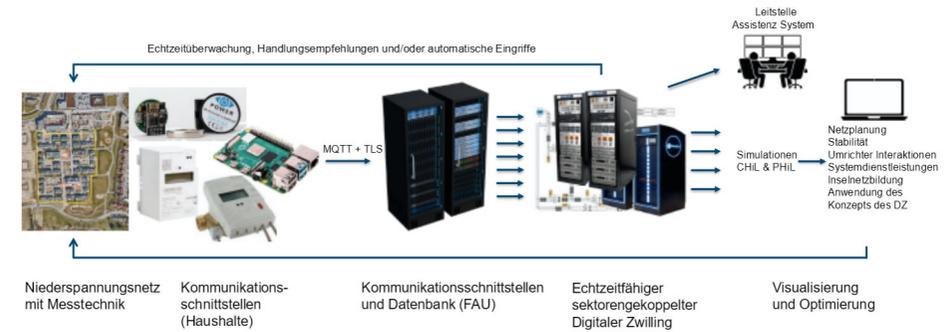


Abb. 7: Datenübertragung zur Anbindung eines Digitalen Zwillings

Die Elektrifizierung der Wärme- und Mobilitätssektoren eröffnet neue Potenziale für den netzdienlichen und kostenoptimierten Betrieb von Niederspannungsnetzen bis hin zur Gründung von Energiegemeinschaften. Der optimierte Betrieb und die Erhöhung des Automatisierungsgrades werden anhand eines implementierten, echtzeitfähigen Digitalen Zwillings eines Niederspannungsnetzgebiets in Erlangen erforscht.

### 3.1.5 Spannungsstabilität in umrichterdominierten Netzen

Elisabeth Scheiner, M. Sc.

Die Energiewende bringt fundamentale Veränderungen für das Energieversorgungssystem mit sich. Der Ausbau erneuerbarer Energien und die verstärkte Integration umrichterbasierter Ressourcen (Inverter-Based Resources, IBR) stellen die Netzinfrastruktur vor erhebliche Herausforderungen. Besonders die Spannungsstabilität rückt dabei zunehmend in den Fokus. Während konventionelle Großkraftwerke durch ihre physikalischen Eigenschaften früher maßgeblich zur Netzstabilität beitrugen, erfordert der Übergang zu einem umrichterdominierten System die Entwicklung neuer Technologien und Strategien.

Ein wesentlicher Wandel zeigt sich in der Dezentralisierung der Energieerzeugung. Erzeuger und Verbraucher befinden sich heute oft räumlich weit voneinander entfernt, was dazu führt, dass sich sogenannte Spannungstrichter – lokale Spannungsabsenkungen – über größere Netzbereiche erstrecken können. Diese Entwicklung erschwert die Spannungshaltung und erhöht das Risiko von Instabilitäten.

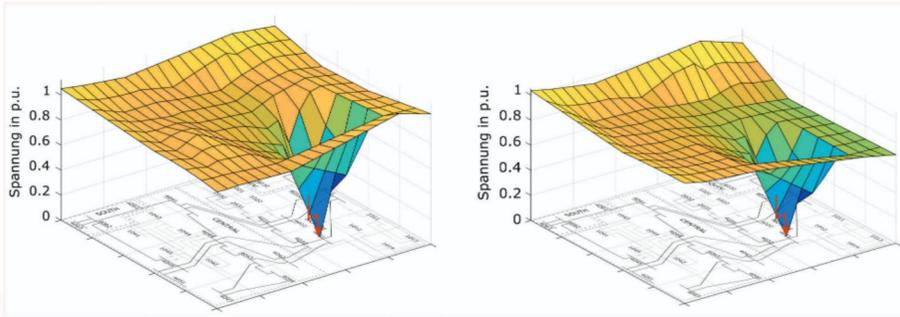


Abb. 8: Ausdehnung des Spannungstrichters mit zunehmender Erneuerbarer Erzeugung

Netzbetreiber stehen dadurch vor der Herausforderung, die Planung und den Betrieb des Übertragungsnetzes an diese veränderten Bedingungen anzupassen.

Im Bereich der Netzverstärkung spielen flexible Betriebsmittel wie Blindleistungskompensationsanlagen eine zentrale Rolle bei der Stabilisierung moderner Energiesysteme. Insbesondere STATCOMs (Static Synchronous Compensators) leisten durch ihre schnelle und präzise Regelung einen wesentlichen Beitrag zur Spannungsstabilität. Diese Anlagen können sowohl induktive als auch kapazitive Blindleistung bereitstellen und ermöglichen eine effektive Spannungsstützung, selbst unter dynamischen Bedingungen dezentralisierter Netze. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der Analyse und Modellierung der komplexen Wechselwirkungen zwischen Betriebsmitteln und Netzstrukturen.

Dynamische Netzmodelle, die das Verhalten von Umrichtern und anderen Betriebsmitteln unter realistischen Bedingungen abbilden, bieten eine wichtige Grundlage, um potenzielle Schwachstellen durch Störfallanalysen frühzeitig zu identifizieren und geeignete Gegenmaßnahmen zu entwickeln.

Durch diesen Ansatz lassen sich Szenarien der Energiewende realitätsnah simulieren und optimieren. Die Integration moderner Regelungsverfahren und Betriebsmittel trägt dazu bei, die Versorgungssicherheit auch in einem zunehmend umrichterdominierten Netz zu gewährleisten.

Die Ergebnisse dieser Forschungsarbeiten liefern wertvolle Erkenntnisse zur Spannungsstabilität und schaffen eine belastbare Grundlage für die erfolgreiche Umsetzung der Energiewende. Mithilfe analytischer Methoden, praxisnaher Handlungsempfehlungen und simulationsbasierter Optimierungen wird der Übergang zu einem nachhaltigen Energiesystem effektiv unterstützt. Innovative Ansätze zur Sicherstellung der Spannungsstabilität in umrichterdominierten Energiesystemen werden entwickelt. Netzberechnungen und Störfallanalysen erfolgen in PowerFactory, während ein Analyse- und Optimierungstool in Python programmiert wird, das kritische Spannungssituationen identifiziert und Gegenmaßnahmen wie STATCOM-Anlagen optimiert platziert und dimensioniert.

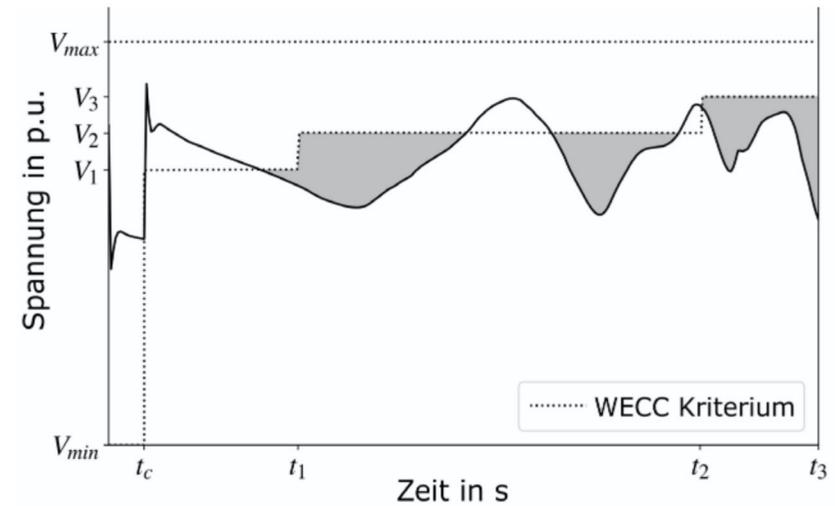


Abb. 9: Dynamische Spannungsstabilitätsbewertung mit dem WECC-Kriterium

Dynamische und stationäre Stabilitätsindikatoren werden untersucht, um Spannungs- und Blindleistungsregelungen den Anforderungen moderner Energiesysteme anzupassen. Realistische Modellierungen verschiedener Szenarien der IBR-Ausbaustufen ermöglichen es, Netzschwachstellen frühzeitig aufzuzeigen und die Wirksamkeit von Gegenmaßnahmen zu bewerten. Die gewonnenen Erkenntnisse bilden eine fundierte Entscheidungsgrundlage zur Sicherstellung der Stabilität und Zuverlässigkeit des Stromnetzes in einer zunehmend dekarbonisierten Energieversorgung.

### 3.1.6 Interaktionsstudien in umrichterdominierten Microgrids

Sebastian Streit, M. Sc.

Die fortschreitende Elektrifizierung und die zunehmende Integration erneuerbarer Energien führen zu einem Wandel in der Stromversorgung hin zu dezentralen Strukturen. Microgrids, als Zusammenschluss mehrerer Energieanlagen, spielen dabei eine wichtige Rolle. Sie bestehen überwiegend aus leistungselektronischen Wandlern, die Erzeuger, Speicher und Verbraucher koppeln. Während Microgrids eine hohe Flexibilität und Effizienz bieten, stellen sie zugleich neue Herausforderungen für die Stabilität und Regelung elektrischer Energiesysteme dar.

Ein zentrales Forschungsfeld ist die Untersuchung der Interaktionen zwischen Umrichtern, die durch Kopplungseffekte, Resonanzen oder unerwartete dynamische Wechselwirkungen die Systemstabilität beeinflussen können.

Besonders im Inselbetrieb oder in schwach gekoppelten Netzen können komplexe Phänomene wie niederfrequente Oszillationen oder instabiles Verhalten auftreten.

Mit dem zunehmenden Einsatz netzbildender Umrichter verändert sich zudem das dynamische Verhalten der Netze grundlegend. Im Gegensatz zu netzgeführten Umrichtern, die sich an eine bestehende Netzspannung anpassen, übernehmen netzbildende Systeme aktiv die Frequenz- und Spannungsregelung. Diese neuartigen Betriebsweisen bringen zusätzliche Interaktionsmechanismen mit sich, die einerseits zur Stabilisierung des Systems beitragen, andererseits aber auch unerwartete dynamische Effekte auslösen können, – insbesondere in dezentralen Strukturen mit mehreren netzbildenden Einheiten.

Ein tiefgehendes Verständnis dieser Interaktionsmechanismen ist daher essenziell, um robuste Regelstrategien und geeignete Systemarchitekturen zu entwickeln, die eine stabile und zuverlässige Betriebsführung umrichterdominierter Microgrids gewährleisten.

Zur Sicherstellung der Betriebssicherheit umrichterdominierter Microgrids werden verschiedene Analysemethoden erforscht. Neben simulativen Ansätzen gewinnen Kleinsignalanalysen zunehmend an Bedeutung, da sie detaillierte Einblicke in die Systemdynamik ermöglichen und die Ursachen potenzieller Instabilitäten aufzeigen.

Ein wesentliches Werkzeug in diesem Kontext ist die Modalanalyse, mit der die Eigenbewegungen (Moden) des Systems untersucht und hinsichtlich ihres Dämpfungsverhaltens bewertet werden. Hierfür wird deren Lage in der komplexen Ebene betrachtet, wobei ein negativer Realteil für ein abklingendes Verhalten der entsprechenden Mode steht (siehe Abb. 10). Durch die Klassifikation der Moden anhand der zugehörigen Eigenvektoren lassen sich Rückschlüsse auf die Ursachen möglicher Instabilitäten ziehen.

Ein weiteres etabliertes Verfahren zur gezielten Untersuchung von Wechselwirkungen zwischen Betriebsmitteln und dem restlichen Netz ist die impedanzbasierte Stabilitätsanalyse. Dabei wird das Gesamtsystem am Anschlusspunkt des Umrichters in Quelle und Senke unterteilt. Die Wechselwirkungen zwischen diesen beiden Bereichen werden anhand der jeweiligen Übertragungsfunktionen und deren Zusammenspiel untersucht. In Abb. 11 ist der Frequenzgang eines netzfolgenden Umrichters dargestellt. Dieser bewertet die Übertragungsfunktion entlang der imaginären Achse.

Üblicherweise wird das elektrische Netz bei der Modalanalyse unter Vernachlässigung elektromagnetischer Übergangsvorgänge modelliert. Dadurch können insbesondere niederfrequente Vorgänge präzise abgebildet werden. Da Umrichter im Gegensatz zu konventionellen Kraftwerken jedoch auch aktives Verhalten im höherfrequenten Bereich aufweisen, werden alternative Modellierungsansätze untersucht, um diesen Effekten Rechnung zu tragen.

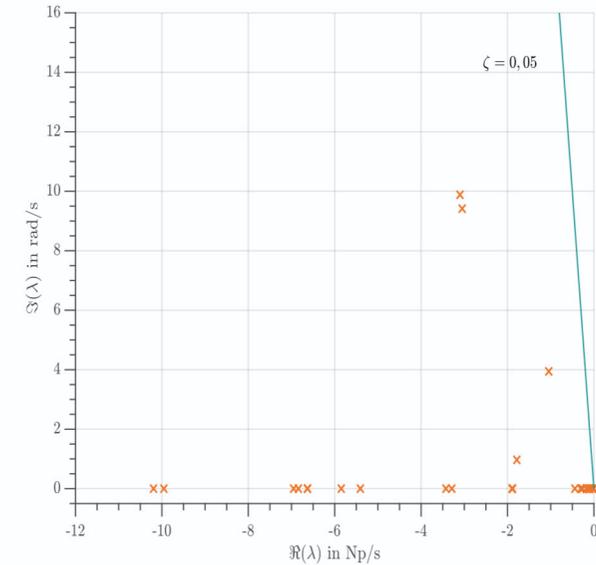


Abb. 10: Moden eines Beispielsystems

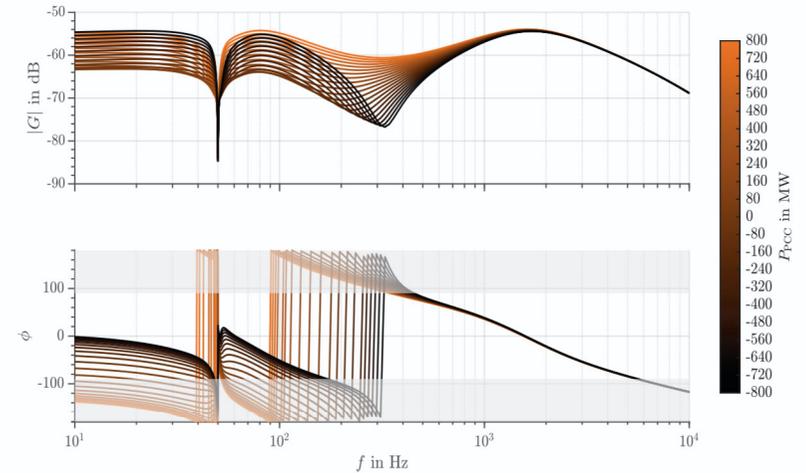


Abb. 11: Frequenzgang eines netzfolgenden Umrichters in Abhängigkeit des Arbeitspunkts

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Kombination aus Modalanalyse, impedanzbasierten Verfahren und erweiterten Modellierungsansätzen maßgeblich dazu beitragen kann, das Verhalten umrichterdominierter Microgrids besser zu verstehen. Durch diese Erkenntnisse können stabile und zuverlässige Betriebsstrategien entwickelt werden, die sowohl den heutigen als auch zukünftigen Herausforderungen dezentraler Energiesysteme gerecht werden.

### 3.1.7 Netzbildende Fähigkeiten von Hybridkraftwerken

Niloofer Kamalhosseini, M. Sc.

Die Integration von umrichterbasierten Energieerzeugungsanlagen (Inverter-based Resources, IBRs) gewinnt zunehmend an Bedeutung für den Übergang zu erneuerbaren Energiequellen. Die steigende Integration von IBRs führt jedoch zu Herausforderungen hinsichtlich der Bereitstellung von Systemdienstleistungen, der Zuverlässigkeit und des Netzbetriebs. Daher werden durch Netzanschlussrichtlinien verbindliche Vorschriften eingeführt, die am Netzanschlusspunkt (Point of Common Coupling, PCC) einzuhalten sind. Ein Parkregler (Power Plant Controller, PPC) spielt hierbei eine entscheidende Rolle bei der Regelung von IBRs. Der PPC koordiniert, regelt und überwacht die IBRs innerhalb der Anlage und stellt sicher, dass die vorgegebenen Netzanschlussrichtlinien am PCC erfüllt werden.

In zukünftigen umrichterdominierten Netzen sind netzbildende Umrichter entscheidend für die Netzstabilität. Da die zunehmende Komplexität und die Wechselwirkungen zwischen den Systemkomponenten eine ganzheitliche Betrachtung erfordern, konzentriert sich diese Forschung auf die Sicherstellung des netzbildenden Verhaltens auf Anlagen- und Systemebene mithilfe des Parkreglers.

Ein besonderer Fokus liegt dabei auf der Bereitstellung synthetischer Trägheit durch den PPC, wodurch die Frequenzänderungsgeschwindigkeit (Rate of Change of Frequency, ROCOF) begrenzt wird. Ein langsamerer ROCOF ermöglicht eine ausreichende zeitliche Flexibilität für die automatische Aktivierung von Wirkleistungsreserven. Dies führt zu einer effizienteren und zuverlässigeren Unterstützung bei der Frequenzstabilität. Darüber hinaus wird die Dämpfung von Wirk- und Blindleistungsschwingungen sowie von Spannungsschwingungen als eine Funktion des PPC untersucht. Zudem wird der PPC um neue Funktionen erweitert, um netzbildende Fähigkeiten am Netzanschlusspunkt sicherzustellen. Zur Validierung des Parkreglers am gesamten System bietet sich der Einsatz von Hardware-in-the-Loop-Tests an. Hierbei wird im Echtzeitlabor des Lehrstuhls für Elektrische Energiesysteme das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten unter realistischen Bedingungen getestet.

Die Integration netzbildender Umrichter stellt einen Paradigmenwechsel im Stromnetz dar. Dieser erfordert, dass sich der PPC an eine zunehmend dynamische Umgebung anpasst, in der die Umrichter nicht mehr passive Teilnehmer, sondern aktive Akteure bei der Aufrechterhaltung der Netzstabilität sind. Diese Forschung konzentriert sich auf die netzbildenden Fähigkeiten auf Anlagenebene sowie die Koordination und Interaktion zwischen verschiedenen Netzkomponenten durch den PPC. Dabei werden auch die Beschaffung von Momentanreserve aus Hybridkraftwerken sowie Entwicklungen aus der Roadmap Systemstabilität berücksichtigt. Abb. 12 illustriert ein Hybridkraftwerk sowie den Datenfluss und die Interaktion zwischen PPC und Umrichter.

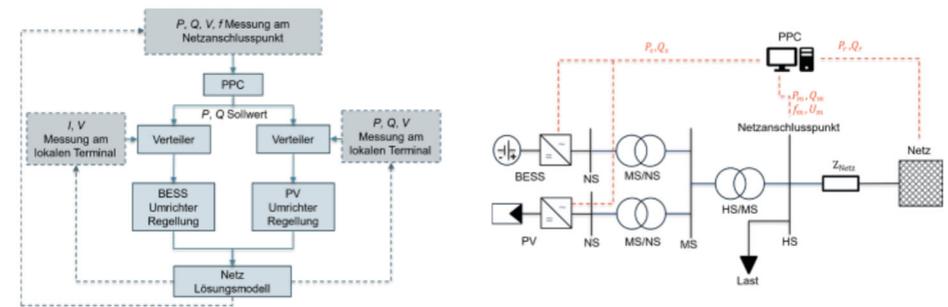


Abb. 12: Kommunikation zwischen PPC und Umrichter in einem Hybridkraftwerk

### 3.1.8 Erhöhung der Verfügbarkeit von Niederspannungsnetzen durch Einsatz von Automatisierung

Anushi Tripathi, M. Sc. M.E.

Das Projekt GridAssist ist eine Forschungsinitiative zur Optimierung des automatisierten Systemmanagements in Verteilnetzen. Ihr Hauptziel ist es, die Netzstabilität, -effizienz und -flexibilität durch die Integration von Automatisierung, künstlicher Intelligenz (KI) und Echtzeitsimulationen zu verbessern. Dies ist insbesondere deshalb von entscheidender Bedeutung, weil erneuerbare Energiequellen und dezentrale Energiesysteme immer weiter ausgebaut werden und daher fortschrittliche Netzmanagementlösungen erforderlich sind.

GridAssist ist Teil der Förderinitiative OptiNetD im 8. Energieforschungsprogramm des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK).

Der Schwerpunkt liegt darauf, die Verfügbarkeit von Niederspannungsnetzen durch Automatisierung zu erhöhen. Dies wird durch den Einsatz messgestützter Automatisierung und eingebetteter KI erreicht, um die Netzwerkbeobachtung zu verbessern und Engpässe zu reduzieren. Die Feldtests validieren Algorithmen, die für die Automatisierung des Niederspannungsnetzmanagements entwickelt wurden. Die Ergebnisse werden dazu beitragen, Methoden zu verfeinern, Visualisierungstools für Netzbetreiber zu verbessern und die Skalierbarkeit über verschiedene Netze hinweg sicherzustellen. Das Projekt legt den Schwerpunkt auf Echtzeit-Datenverarbeitung, KI-gesteuerte Analyse und Integration mit Kontrollräumen, um ein proaktives Netzmanagement zu ermöglichen.

Nach der Entwicklung und abschließenden Prüfung der Algorithmen wird die eingebettete KI in einem Umspannwerk der Energieversorgung Gera GmbH installiert, um die Feldtests vorzubereiten, in denen die Lastprognose im realen Betrieb getestet wird.

### 3.1.9 Instabilitätsphänomene in elektrischen Energiesystemen mit hohem Anteil umrichterbasierter Betriebsmittel

Dominik Frauenknecht, M. Sc.

Mit fortlaufender Substitution von konventionellen Kraftwerken durch leistungselektronische Betriebsmittel, wie Windenergieanlagen, Photovoltaikanlagen und Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungen, erfolgt ein Systemwandel weg von Synchronmaschinen hin zu umrichterbasierten Betriebsmittel. Ein Absinken der netzstabilisierenden Eigenschaften der Synchronmaschine, wie der Bereitstellung von Momentanreserve, der Dämpfung von Harmonischen und der Spannungsstabilität, sind nur einige Folgen.

Darüber hinaus können durch den Einfluss der Umrichter in einem großen Frequenzbereich, aufgrund von langsam und schnell agierenden Regelungssystemen, steigt die Gefahr von neuen Instabilitätsphänomene im Netz. Im Hinblick auf die Änderungen des Stabilitätsverhalten des Netzes wurden die converter-driven stability und die resonance stability als neue Stabilitätsklassen eingeführt.

Im Rahmen dieses Forschungsschwerpunkts sollen Instabilitäten, die aus dem Regelungsverhalten von umrichterbasierten Betriebsmitteln resultieren, zunächst mathematisch beschrieben werden. Aufbauend darauf sollen Methoden entwickelt und Einflussgrößen abgeleitet werden, um Instabilitätsphänomene identifizieren und bewerten zu können. Als Grundlage dient die dynamische Netzsicherheitsprüfung (Dynamic Security Assessment, DSA), welche anhand von dynamischen Fehlersimulationen und der Auswertung über Indikatoren die Stabilität des aktuellen Netzzustandes wiedergibt, wie in Abb. 13 dargestellt ist.

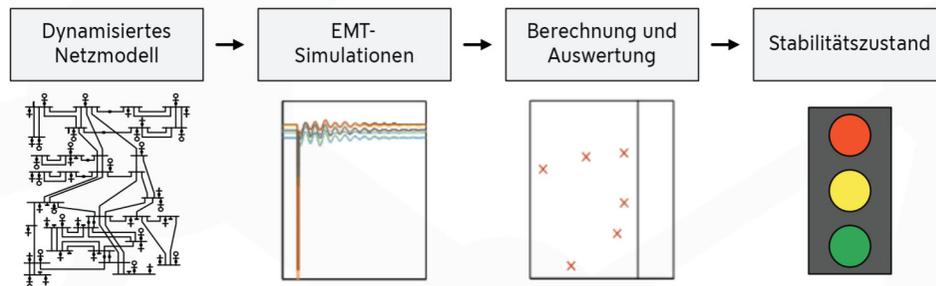


Abb. 13: Konzept zur dynamischen Stabilitätsbewertung (DSA)

Weitere Indikatoren für die Stabilität von umrichterbasierten Betriebsmittel werden abgeleitet und in den DSA-Prozess aufgenommen.

Da nur EMT-Simulationen Instabilitätsphänomene, die durch das Betriebsverhalten von Umrichtern hervorgerufen werden, adäquat wiedergeben kann, findet die EMT-Simulation für den DSA-Prozess Anwendung. Als Untersuchungsgrundlage dienen sowohl netzfolgendes als auch netzbildendes Umrichterbetriebsverhalten.

Aufbauend auf den Ergebnissen des DSA-Prozesses sollen Maßnahmen gegen die identifizierten Instabilitätsphänomene entwickelt und die Netzstabilität damit erhöht werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass mit dem steigenden Anteil umrichterbasierter Betriebsmittel ein Wandel in der Netzsicherheitsbewertung erfolgen muss. In diesem Vorhaben werden neue Ansätze zur Stabilitätsbewertung mit Einfluss von Umrichterregelungen erarbeitet und in einem DSA-Prozess in EMT implementiert und geprüft. Die gewonnen Erkenntnisse und Methodiken sollen zukünftig die Netzsicherheit im laufenden Betrieb verbessern, sowie bei der Netzplanung in der Auslegung von Umrichteranforderungen unterstützen.

### 3.1.10 Aktive Inselnetzbildung für hochdynamische Verteilnetze

David Riebesel, M. Sc.

Die Energiewende in Deutschland führt zu fundamentalen Veränderungen im Energieversorgungssystem. Mit dem Osterpaket vom 07.07.2022 wurden die Ausbauziele für erneuerbare Energien (EE) signifikant erhöht, was insbesondere die Windenergie- und Photovoltaikanlagen betrifft. Dieser Übergang von konventionellen Kraftwerken hin zu einem höheren Anteil an erneuerbaren Energiequellen bringt neue Herausforderungen für die Netzinfrastruktur mit sich, insbesondere in Bezug auf die Flexibilität und Stabilität der Verteilnetze.

Ein zentraler Aspekt dieser Entwicklung ist die geänderte Struktur der Stromerzeugung. Während konventionelle Kraftwerke vorwiegend an höheren Spannungsebenen ( $\geq 110$  kV) angeschlossen sind, befinden sich viele EE-Anlagen im Mittelspannungsbereich ( $\leq 110$  kV). Dieser Paradigmenwechsel im Erzeugungsmix, bedingt durch die Stilllegung fossiler und nuklearer Kraftwerke, erfordert eine Anpassung der Betriebsstrategien der Verteilnetzbetreiber (VNB). Die Herausforderung besteht darin, die Leistungsflüsse und die Betriebspunkte der Verteilnetze neu zu gestalten, um den Anforderungen einer zunehmend dezentralisierten Energieversorgung gerecht zu werden.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Fähigkeit zur Inselbildung in Verteilnetzen. Obwohl diese im Normalbetrieb nahezu nie in Betracht gezogen wird, könnte sie bei umfangreichen Störungen, wie etwa einer androhenden Großstörung, zur Stabilität und zur schnelleren Wiederherstellung des Normalbetriebs beitragen. In Abb. 14 ist dies beispielhaft für einen exogenen Fehler dargestellt.

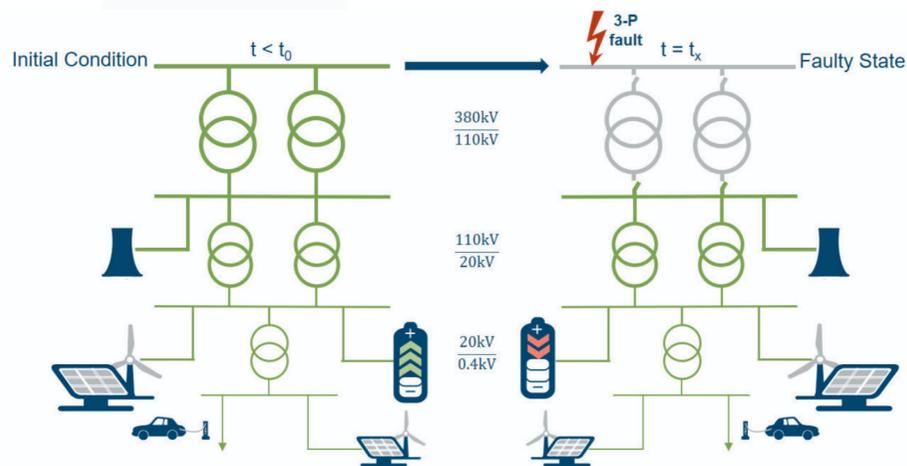


Abb. 14: Inselnetzbildung aufgrund exogener Effekte im Übertragungsnetz

Die zielgerichtete Priorisierung kritischer Infrastrukturen im Inselbetrieb könnte zudem eine gleichmäßige und verlässliche Energieversorgung in Krisensituationen sicherstellen.

Um diese Szenarien zu erkunden, sind detaillierte Analysen und neue Konzepte für das Betriebsmanagement erforderlich. Die Identifikation und Erfüllung der für die Inselbildung notwendigen Kriterien sind bislang unterrepräsentiert in der Netz- und Betriebsplanung. Daher ist es von entscheidender Bedeutung, neue Modelle und Strategien zu entwickeln, die die spezifischen Anforderungen der veränderten Betriebsweise abdecken.

Die Forschung konzentriert sich auf die Entwicklung von Ansätzen zur Förderung der Inselbildungsfähigkeit in deutschen Verteilnetzen im Kontext der Energiewende. Es werden Kriterien identifiziert, die für einen effektiven Inselbetrieb entscheidend sind, sowie Strategien zur Integration und Optimierung umrichterbasierter Einspeisungen in die bestehenden Netzinfrastrukturen. Mit Hilfe von Simulationen und fallstudienbasierten Analysen wird der Fokus auf die Verbesserung der Netzstabilität und die Effizienz der Wiederherstellungsprozesse gelegt. Die Ergebnisse dieser Forschungsarbeiten bieten wertvolle Einblicke und Handlungsempfehlungen, um die Resilienz und Flexibilität der Verteilnetze in einer zunehmend nachhaltigen Energiezukunft zu gewährleisten.

### 3.1.11 Innovative Spannungsregelung zur Integration erneuerbarer Energien

Ilya Burlakin, M. Sc.

Der wachsende Anteil erneuerbarer Energien stellt neue Herausforderungen an die Netzstabilität. Während konventionelle Kraftwerke bislang zur Spannungs- und Frequenzregelung beitragen, werden zunehmend umrichterbasierte Anlagen in das Netz integriert. Insbesondere bei hoher Einspeisung durch Wind- und PV-Anlagen können Spannungsschwankungen auftreten, die durch volatile Erzeugung und Laständerungen verstärkt werden. Dies erfordert neue Methoden zur Spannungsregelung, um eine sichere sowie zuverlässige Energieversorgung sicherzustellen.

Laststufenschalter gehören zu den grundlegenden Komponenten der Spannungsregelung. Das Konzept der Änderung des Übersetzungsverhältnisses ohne Unterbrechung des Laststroms wurde vor mehr als 80 Jahren eingeführt und ist nach wie vor einer der fundamentalen Ansätze, um die Spannung innerhalb der Betriebsgrenzen zu halten. Dennoch sind herkömmliche mechanische Stufenschalter auf eine stationäre Spannungsregelung beschränkt. Darüber hinaus werden in schwachen Netzen mit volatilen Energiequellen viele Schaltvorgänge erwartet.

Folglich werden zusätzliche schnell agierende Komponenten für die dynamische Blindleistungs- und Spannungsstützung eingesetzt. Typische Anwendungen sind hierbei Flexible AC Transmission Systems (FACTS). Jedoch erfordert die Anbindung von Leistungselektronik an das Übertragungsnetz einen Neubau, zusätzliche Transformatoren und einen erheblichen finanziellen Aufwand.

Ein vielversprechender Ansatz ist die Erweiterung klassischer Laststufensteller um ein Fast-Switching Module (FSM). Diese Technologie ermöglicht eine dynamische Spannungsregelung, indem Stufenpositionen innerhalb von Millisekunden elektrisch angepasst werden. Das FSM erhöht die Flexibilität sowie die Genauigkeit herkömmlicher Laststufensteller, da in einem definierten Bereich beliebige Stufen direkt erreicht werden können. Das Fast-Switching Module kann sowohl in Laststufenschaltern von Transformatoren als auch in variablen Drosselspulen eingesetzt werden.

Am Lehrstuhl werden Methoden zur Spannungsregelung unter realistischen Netzbedingungen untersucht. Hierzu wurden umfangreiche Netz- sowie FSM-Regelungsmodelle entwickelt. Umfassende Zeitbereichssimulationen zeigen, dass die schnelle und flexible Anpassung von Stufenpositionen einen wichtigen Beitrag zur dynamischen Blindleistungs- und Spannungsstützung leistet. Durch die Kombination bewährter Laststufenschalter und dem Fast-Switching Module, können Netzbetreiber flexibel auf die zukünftigen Herausforderungen reagieren.

Die Forschung in diesem Bereich trägt dazu bei, eine sichere, stabile und effiziente Energieversorgung in einem zunehmend dezentralen Energiesystem zu gewährleisten.

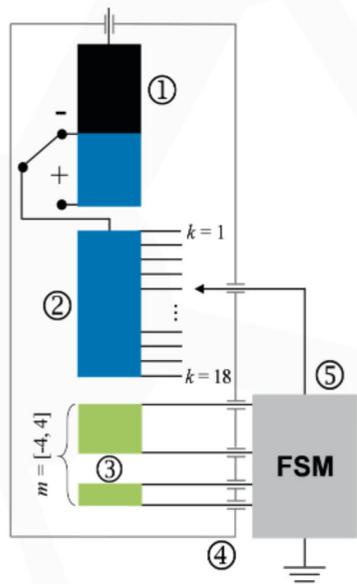


Abb. 15: Variable Drosselspule mit Laststufenschalter und FSM,  
Quelle: Maschinenfabrik Reinhausen GmbH

## 3.2 Hochleistungstechnik

### 3.2.1 Überblick

Das Fachgebiet Hochleistungstechnik beschäftigt sich mit der Forschung, Entwicklung und Prüfung von Betriebsmitteln hoher Leistungen in der elektrischen Energieversorgung. Für eine hohe Leistungsübertragung werden Betriebsmittel sowohl für hohe Spannungen als auch hohe Ströme optimiert. Da die physikalischen Grundlagen bei hohen Spannungen und hohen Ströme etwas unterschiedlich sind, können beide Größen während der Entwicklung und Prüfung von Betriebsmitteln eine längere Zeit lang getrennt voneinander betrachtet und geprüft werden, ohne jedoch die gegenseitigen Abhängigkeiten komplett aus den Augen zu verlieren. Wenn ein Prüffeld keinen direkten Anschluss an ein Kraftwerk oder Hochspannungsnetz besitzt, reicht es in vielen Fällen aus, hohe Spannungen mit kleinen Strömen zu prüfen (Hochspannungstechnik) und umgekehrt hohe Ströme bei niedrigen Spannungen (Hochstromtechnik). Dies bietet sogar den Vorteil, dass in den ersten Entwicklungsschritten der Schaden begrenzt bleibt, wenn es zu unvorhergesehen Fehlern kommt oder Prüfungen mehrmals nacheinander absichtlich über die Belastungsgrenze hinaus durchgeführt werden.

Auf dem Gebiet der Hochleistungstechnik liegt der Schwerpunkt des Lehrstuhls in der Grundlagenforschung von Materialien und in der Entwicklung von Prototypen. Dabei werden auch neue Prüf- und Messverfahren entwickelt. Weiterhin werden Versuche an bereits ausgereiften Betriebsmitteln und Systemkomponenten der elektrischen Energietechnik durchgeführt. Diese müssen umfangreichen Prüfungen unterzogen werden, wobei sowohl deren Betriebsverhalten untersucht als auch der physikalische Grenzbereich ermittelt wird. Die Möglichkeit sowohl Hochstrom- als auch Hochspannungsprüfungen durchführen zu können, ist ein Alleinstellungsmerkmal unserer Forschungseinrichtung.

### Hochspannungstechnik

Die Hochspannungstechnik befasst sich mit den spannungsabhängigen Effekten, d.h. primär mit Isolationstechnik und der elektrischen Festigkeit von Betriebsmitteln. Im Einzelnen sind im ersten Schritt die vorgesehenen Isolierstoffe aus werkstoffwissenschaftlicher Sicht zu betrachten. Dabei sind spannungsabhängige elektrische Effekte auf atomarer, molekularer und evtl. Cluster-Ebene relevant. Zusätzlich ist noch die Temperaturabhängigkeit zu berücksichtigen. Im zweiten Schritt werden Probekörper konstruiert und im Hochspannungslabor geprüft. Im Erfolgsfall wird im dritten Schritt ein konkretes Betriebsmittel wie ein Kabel, eine Transformatorwicklung oder bereits ein ganzer Transformator konstruiert und innerhalb eines vielseitigen Prüfprogramms geprüft. Im zweiten und dritten Schritt sind die geometrischen Dimensionen (Länge, Breite, Höhe, Radien) der Prüfobjekte und Betriebsmittel maßgebend.

Alle drei Schritte werden mehrfach und iterativ angewendet. Im Konstruktionsprozess kommen auch Feldsimulationsprogramme zum Einsatz, mit denen mehrere Varianten durchgespielt werden können, unter anderem Schwachstellen schneller sichtbar werden und das physikalische Verständnis für die Anordnungen gefördert wird. Im Hochspannungslabor werden Wechselspannungen, Gleichspannungen und Stoßspannungen geprüft. Mit den zunehmenden und sich noch entwickelnden Gleichspannungsnetze mit HGÜ (HVDC) und MGÜ (MVDC) gibt es noch Forschungsbedarf bei der Gleichspannungsbelastung der Isolierstoffe und Betriebsmittel. Restladungen, veränderte Temperaturverläufe und Kriechwege sind Beispiele für aktuelle Forschungsthemen in diesem Bereich. Aufgrund der Umrichter-Rechteckspannungen mit ihren steilen Flanken wird eine weitere Prüfspannungsform nötig. An dieser Stelle ist ebenfalls Forschungsbedarf zu verzeichnen.

Die hauptsächliche Motivation der Energiewende ist die Reduktion des klimawirksamen Kohlendioxid ausstoßes. Ressourcenknappheit und die Vermeidung der gefährlichen Kerntechnik sind weitere Treiber. Im öffentlichen Diskurs kaum wahrgenommen gibt es noch weitere Probleme, die zu lösen sind. Das in der Hochspannungstechnik einen Überblick über hnik lange verwendete und aus elektrischer Sicht hervorragende Isoliergas Schwefelhexafluorid ( $\text{SF}_6$ ) ist 25.000-mal klimawirksamer als  $\text{CO}_2$ . Es wird nun Schritt für Schritt durch weniger schädliche Isoliergase und gereinigte Luft (clean air, dry air) ersetzt. Grundwasser-schädliche Mineralöle in Transformatoren werden durch biologisch abbaubare Isolierflüssigkeiten (z.B. synthetische oder natürliche Esterflüssigkeiten oder Pflanzenöle) ersetzt. Dieser Wandel erfordert die Erforschung und Entwicklung der Isolierstoffe sowie auch die Anpassung und Weiterentwicklung der Prüfmethoden. Am Lehrstuhl werden unter anderem biologisch abbaubare Isolierflüssigkeiten untersucht, wobei auch die Prüfprogramme nicht nur nach bekannten Normen erfolgen, sondern auch für die jeweilige Anwendung bzw. den herauszuarbeitenden Effekte angepasst werden. Als diagnostische Methoden wird die Messung des Verlustfaktors  $\tan \delta$ , der Teilentladungen und Durchschlagspannung eingesetzt.

## Hochstromtechnik

In der Hochstromtechnik werden die stromabhängigen Effekte betrachtet. Hohe Betriebsströme und Kurzschlussströme führen zu hohen mechanischen Kräften, starker Erwärmung, magnetischer Sättigung in Eisenteilen, induzierte Spannungen und Wirbelströme. Ähnlich wie in der Hochspannungstechnik wird im Konstruktionsprozess auch hier schrittweise vorgegangen. Auch hier führen neue Anforderungen und Werkstoffe zu einem erneuten Forschungs-, Konstruktions- und Prüfbedarf. Alle in der Hochspannungstechnik konstruierten und geprüften Betriebsmittel müssen auch hochstromtechnisch entwickelt und geprüft werden.

Am Lehrstuhl wurde der Einfluss magnetischer Remanenzeffekte bei Stromwandlerkernen auf die Stabilität von Schutzalgorithmen untersucht. Weiterhin wurde eine dynamische Kurzschlussstrombegrenzung auf Umrichterbasis entwickelt, die bereits im Anstieg der ersten Netzperiode wirkt. Verbundisolatoren mit ihrem veränderten mechanisch-dynamischen Verhalten im Kurzschlussfall sollen noch gemessen und simuliert werden. Die Ergebnisse sollen dann in die entsprechende Norm für Kurzschlussfestigkeit einfließen.

## 3.2.2 Prüfung alternativer Isolierflüssigkeiten

*Dr.-Ing. Dieter Braisch*

Die zunehmende Nachfrage nach umweltfreundlichen und sicheren Isolierflüssigkeiten für Leistungstransformatoren hat zur weitverbreiteten Nutzung von synthetischen oder natürlichen Ester als Isoliermedium geführt. Solche Isolierflüssigkeiten weisen andere elektrische Eigenschaften auf als herkömmliche Gas-to-Liquid Isolierflüssigkeiten oder Mineralöle, was beim Isolationsdesign zu berücksichtigen ist. Besonders die elektrische Belastung mit Schalt- oder Blitzstoßspannung ist dabei von Bedeutung, da hier ein deutlicher Unterschied zwischen der elektrischen Festigkeit zwischen Estern und herkömmlichen Isolierflüssigkeiten besteht.

Der Fokus der Untersuchung lag daher auf der Durchführung von Versuchen mit positiver Blitzstoßspannung, bei der nicht nur der elektrische Durchschlag erfasst werden sollte, sondern auch die Teilentladungseinsetzspannung. Die Prüfobjekte befanden sich in einem Transformatorkessel (Abb. 16) und bestanden aus einem gebogenen Wicklungsstab gegenüber einer geerdeten Metallplatte (Abb. 17 links). Als Isolierflüssigkeiten wurde abwechselnd eine synthetische Esterflüssigkeit und Gas-To-Liquid-Transformatoröl verwendet. Untersucht wurde die elektrische Festigkeit des Ölspalts als auch der Kriechwege (Abb. 17 rechts).

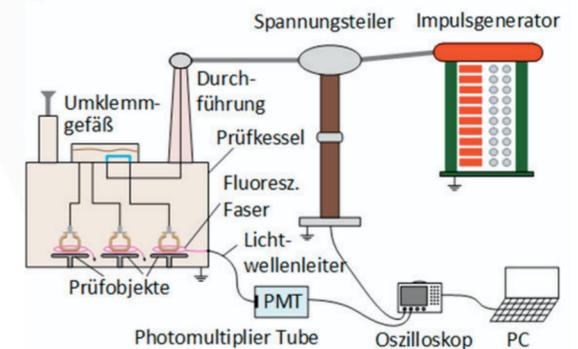


Abb. 16: Transformatorkessel an Stoßspannung

Bei Stoßspannungen sind die Teilentladungen nicht, wie bei Wechsel- oder Gleichspannung üblich, über einen Koppelkondensator erfassbar. Die Messeinrichtung müsste in den Erdfeld des Prüfobjekts angeschlossen werden und wäre beim ersten Durchschlag zerstört. Daher wurde eine optische Teilentladungserfassung mittels fluoreszierender Faser und einem Photomultiplier angewendet. Ein typisches Signal ist in Abb. 18 gezeigt. Solche Signale richtig zu interpretieren und auch bei weiteren Anwendungen einzusetzen, ist ein weiteres Forschungsgebiet des Lehrstuhls.

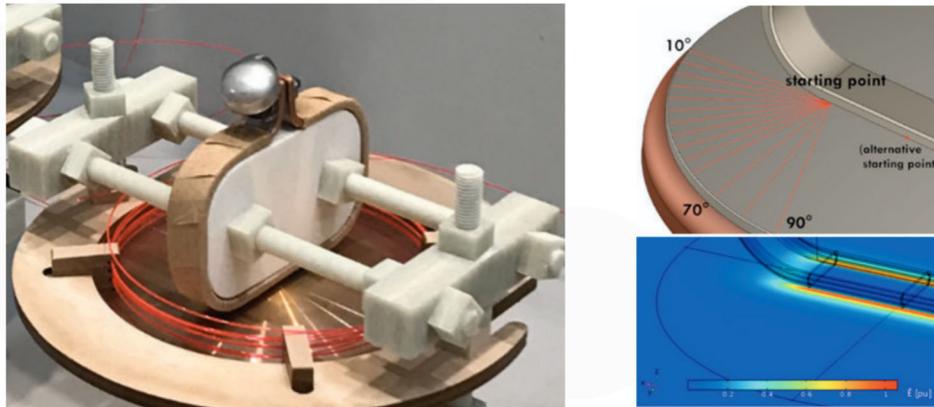


Abb. 17: Prüfobjekt mit fluoreszierender Faser (links), Simulation möglicher Kriechwege (rechts)

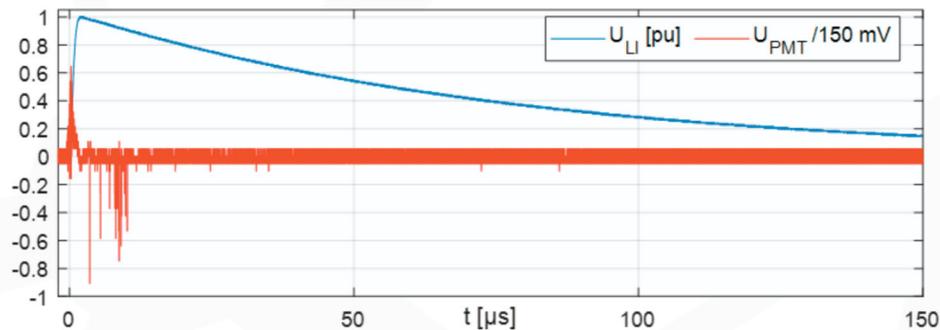


Abb. 18: Optisch erfasste Teilentladungen bei Blitzstoßspannung

### 3.2.3 Teilentladungserfassung an Kriechwegen in Öl bei Gleichspannung

Stephan Müller, M. Sc.

Während die Messung der Teilentladungen (TE) bei Wechselspannung (AC) gründlich erforscht ist und entsprechende Auswertekriterien in der Praxis etabliert sind, ist die Erforschung der TE-Diagnostik bei Gleichspannung (DC) noch nicht angeschlossen. Die zentralen Herausforderungen hierbei liegen im fehlenden Phasenbezug sowie in der geringen Häufigkeit der TE-Ereignisse bei DC. Dies erfordert nicht nur die Entwicklung neuer Interpretationsmethoden, sondern auch die Schaffung von störungsfreien Prüfaufbauten, Hochspannungsgeneratoren und geeigneten digitalen sowie analogen Filtern. Ein Beispiel sind die Spannungsquellen (Abb. 19 links) von Röntgengeräten, die üblicherweise mit einer hochfrequenten Niederspannung im zweistelligen Kilohertz-Bereich betrieben werden und eine Gleichspannung bis etwa 150 kV erzeugen.

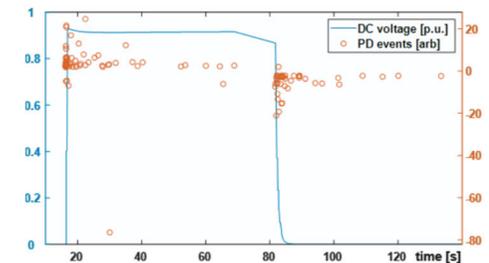


Abb. 19: Prüfaufbau mit Hochspannungsgenerator (links), Teilentladungsereignisse bei Hochspannung (rechts)

Bei der Interpretation der TE-Ereignisse muss großer Aufwand betrieben werden, um hochfrequente Störimpulse von echten TE-Impulsen zu unterscheiden. Solche Störimpulse entstehen unter anderem auch durch die Gleichrichtung mit Dioden und deren Kommutierungsvorgänge. TE bei DC entstehen häufig auch bei Spannungsänderungen wie in Abb. 19 rechts gezeigt. Dies ist auf kapazitive Ausgleichvorgänge und die Anwesenheit von möglichen Restladungen zurückzuführen. Ansonsten entwickeln sich TE-Effekte bei DC viel langsamer und unregelmäßiger als bei AC.

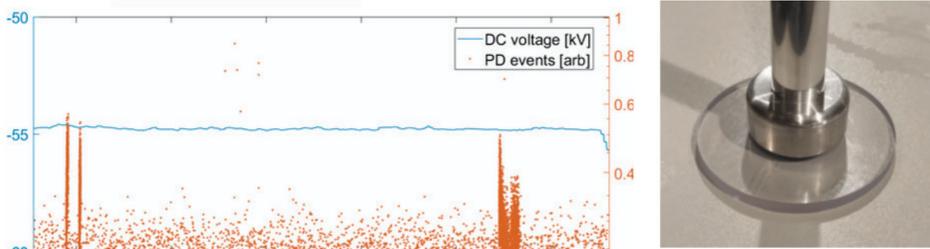


Abb. 20: Teilentladungserfassung bei Gleichspannung (links), Beispiel einer Kriechweganordnung (rechts)

Grenzflächen zwischen verschiedenen Isoliermedien stellen eine besondere Schwachstelle elektrischer Isolierungen dar. Wird eine Grenzfläche zwischen zwei Medien hauptsächlich in tangentialer Richtung belastet, spricht man auch von sogenannten Kriechwegen. Eine in der Hochspannungstechnik häufig anzutreffender Kriechweg besteht aus der Kombination eines Feststoffs mit einer Isolierflüssigkeit. Die elektrische Feldverteilung und Festigkeit solcher Anordnungen wird durch mehrere Parameter beeinflusst, die mit einigen Nichtlinearitäten behaftet sind. Unter Gleichspannungsbelastung kommt zusätzlich die Nichtlinearität der Leitfähigkeit der Isoliermedien ins Spiel, wobei diese von der Feldstärke und der Belastungsdauer abhängen.

In Kooperation mit Industriepartnern erforscht der Lehrstuhl das Verhalten verschiedener Kombinationen aus Isoliermedien unter Gleichspannungsbelastung, wobei mittels Teilentladungserfassung ein besonderes Augenmerk auf die zerstörungsfreie Prüfung gerichtet wird.

### 3.3 Schutztechnik

#### 3.3.1 Überblick

Die Schutz- und Leittechnik ist für einen zuverlässigen und sicheren Betrieb elektrischer Netze unverzichtbar. Zukünftige dekarbonisierte und umrichterdominierte Netzstrukturen erhöhen die Bandbreite möglicher Betriebs- und Fehlerszenarien und verändern so die Anforderungen an die Schutz- und Leittechnik grundlegend. Klassische Verfahren sind den neuen Herausforderungen oft nicht mehr gewachsen. Daher sind neue Methoden und Lösungsansätze in diesem Fachgebiet notwendig.

Abb. 21 stellt dazu die Entwicklung von klassischer deterministischer Schutztechnik über den Adaptivschutz bis hin zum KI-Schutz dar.

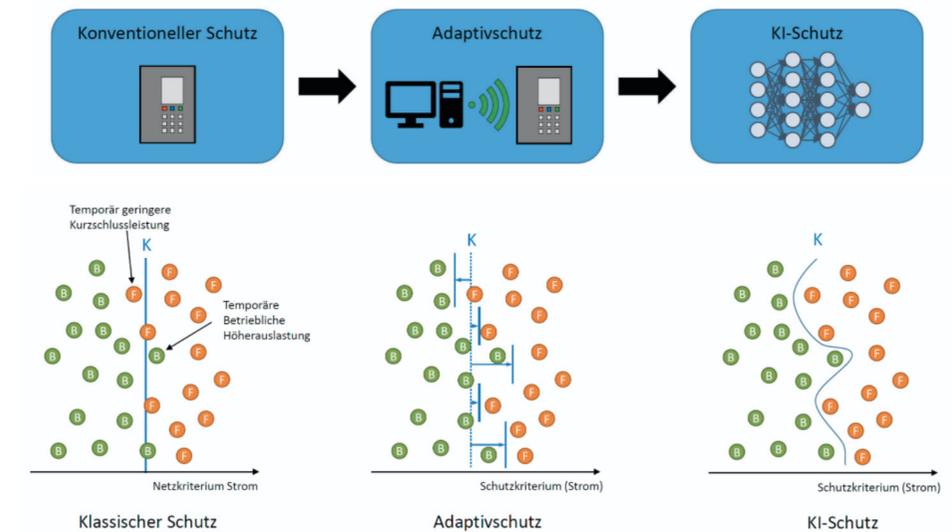


Abb. 21: Entwicklung von klassischer Schutztechnik über Adaptivschutz bis hin zur KI-Schutztechnik – B Betriebszustand, F Fehlerzustand, K Schutzkriterium

#### KI-Schutz

Wesentliche Aufgaben des Netzschutzes sind die Fähigkeiten der Mustererkennung und deren Klassifizierung. Verfahren des maschinellen Lernens mit neuronalen Netzen (Deep Learning) stellen sogenannte „Universal Function Approximators“ dar und besitzen per se genau diese Fähigkeiten auf einem hohen Komplexitätsniveau. Der Einsatz von KI-Verfahren in der Schutztechnik liegt daher nahe und macht Schutztechnik zu einer „Cutting Edge Technology“. Zudem besitzen diese Verfahren folgende für die Schutztechnik wichtigen Eigenschaften:

### *Nichtlineare Klassifikation:*

Es können sogenannte nichtlineare Klassifizierer realisiert werden, die in der Lage sind, ineinander „verschwommene“ Betriebs- und Fehlerszenarien richtig zu klassifizieren.

Dies ist in der rechten Abbildung in Abb. 21 schematisch in Form einer mehr-fachgekrümmten Linie als Schutzkriterium K dargestellt. Mit neuronalen Netzen sind, abhängig von der Anzahl der Merkmale, sogenannte höherdimensionale gekrümmte Hyperebenen als Schutzkriterien zur Zustandsklassifikation realisierbar.

### *Kompetenzlernen:*

Es werden Netzschutzaufgaben als universelle Kompetenz, beispielsweise die selektive Fehlerklärung, gelernt. Die Determinierung auf einzelne bestimmte Netzsituationen ist nicht mehr notwendig. Insbesondere Graph Neural Networks (GNN) besitzen hierfür geeignete Kompetenzerneigenschaften. Die Unterscheidung der Schutzprinzipien wie UMZ, Distanz- oder Differentialschutz spielt hier keine Rolle mehr. Es wird rein die Kompetenz des richtigen Schutzverhaltens gelernt.

### *Generalisierungsfähigkeit:*

Auch unbekannte, nicht exakt im Training berücksichtigte Netzsituationen in Form von Merkmalsvektoren, können richtig erkannt und klassifiziert werden. Hierin wird der Unterschied zwischen deterministischen Algorithmen und KI-Verfahren besonders deutlich.

Die für das Supervised Learning benötigten gelabelten Trainingsdaten im EMT-Bereich können vorzugsweise mit Digital Twins der Netze und Parallelverarbeitung in ausreichendem Umfang und begrenztem Zeitrahmen erzeugt werden. Digital Twins bieten ein genaues Abbild der physikalischen Zusammenhänge und stehen bereits immer häufiger seitens der Netzbetreiber zur Verfügung. Das Schutzengineering umfasst die Erzeugung gelabelter Trainingsdaten und den Trainingsprozess des neuronalen Netzes. Das Ergebnis des Schutzengineerings sind nicht mehr, wie gewohnt, Schutzparameter, sondern Kantengewichtsfaktoren für das neuronale Netz im KI-Schutzgerät. So gesehen entsteht hier in der Schutztechnik ein völlig neuer Workflow des Engineerings.

Physic Informed Neuronal Networks (PINN) betten geschickt physikbasierte Modellgleichungen in die neuronale Netzstruktur ein. Dieser Schritt ermöglicht eine Nachvollziehbarkeit der Schutzentscheidung und verhindert sicher Ausreißer bei der Auslöseentscheidung.

Umfangreiche Labor- und Feldtests in realen Netzen unterstützen diese Arbeiten und belegen eine hohe Funktionalität und Flexibilität von KI-Schutz.

### *KI-Schutzkoordination*

Für die Koordination von mehreren KI-Schutzgeräten, auch Agenten genannt, kommt das Verfahren des Reinforcement Learning zum Einsatz. Hierbei erwirbt jeder Agent durch ein Belohnungs- und Bestrafungsverfahren die Kompetenz sich im Zusammenspiel mit mehreren anderen Agenten bei allen möglichen Fehlerszenarien immer richtig, d.h. zuverlässig und sicher, zu verhalten.

Die Arbeiten zum KI-Schutz werden in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Mustererkennung (Pattern Recognition Lab) der FAU durchgeführt.

## **Stromrichter und Schutz**

In stromrichterdominierten Netzen ist die Wechselwirkung zwischen Stromrichter und Netzschutz ein wichtiger Untersuchungsgegenstand. Moderne Stromrichter können Spannungs- und Stromquellen im gesamten Modalraum der symmetrischen Komponenten bis hin zur virtuellen komplexen Impedanz in allen vier Quadranten darstellen und alle Arten von Reserveleistung von der Momentan- bis zur Tertiärleistung zur Verfügung stellen. Auf diese Vielfalt ist die konventionelle Schutztechnik nicht vorbereitet.

Es gibt dazu zwei Lösungsebenen, einerseits die Analyse und Anpassung der klassischen Frequenz-Zeiger basierten Schutzverfahren oder andererseits die Einführung eines neuen Zentralschutzansatzes im EMT-Zeitbereich (Modellbasierter Schutz, Setting-Less Protection).

Die Anpassung der klassischen Frequenz-Zeiger basierten Schutzverfahren zielt auf die bestehende Schutztechnik ab. Dabei sind die Wechselwirkungen bei den Schutzverfahren besonders stark, die auf Modalkomponenten basieren, wie beispielsweise die Reaktanzmethode zur genaueren Fehlerortung bei Gegeneinspeisung und langen Leitungen. Dies hat seinen Ursprung in dem Fault-Ride-Through-Verhalten von Stromrichtern, welches nicht mehr rein auf physikalischen Vorgängen, wie bei Drehfeldmaschinen, sondern maßgebend auf Regelungskonzepten und Signalverarbeitung basiert. Daher müssen die Herausforderungen mit einer Symbiose aus den Expertisen „Schutztechnik“ und „Stromrichterregelung“ angegangen werden.

Geht man von vollständig stromrichtergespeisten Netzen aus (Converter Only Grids) verliert zudem die Frequenz ihr elektromechanisches „Fundament“ und Frequenz-Zeiger basierte Schutzverfahren, wie zum Beispiel Fourierfilter, sind nicht mehr anwendbar.

Hier kommt der zweite Lösungsansatz ins Spiel, der aus der Systemtheorie abgeleitet ist und einen neuen Zentralschutzansatz (Modellbasierter Schutz, Setting-Less Protection) einführt. Es handelt sich hierbei um einen sogenannten Hyperdifferentialschutz auf Basis von Sampled Values aus gemessenen Spannungs- oder Stromgrößen. Der Schutzansatz basiert sowohl auf den Kirchhoffsche Maschen- als auch Knotengleichungen im EMT-Zeitbereich.

Er wird so völlig unabhängig vom Stromrichterverhalten und bleibt quasi von jeder Art der Wechselwirkung seitens des Stromrichters unbeeinflusst. Darüber hinaus ebnet die Einführung digitaler Schaltanlagen mit Prozessbus kommunikationstechnisch den Weg zum Zentralschutz.

Die Probleme des Signalrauschens, das Auftreten von Abtastfehlern oder der Ausfall von Messeingangsgrößen werden durch den Einsatz von Kalman-Filtern als Netzzustandsschätzer (Fehlererkennung) sowie als Netzparameterschätzer (Fehlerortung) deutlich verbessert. Labortests des neuen Verfahrens in unserem RTDS-Echtzeitsimulationslabor zeigen vielversprechende Vorteile dieses Ansatzes im Schutzverhalten.

### Adaptivschutz

Der Adaptivschutz kann vollständig automatisiert und aus der Ferne mittels einer Kommunikationsverbindung zu einer Zentraleinheit, beispielsweise der Netzleitstelle, Schutzeinstellungen netzweit in den Feldgeräten ändern. Der Adaptivschutz stellt so einen Tabubruch dar, da die Schutzparametrierung bisher nur dem IBS-Personal vor Ort in einem vordefinierten Arbeitsprozess vorbehalten war. Schutzparameter können so an sich ändernde Netzsituationen jeder Zeit angepasst werden und Schutzzuverlässigkeit und -sicherheit immer bestmöglich gewährleisten. Die Änderung der Netzsituation kann struktur- oder betriebsbedingt sein.

Die Schutzparameterberechnung kann, wenn sich die Bandbreite möglicher Netzsituationen eingrenzen lässt, entweder vordefiniert sein oder jeweils situationsabhängig und regelbasiert online mit einem PSA-System (Protection Security Assessment) durchgeführt werden.

Die Schutzprüfung ist bisher ein zwingender Prozess für das IBS-Personal bei der Schutzparametrierung im Feld. Sie wird beim Adaptivschutz in einem Zwei-Ebenen-Verfahren automatisiert durchgeführt. Das PSA-System führt zunächst einen generischen Gesamtsystemtest von Netz und Schutz im Frequenz-Zeiger-Bereich durch, sowie eine anschließende Fingerprintanalyse zur Bewertung des Schutzverhaltens. Ist das Schutzverhalten unzureichend, wird in einer ProtectionToolchain (ProToc) die Schutzparametrierung mit Schwarmintelligenz bis zu einer ausreichenden Performance weiter optimiert.

In einem zweiten Schritt können die Schutzeinstellungen mit Hilfe von Digital Twins der Schutzfeldgeräte, eingebettet in eine EMT-Netzsimulation, mit einem Parametertest und einem sogenannten Systemtest gerätespezifisch geprüft werden. Erst nach dem erfolgreichen Durchlauf beider Testebenen wird die neue Parametrierung zum Überspielen an die Schutzgeräte im Feld freigegeben. Für einen sicheren Kommunikationsprozess in die Feldgeräte sind mehrere Fall-Back-Ebenen und vielfältige Redundanz vorgesehen, so dass höchste Zuverlässigkeits- und Sicherheitsanforderungen erfüllt werden.

Die Anforderung auf alle Netzsituationen vorbereitet zu sein und der Umstand der zunehmenden Unschärfe der Klassifizierung zwischen Betriebs- und Fehlerzustand sowie die damit verbundene hohe Anzahl notwendiger Anpassungen der Schutzparameter zeigen auch die Schwächen des Adaptivschutzkonzepts auf. Die klassische deterministische Schutzalgorithmik ist unter diesen Anforderungen trotz dynamischer Anpassbarkeit ihrer Parametrierung oft an ihrer Leistungsgrenze angelangt und muss methodisch weiterentwickelt werden.

### 3.3.2 Verifizierung der Entscheidungen neuronaler Netze in der Schutztechnik

*Christoph Mederer, M. Sc.*

Die Implementierung von neuronalen Netzen in der Schutztechnik bietet das Potenzial, die wachsende Komplexität elektrischer Netze besser als herkömmliche Schutzalgorithmen abzubilden. Ähnlich zum Distanzschutz soll ein neuronales Netz anhand der Impedanz entscheiden können, ob ein Fehler im elektrischen Netz vorliegt oder nicht. Zudem sollen die Fehler zuvor definierten Schutzzonen (hier: Zone 1 und 2) zugeordnet werden. Ein vielversprechender Ansatz ist das „Überwachte Lernen“. Dabei soll mithilfe eines gelabelten Datensatzes eine Ausgangsgröße, in unserem Fall die Zustände „Kein Fehler“, „Fehler in Zone 1“ und „Fehler in Zone 2“, prognostiziert werden. Da sich bei der Implementierung des neuronalen Netzes am Distanzschutz orientiert wird, werden die am Relais bestimmte Resistanz sowie die Reaktanz als Eingangsgrößen gewählt, mit denen die jeweiligen Klassen prognostiziert werden. In Abb. 22 ist das zugrundeliegende Netz dargestellt. Betrachtet wird ausschließlich das Relais C1, das dreipolige Fehler auf der Einzelleitung B-C (entspricht Zone 1) sowie Fehler auf den Parallelleitungen A-B-1 beziehungsweise A-B-2 erkennen soll. Fehler in Rückwärtsrichtung werden von diesem Relais nicht erfasst. Durch das externe Netz A ist es möglich, eine Gegeneinspeisung zu simulieren. Um die Variabilität des Datensatzes zu erhöhen, werden die Fehler hinsichtlich ihrer Fehlerposition sowie ihres Fehlerwiderstands variiert. Außerdem wird die Gegeneinspeisung am externen Netz variiert.

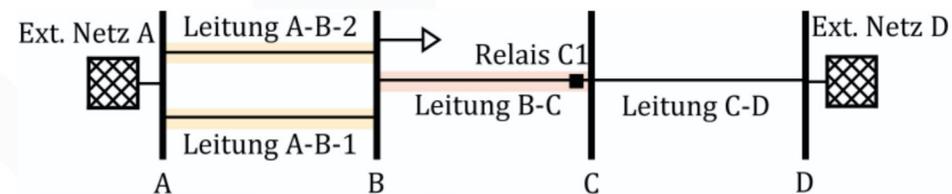


Abb. 22: Untersuchtes elektrisches Netzmodell mit verwendetem Schutzrelais und den hervorgehobenen Schutzzonen in Rot (Zone 1) und Gelb (Zone 2), nach [Mederer et al., Verification of neural network based power system protection schemes, DPSP 2025]

Eine der großen Herausforderungen bei der Anwendung von neuronalen Netzen im realen Betrieb besteht darin, sicherzustellen, dass diese unter definierten Betriebs- beziehungsweise Fehlerzuständen zuverlässig auslösen. Grundsätzlich lässt sich die Entscheidung eines neuronalen Netzes ermitteln, indem Eingangsdaten, zum Beispiel  $\underline{Z}=(3+j1) \Omega$  eingegeben und die resultierende Antwort, in diesem Fall beispielhaft „Fehler in Zone 1“, ausgewertet wird. Dieses Verfahren überprüft jedoch lediglich stichprobenartig, wie das neuronale Netz entscheidet.

Es ermöglicht keine Aussagen darüber, wie das neuronale Netz reagiert, wenn die Eingangsdaten geringfügig um einen Wert  $\varepsilon$  geändert werden. So kann keine Aussage darüber getroffen werden, wie das neuronale Netz zum Beispiel bei den Eingangsparametern  $\underline{Z}=(3,01+j1) \Omega$  entscheiden würde.

In der Literatur gibt es Beispiele, in denen Eingangsdaten manipuliert werden, um ein neuronales Netz gezielt zu einer falschen Entscheidung zu verleiten. Dabei kann bereits eine kleine Änderung dieser genügen. Diese Fälle werden als Adversarial Examples bezeichnet. Für die Schutztechnik stellt dies eine Herausforderung dar, da dort sichergestellt werden muss, dass das neuronale Netz sicher auslöst, wenn ein Fehler vorliegt.

Um dies sicherzustellen wird ein Verfahren angewendet, bei dem ein Bereich mit dem Abstand  $\varepsilon$  um die Eingangsparameter definiert wird. Durch den genannten Eingangsparameter  $\underline{Z}=(3+j1) \Omega$  und einem Wert von  $\varepsilon=1 \Omega$  kann so ein quadratischer Bereich mit den Eckpunkten  $\underline{Z}_1=(2+j0) \Omega$ ,  $\underline{Z}_2=(2+j2) \Omega$ ,  $\underline{Z}_3=(4+j2) \Omega$  und  $\underline{Z}_4=(4+j0) \Omega$  definiert werden.

In diesem Bereich wird mithilfe gemischt-ganzzahliger linearer Optimierung verifiziert, ob sich das neuronale Netz dort für exakt eine Klasse entscheidet. Ist dies der Fall, so kann kein Adversarial Example in diesem Bereich vorliegen und für alle möglichen Kombinationen an Eingangsparametern innerhalb dieses definierten Quadrats ist die Entscheidung des neuronalen Netzes eindeutig bestimmt.

Durch ein systematisches Vorgehen und ein gezieltes Aneinandersetzen von geschickt gewählten Bereichen kann der gesamte mögliche Bereich der Eingangsdaten untersucht werden. Dabei werden zunächst möglichst große Bereiche für die Verifizierung definiert, die dann zu den Klassengrenzen hin in immer kleinere Bereiche aufgeteilt werden.

In Abb. 23 sind die einzelnen verifizierten Bereiche dargestellt. Zudem ist ein Teil der Trainingsdaten des neuronalen Netzes abgebildet. Die Eingangsparameter können Werte zwischen -400 und 400  $\Omega$  annehmen. Zu den Klassengrenzen hin werden die Quadrate immer kleiner definiert. Da das Neuronale Netz auf dem Prinzip des Distanzschutzes basiert und die verifizierten Bereiche Quadrate in Resistanz- und Reaktanzrichtung bilden, lässt sich das resultierende Diagramm wie ein Impedanzdiagramm lesen.

Das neuronale Netz wird sich immer für die dazugehörige Klasse entscheiden, wenn der Impedanzpunkt in einem dargestellten, verifizierten Quadrat liegt. Beim weißen Bereich in b) handelt es sich um noch nicht eindeutig verifizierte Bereiche. Das bedeutet, dass in diesem Bereich mehrere Klassenentscheidungen vorliegen. Durch das Wählen eines kleineren Wertes für  $\varepsilon$  kann dieser Bereich ebenfalls nochmals genauer untersucht werden. Dabei steigt, allerdings auch die Anzahl der notwendigen zu lösenden Optimierungsfälle, so dass der Rechenaufwand bei einer höheren Auflösung deutlich zunimmt.

Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass durch die vorgestellte Methode die Entscheidungen des neuronalen Netzes korrekt erfasst und dargestellt werden. Dadurch kann garantiert werden, dass das neuronale Netz bei gegebenen Eingangsparametern sicher auslösen wird. Mithilfe dieser Methode ist es außerdem möglich, die nicht direkt nachvollziehbaren Entscheidungen des neuronalen Netzes in bekannte, in der Schutztechnik etablierte Darstellungen wie das Impedanzdiagramm zu überführen.

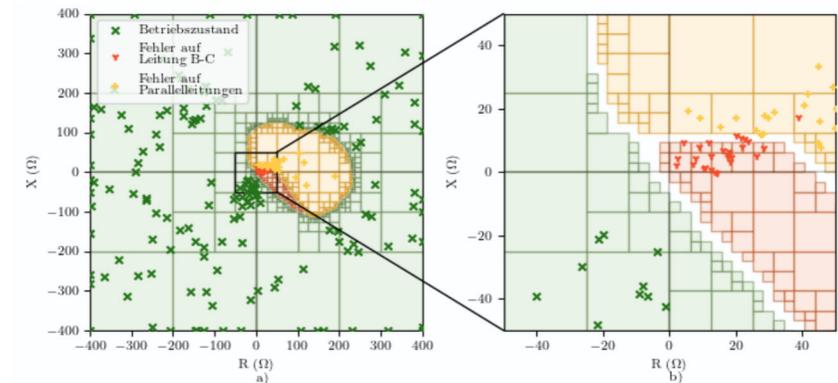


Abb. 23: Visualisierungen von diskreten Stichproben aus dem Testdatensatz sowie verifizierten Bereichen mit nur einer vorhandenen Klasse (a) Gesamtansicht (b) Detailansicht, nach [Mederer, et al., Verification of neural network based power system protection schemes, DPSP 2025]

### 3.3.3 Koordinierter Netzschutz: Maschinelles Lernen für elektrische Energiesysteme

Georg Kordowich, M. Sc.

Die Integration Erneuerbarer Energien stellt eine Herausforderung für den Schutz moderner elektrischer Netze dar. Zunehmend volatile Einspeisequellen und eine höhere Anzahl wechselnder Netzzustände können die klassische Schutzsysteme an ihre Grenzen bringen. Im Forschungsprojekt „Koordinierter Netzschutz auf Basis maschineller Lernverfahren“ erarbeiten wir innovative Lösungen, um die Versorgungszuverlässigkeit und Netzsicherheit auch in zukünftigen Energiesystemen zu gewährleisten.

Das Ziel dieser von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Initiative ist die Entwicklung von Schutzalgorithmen auf Basis maschinellen Lernens, insbesondere neuronaler Netze.

Die neuen Schutzalgorithmen sollen dabei wie in Abb. 24 dargestellt Fehler in Echtzeit erkennen, lokalisieren und koordiniert beheben können. Dabei werden sowohl zentrale als auch dezentrale Ansätze betrachtet, um maximale Robustheit und Flexibilität zu gewährleisten.

Ein zentraler Aspekt des Projekts ist die Generierung realitätsnaher Trainingsdaten, die den Übergang von Simulationen zur praktischen Anwendung erleichtern. Durch die Integration physikalischen Wissens über das Netz mittels der Methode des „Known Operator Learning“ stellen wir sicher, dass die entwickelten Schutzlösungen nachvollziehbar und robust bleiben. Dies ermöglicht es, die Grenzen herkömmlicher Schutztechniken zu überwinden und universelle Netzschutzlösungen zu schaffen, die sich an veränderte Netzbedingungen anpassen können.

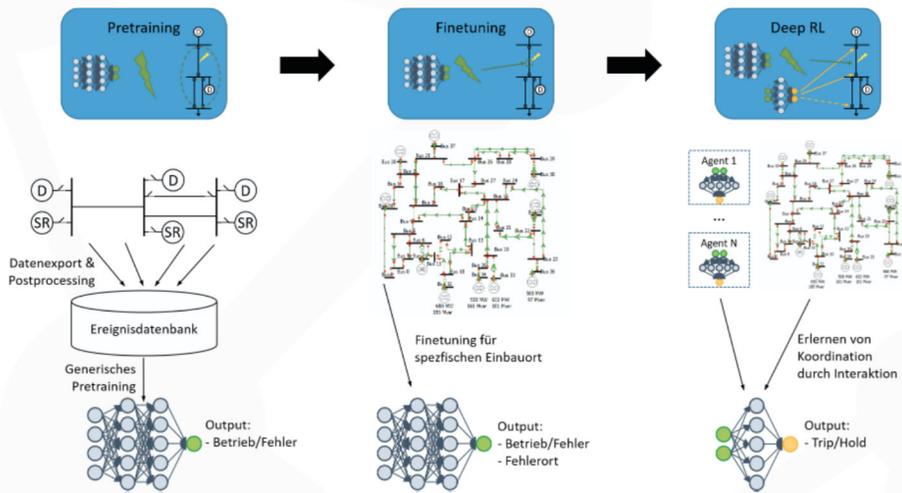


Abb. 24: Entwicklungsschritte der universell koordinierten Netzschutzlösung

Die Ergebnisse werden in unserem modernen Echtzeitlabor getestet, das eine praxisnahe Validierung ermöglicht. Das Projekt soll einen Beitrag zur Transformation der Netze leisten und helfen, die Zukunft der Energieversorgung nachhaltig und zuverlässig zu gestalten.

### 3.3.4 KI-gestützte Erkennung von hochohmigen Erdschlüssen in kompensierten Netzen

Timon Conrad, M. Eng.

Erdschlüsse gehören zu den häufigsten Störungen in Stromnetzen und sind oft auf äußere Einflüsse, z. B. Bäume die auf Freileitungen fallen, zurückzuführen. In kompensierten Netzen führt der Einsatz von Petersenspulen zu geringen Fehlerströmen und selbstlöschenden Lichtbögen, die den Schaden minimieren und einen kurzfristigen Weiterbetrieb ermöglichen. Anhaltende Fehler können jedoch Waldbrände oder erhebliche Netzschäden verursachen. Daher ist es von entscheidender Bedeutung, diese Fehler rechtzeitig zu erkennen, zu lokalisieren und zu beheben. In kompensierten Netzen stellt die Erkennung und Lokalisierung von Erdschlüssen über den kompensierten Fehlerstrom eine Herausforderung für Fehlerwiderstände größer 5 kOhm für die konventionelle Schutztechnik dar. Frühere Forschungsarbeiten haben gezeigt, dass künstliche neuronale Netze (KNNs) Muster in Signalen erkennen können, die durch Fehler verursacht werden und so eine Fehlererkennung ermöglichen.

Um KNNs durch überwachtes Lernen für den Einsatz im Feld zu entwickeln, müssen große und vielfältige Datensätze verwendet werden, die in verschiedenen Stromnetzen über längere Zeiträume gesammelt wurden (siehe Abb. 25). Die Validierung dieses Ansatzes zur robusten Reaktion auf unterschiedliche Netzbedingungen und zur zuverlässigen Erkennung von Erdschlüssen ist aufgrund der Seltenheit von Fehlern in realen Betriebsdaten eine Herausforderung.

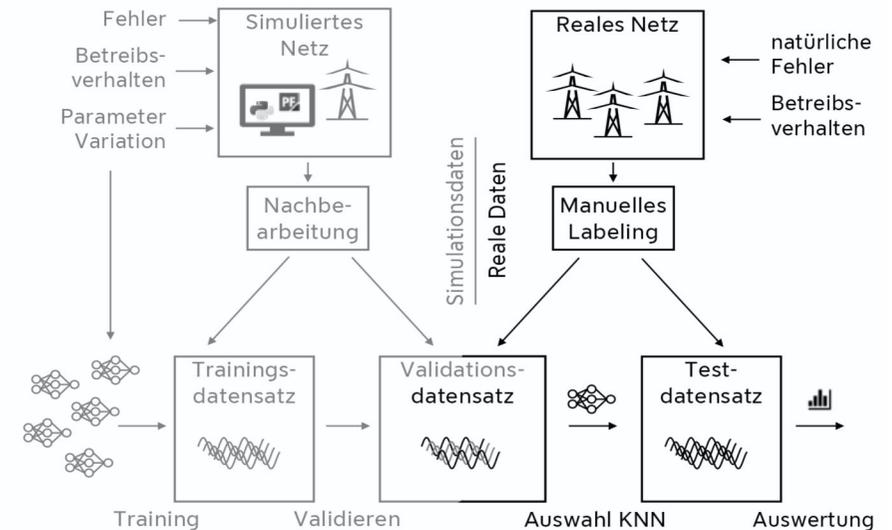


Abb. 25: Schema eines KNN Trainings

Darüber hinaus ist es entscheidend, nicht nur Fehler zu erkennen, sondern auch den betroffenen Abgang zuverlässig zu lokalisieren.

Um dieses Problem zu lösen, wurde ein datengetriebener Ansatz gewählt. In mehreren Umspannwerken in verschiedenen Regionen mit mehreren Einspeisungen wurde ein Datenaggregationssystem eingerichtet, das über zwei Jahre hinweg Terabytes an Spannungs- und Strommessungen mit hohen Abtastraten aufzeichnete und in eine Cloud hochlud. Die auf diese Weise erfassten, natürlich auftretenden Fehler und Betriebsereignisse wurden manuell gelabelt.

Auch künstlich erzeugte Fehler mit definierten Fehlerwiderständen wurden zusammen mit dem Netzbetreiber im realen Netz mit diesem System gemessen.

Darüber hinaus wurde mithilfe einer automatisierten Simulation in PowerFactory ein vielfältiger Trainingsdatensatz für eine ausgewählte Station A erstellt, der verschiedene Erdschlussfehler, andere Fehlertypen und normale Betriebsereignisse umfasst. Die Diskrepanzen zwischen der Simulation und gemessenen Daten wurden durch iterative Anpassungen der Simulation und Vorverarbeitung der simulierten Daten minimiert.

Das trainierte KNN erkannte Erdschlüsse in einem manuell gelabelten Datensatz mit hoher Sensitivität und erkannte in ähnlicher Weise eine große Anzahl von künstlich injizierten gemessenen Erdschlüssen für die Station, für die auch der Trainingsdatensatz simuliert wurde.

### 3.3.5 Einfluss von Stromrichtern auf den Netzschutz

*Jonathan Löbel, M. Sc.*

Die Anzahl Erneuerbarer Energien im elektrischen Netz steigt seit Jahren stark an. Diese sind fast ausschließlich über Stromrichter an das elektrische Netz angeschlossen. Durch ihre große Anzahl haben sie Auswirkungen auf das Verhalten im elektrischen Netz. Dabei spielt die Stromrichterregelung eine entscheidende Rolle. Dies gilt nicht nur für den „normalen“ Betrieb, sondern auch für Fehlerfälle. Liegt ein Fehler (Kurzschluss) im Netz vor, ist es die Aufgabe des Netzschutzes diesen zu erkennen und gegebenenfalls abzuschalten. Für einen sicheren Betrieb des elektrischen Netzes muss sichergestellt sein, dass der Schutz auch in dem neuen, durch Stromrichter bestimmten, Verhalten zuverlässig arbeitet.

Um dies zu garantieren muss die Expertise der Wissensgebiete Stromrichterregelung und Netzschutz zusammengeführt werden. Aus historischen Gründen werden die beiden Themen selten gemeinsam betrachtet. Experten in beiden Gebieten fehlt häufig Expertise aus dem jeweiligen anderen Wissensbereich. Hierfür wird im ersten Schritt der Einfluss aktuell typischer Stromrichterregelungen auf den aktuellen Netzschutz zu betrachten.

Erste Erkenntnisse zu netzfolgenden Stromrichtern und dem Distanzschutz zeigen, dass je nach Regelungsmodus große Messabweichungen im Schutzalgorithmus auftreten können. Der Distanzschutz (Abb. 26) steht dabei als weitverbreitete Schutzfunktion in Mittel-, Hoch- und Höchstspannung unter besonderem Augenmerk.

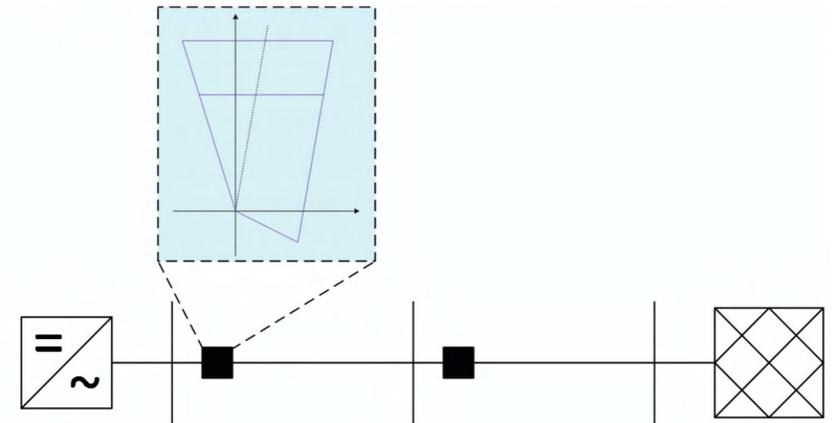


Abb. 26: Distanzschutz einer stromrichter-gespeisten Leitung

Auch erweiterte Distanzschutzfunktionen wie die Pendelsperre oder Reaktanzmethode sind dabei Teil der Untersuchungen. Das Ziel liegt darin die Regelung und/oder Schutzfunktionen so zu adaptieren, dass Sicherheit und Selektivität im elektrischen Netz gestärkt werden.

Im zweiten Schritt sollen auch netzbildende Regelungsmodi untersucht werden. Diese werden aller Voraussicht nach zukünftig eine wichtige Rolle spielen.

Im Gegensatz zu netzfolgenden Regelungen sind diese nicht von externen Spannungsquellen abhängig und können somit helfen den Wegfall von klassischen Synchronmaschinen zu kompensieren. Durch die völlig unterschiedlichen Eigenschaften muss der Einfluss dieser auf eingesetzte Schutzalgorithmen ebenfalls untersucht werden. Auch hier sollen Regelung und Schutz so angepasst werden, dass keine negative Beeinflussung mehr vorliegt. Neben klassischen offline Simulationen bietet das Echtzeit-Labor in Nürnberg eine ideale Möglichkeit die Beeinflussung des Schutzes durch Stromrichter an echten Schutzgeräten zu testen.

Kurzgefasst lautet das Ziel: Eine Symbiose der Expertisen aus Stromrichterregelung und Netzschutz bilden.

### 3.3.6 Modellbasierter Schutz: Netzschutz und Systemtheorie

Gregor Becker, M. Sc.

Die zunehmende Versorgung des elektrischen Energiesystems mit verteilten, umrichterbasierten Anlagen wie Photovoltaikanlagen und Windkraftanlagen, aber auch die Etablierung von Speichersystemen und Elektromobilität stellen konventionelle Schutzsysteme vor eine Vielzahl neuer Herausforderungen. Zum Beispiel existieren im vornehmlich durch Umrichter versorgten System Betriebszustände, bei denen sich der Lastfluss von den niedrigeren Spannungsebenen in die sie überlagernden Netze einstellt. Weiterhin stellt die meist digitale Regelung der Umrichter einen neuen Freiheitsgrad im elektrischen System dar. Diese ermöglicht eine flexible Wahl des Betriebspunktes und des damit verbundenen Verhaltens. Allerdings können Umrichter aufgrund der begrenzten Stromtragfähigkeit der Leistungshalbleiter deutlich weniger Kurzschlussleistung bereitstellen als Synchronmaschinen. Die kleineren Energiespeicher der Umrichter verglichen mit den großen rotierenden Massen der Synchronmaschinen, führen außerdem zu einer Abnahme der Trägheit im System. Diese veränderten Systemeigenschaften erfordern die Weiter- bzw. Neuentwicklung von Schutzkonzepten für das elektrische Energiesystem. Ein Ansatz stellt die im vorliegenden Vorhaben untersuchte zentrale Verarbeitung von Messdaten verschiedener elektrischer Schaltanlagen (den Knotenpunkten des elektrischen Netzes) und der damit verbundene Schutz von Betriebsmittel oder Netzbereichen dar. Hierbei werden wie in Abb. 27 dargestellt, die Messdaten, die durch die zunehmende Etablierung der digitalen Schaltanlage bereits in Digitalsignalen vorliegen, an eine zentrale Instanz übermittelt. Dieser obliegt die Aufgabe zu evaluieren, welche Messdaten einem elektrischen Fehlerereignis entsprechen und somit schutztechnisch zu behandeln sind.

Die Ausgestaltung der resultierenden, mit Daten versorgten zentralen Entscheidungsinstanz stellt den Hauptaspekt der Untersuchungen dar.

Zustandsraummodelle stellen den Schnittpunkt der schutztechnischen Untersuchungen zur Systemtheorie dar und erlauben, nach anfänglicher Definition des zu schützenden Netzausschnitts oder Betriebsmittels des elektrischen Netzes (auch: Schutzobjekt), eine auf Differentialgleichungen erster oder höherer Ordnung basierende prädiktive Zustandsschätzung. Diese modellhafte Abbildung des elektrischen Energiesystems fußt auf der Annahme, dass für eine Vielzahl denkbarer Topologien beziehungsweise Zustände des Schutzobjekts Modelle hinterlegt werden, die zeitgleich als Grundlage zur prädiktiven Zustandsschätzung dienen. Vergleicht man die auf den Modellen basierenden Ergebnisse der Zustandsschätzung mit den tatsächlich gemessenen Zustandsgrößen, so ist eine stochastische Ähnlichkeitsbewertung in Form eines Nullhypotesentests möglich.

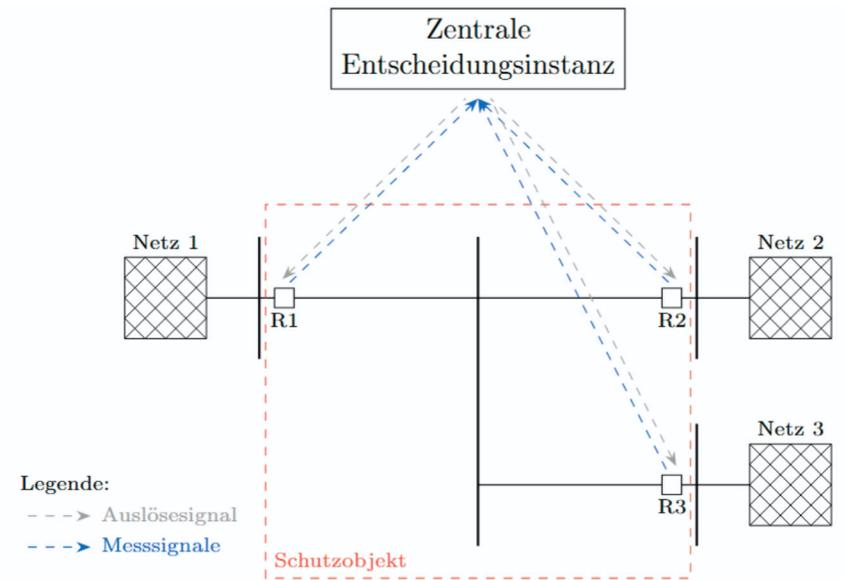


Abb. 27: Prinzipische Skizze der Schutzentscheidungsfindung einer zentralen Schutzentscheidungsinstanz, angelehnt an [Mahr, F.: 'Control and Protection of 100% Inverter-based Power Systems'. PhD thesis, FAU, 2024]

Dieser identifiziert die Netztopologie beziehungsweise das zugehörige Modell, das dem aktuell vorherrschenden Zustand am meisten gleicht beziehungsweise mit der höchsten Wahrscheinlichkeit dem aktuellen Zustand entspricht. Weicht der gemessene Zustand beispielsweise maßgeblich vom Zustandsraummodell des „gesunden“ Netzzustandes ab und deckt sich stark mit dem Modell eines spezifischen elektrischen Fehlers, so ist eine Auslösung des Schutzes sowie eine Ermittlung der Fehlerart und des Fehlerorts möglich.

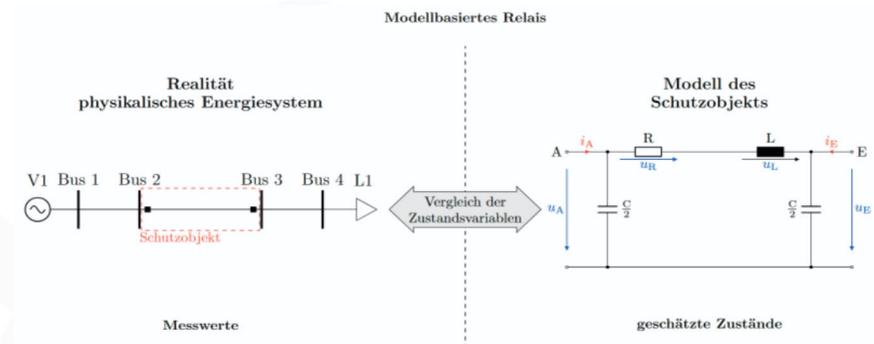


Abb. 28: Prinzipische Skizze der Funktion eines modell-basierten Relais am Beispiel eines Leitungsausschnitts nach [Becker, G., Kordowich, G., Jaeger, J.: 'Model-based Power System Protection – Benefits and Drawbacks']

### 3.3.7 Entwicklung und Herausforderungen von adaptiven Schutzsystemen

Tobias Lorz, M. Sc.

Konventionelle Schutzgeräte im Energiesystem sind normalerweise mit einem spezifischen Satz an Schutzparametern konfiguriert, welcher alle Betriebszustände im Netz abdecken müssen und zusätzlich resistent gegenüber Einflüssen bei der Messwerterfassung sein muss. Die Implementierung eines adaptiven Schutzsystems ermöglicht eine Parametrierung abhängig vom aktuellen Betriebszustand oder anderen Effekten. Dies ist in Abb. 29 und Abb. 30 dargestellt: Während ein einzelner Parametersatz das Netz nicht optimal schützen kann erlaubt das Adaptivschutzkonzept durch auf die Einspeisesituation angepassten Parameter einen optimalen Schutz für verschiedene Betriebszustände. Dem „Freiheitsgrad“ bei spezifischen Parametern für einen Betriebszustand muss jedoch auch bei der Berechnung der Schutzparameter als auch bei der Auswahl im laufenden Betrieb berücksichtigt werden. So skaliert der Ergebnisraum für die Schutzparameterberechnung mit der Anzahl der berücksichtigten Eingangsdaten sowie deren Differenzierung. So können z.B. die Einspeisung oder Lastströme je nach geforderten Detailgrad in verschiedenen Prozentschritten erfasst werden.

Als Kriterium für die Umsetzung eines Adaptivschutzsystems haben sich folgende Faktoren herauskristallisiert: Nachvollziehbarkeit, Skalierbarkeit, Robustheit, Schutzperformance und Nutzbarkeit bereits vorhandener Hardware Versuchseinrichtungen des Lehrstuhls.

Im Rahmen der Forschung wird vor allem die Auswirkungen der Definition der Eingangsdaten sowie deren Konsequenz für den automatisierten Prozess der Schutzparameterberechnung untersucht. Dieser bidirektionale Ansatz wird im Rahmen der exponentiellen Skalierung mit der Anzahl der Eingangsdaten und deren Auswirkungen auf das Adaptivschutzsystem untersucht.

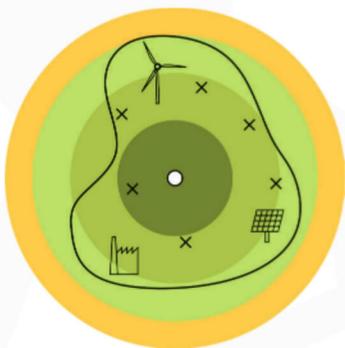


Abb. 29: Schema klassischer Schutz

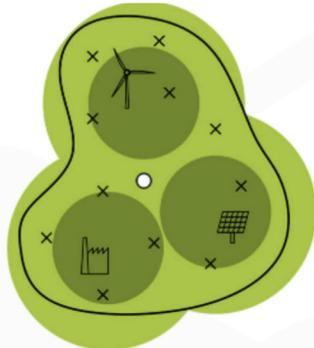


Abb. 30: Schema Adaptivschutz

### 3.4 Drittmittelzuwendungen

Seit der Neugründung des Lehrstuhls im Jahre 2011, konnte die Einwerbung von Drittmitteln zunächst rasch gesteigert und anschließend auf einem hohen Niveau stabilisiert werden. Dank der Unterstützung verschiedener Förderorganisationen, sowie durch Kooperationen mit Industriepartnern und Stiftungen wurden zahlreiche innovative Forschungsprojekte realisiert. Abb. 31 gibt einen Überblick über die Entwicklung der Drittmittelzuwendungen an den Lehrstuhl seit 2012. Die Grafik zeigt, wie sich das hohe Engagement in der Forschungsförderung verstetigt hat und der Lehrstuhl als attraktiver Standort für wissenschaftliche Vorhaben etabliert werden konnte.

Im Anschluss folgt eine detaillierte Auflistung der geförderten Projekte seit 1993, die die thematische Breite der Forschungsarbeiten am Lehrstuhl widerspiegelt.

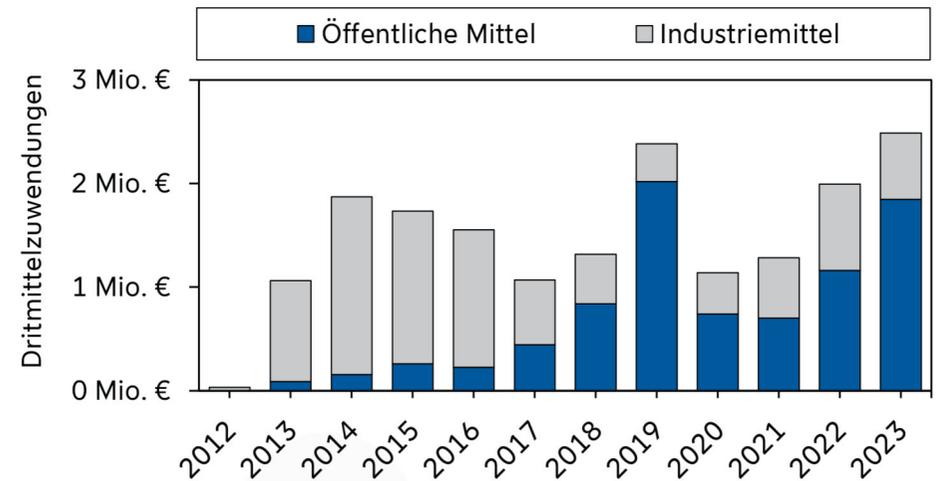


Abb. 31: Entwicklung der Drittmittelzuwendungen an den Lehrstuhl seit 2012

<b>Projektitel</b>	<b>Laufzeit</b>	<b>Verantwortliche</b>	<b>Projektpartner</b>
Kleinleistungsmodell für Oberschwingungskompensatoren	1993 - 1999	Gretsch	StMWK
Berechnung von Kurzschlußströmen in Gleichstrom- und Steuerspannungsnetzen	1994 - 1998	Herold	DFG
Stationäre Optimierung elektrischer Energieversorgungsnetze im Zustandsraum	1994 - 1999	Herold	Industrie
Zentrale Oberschwingungs-Kompensation in elektrischen Energieversorgungsnetzen	1995 - 1999	Gretsch	DFG
Berechnung von Leiteranordnungen unter Berücksichtigung von Stromverdrängung und Magnetisierung	1995 - 1999	Herold	StMWK
Beschreibung und Berechnung von Drehstromsystemen mit leistungselektronischen Anlagen im Zustandsraum	1995 - 2000	Herold	StMWK
Einfluss von FACTS-Anlagen auf die Spannungsstabilität von Verbundnetzen und Transite	1995 - 2001	Herold	Industrie
Vergleichsschutz auf Leistungsbasis	1995 - 2001	Herold	StMWK
Diagnose von Stromrichtern mit Hilfe der Symmetrischen Raumzeiger-Komponenten	1995 - 2001	Herold	StMWK
Raumzeiger-Modell des Netzes mit UPFC im Laplace-Raum	1997 - 2002	Herold	Industrie
Kurzschlußbeanspruchung in Schaltanlagen mit Leitungsseilen	1997 - 2013	Herold	StMWK
Der Zwischenphasenregler IPFC als neues Betriebsmittel zur Leistungsübertragung	1998 - 2002	Herold	DFG
Wanderwellenschutz auf Basis der Wavelet-Transformation	1998 - 2002	Herold	Industrie
Zustandsraummodelle von FACTS-Anlagen in elektrischen Energieversorgungsnetzen	1999 - 2004	Herold	DFG
Gegenseitige Beeinflussung zentraler Oberschwingungs-Kompensatoren	1999 - 2004	Gretsch	StMWK
Berechnung von Leiteranordnungen unter dem Aspekt elektromagnetischer Beeinflussungen und der Wärmeverluste	2000 - 2005	Herold	StMWK
Berechnung und Simulation komplexer Energieversorgungssysteme	2000 - 2012	Herold	Industrie
Dynamische Kurzschlussstrombegrenzung auf Basis eines sechspulsigen Thyristorgleichrichters	2001 - 2007	Herold	StMWK
Wechselwirkung und Betriebsverhalten moderner FACTS-Anlagen mit dem Übertragungsnetz	2001 - 2007	Herold	StMWK

<b>Projektitel</b>	<b>Laufzeit</b>	<b>Verantwortliche</b>	<b>Projektpartner</b>
Schutzsysteme für Netzstrukturen mit dezentralen Energieeinspeisungen	2004 - 2006	Jäger	Industrie
Theoretische und experimentelle Untersuchung der Schutzbeschaltung von Hochspannungsventilen für FACTS-Anlagen	2002 - 2007	Herold	Industrie
Vergleichsschutz für nichtlineare, insbesondere leistungselektronische Betriebsmittel auf der Basis von Leistungsgrößen	2005 - 2007	Herold	DFG
Schutzkonzepte für Übertragungsnetze im mediterranen Ring	2005 - 2008	Jäger	Industrie
Schutzbewertung und -koordination für ein überregionales Übertragungsnetz	2005 - 2009	Jäger	Industrie
Veränderte Systembedingungen und Netzanforderungen einer deregulierten elektrischen Energieversorgung	2005 - 2010	Jäger	StMWK
Weiterentwicklung der Windenergienutzung zu einem wesentlichen Bestandteil der elektrischen Energieversorgung	2006	Jäger	StMWK, Industrie
Dynamische Transformatorbeanspruchung bei Pumpspeicherwerken	2007	Jäger	Industrie
Entwicklungsszenarien und Auswirkungen von regenerativen Energieeinspeisungen in elektrischen Verteilnetzen	2007 - 2008	Jäger	Industrie
Testalgorithmen für multifunktionale Relays	2007 - 2008	Jäger	Industrie
Unsymmetrischer Betrieb von Stromrichterschaltungen	2007 - 2013	Herold	StMWK
Bestimmung der Restlebensdauer von Papier-Masse-Kabeln anhand einer TE- und Verlustwinkel-Diagnose	2007 - 2015	Herold	Industrie
Neue schutz- und leittechnische Konzepte für elektrische Energieversorgungsnetze mit dezentralen Stromerzeugungsanlagen	2008 - 2010	Jäger	DFG
Grundfrequenzmodulation und Spannungsqualität mehrstufiger Spannungsumrichter	2008 - 2013	Herold	StMWK
Netz- und Schutzsicherungssystem zur vorausschauenden Netzausfallvermeidung	2010 - 2015	Jäger	DFG
Dynamic Protection Security Assessment	2011 - 2014	Jäger	Industrie
Methoden der Netzarchitektur zukünftiger Versorgungsstrukturen	2011 - 2013	Jäger	StMWi, Industrie
Untersuchung, Beurteilung sowie Vermeidung der Wechselwirkungen zwischen transienten Phänomenen des Energieversorgungssystems und der Netzschutztechnik	2011 - 2017	Jäger	StMWK
Konzeption eines Prüffeldes zur Durchführung von Leistungsprüfungen an Hochleistungsstromrichtern	2012	Luther	Industrie

<b>Projektitel</b>	<b>Laufzeit</b>	<b>Verantwortliche</b>	<b>Projektpartner</b>
Netzurückwirkungen selbstgeführter Stromrichter mit Stromzwischenkreis	2012 - 2013	Herold	StMWK
Energiesystemanalyse Bayern	2012 - 2013	Luther	Industrie
Entwicklung einer neuartigen synthetischen Prüfschaltung von Hochleistungs-halbleiterbauelementen	2012 - 2013	Luther	Industrie
Neue Methoden der elektrischen Netzarchitektur zur optimierten Anbindung von Windkraftanlagen im Binnenland	2012 - 2013	Jäger	StMWi
Erforschung, Entwicklung und Erprobung von Methoden und dynamischen Modellen für innovative Übertragungs- und Verteilnetze für den Einsatz in Netzplanungssoftware	2012 - 2015	Luther	Industrie
Zustandsdiagnose an räumlich ausgedehnten Betriebsmitteln in Echtzeit	2012 - 2016	Luther	Industrie
Systemanforderungen und Auslegung zukünftiger innovativer Übertragungssysteme bei der Integration von HGÜ	2012 - 2015	Luther	Industrie
Smart Grid Solar	2012 - 2017	Luther	EFRE, ZAE
Hybride Netzarchitekturen unter Berücksichtigung des regenerativen Energiedargebots	2012 - 2019	Jäger	Industrie
Energiesystemanalyse Bayern	2012- 2013	Luther	StMWi, Industrie
Methoden und dynamische Modelle für innovative Übertragungs- und Verteilnetze	2012-2015	Luther	Industrie
Dynamic Study Model 2020 for the Continental European Transmission System	2013 - 2024	Luther	Industrie
Ultrahochspannung - Beeinflussung hybrider AC/DC-Mastkonfigurationen und Koordination AC- mit DC-Schutz	2013 - 2016	Jäger	Industrie
Hybrides Netz - Multi-Level-Stromrichter im Netzbetrieb	2013 - 2016	Jäger	StMWi, Industrie
Ortsaufgelöste Evaluierung dielektrischer Eigenschaften von Energieversorgungskabeln	2013 - 2018	Luther	Industrie
Adaptivschutz - Schutzalgorithmen für hochausgelastete Leitungen	2013 - 2016	Jäger	StMWi, Industrie
Offshore-Netzanschlussysteme	2014 - 2015	Luther	Industrie
Zustandserfassung von 20 kV-Mittelspannungskabeln	2014 - 2018	Luther	Industrie
Schutz neuartig vermaschter Netztopologien (NeToVe)	2014 - 2017	Jäger	BMBF
Schutzalgorithmen in Netzen mit HGÜ und Grid Data Consulting	2015 - 2016	Jäger	Industrie

<b>Projektitel</b>	<b>Laufzeit</b>	<b>Verantwortliche</b>	<b>Projektpartner</b>
M2C-basierter Testumrichter für synthetische Prüfungen	2015 - 2016	Luther	Industrie
SWARM: Koordinierte Kleinspeicher im Verteilnetz der N-ERGIE Aktiengesellschaft - Storage With Amply Redundant Megawatt (SWARM)	2015 - 2017	Luther	Industrie
Schutzkoordination beim Netzwiederaufbau (NETZ:Kraft)	2015 - 2018	Jäger	BMW i
Methoden und dynamische Modelle für innovative Übertragungs- und Verteilnetze	2015 - 2018	Luther	Industrie
Netzstudie zur Versorgung der Megacity Paris mit Hochtemperatursupraleitung	2016-2017	Jäger	Industrie
Kombinierte Optimierung, Simulation und Netzanalyse des elektrischen Energiesystems Deutschlands im europäischen Kontext	2016 -2019	Luther	BMW i
Neues Distanzschutzprinzip ohne Resistanzmessung als sicherer Leistungsschutz bei hohen Lastflüssen	2016 - 2019	Jäger	DFG
ENSURE I - Neue Energienetzstrukturen - Teilvorhaben FAU	2016 - 2019	Luther, Jäger	BMBF
DynNSR: Voruntersuchung und Umsetzung eines Konzeptes zur Dynamischen Netzsicherheitsrechnung	2016 - 2017	Luther	Industrie
MMC-Converter for Battery Storage in Smart Power Plants	2017	Jäger	Industrie
Experimentelle Untersuchungen, generische Modellierung und Simulation von Batteriespeichersystemen	2017 - 2020	Luther	Industrie
Auslegung und Test eines Impulslastwiderstands zur kurzzeitigen Aufnahme von Wirkleistung	2017 - 2020	Luther	Industrie
InnoSys 2030: Innovationen in der Systemführung bis 2030	2018 - 2021	Luther, Jäger	BMW i
Modelle und Regelungskonzepte für MMC-VSC Multiterminal HGÜ-Systeme zur Erhöhung der Stabilität von AC- und DC-Netzen	2018 - 2021	Luther	DFG
Test Alternative Insulation Liquids (TAIL)	2018 - 2022	Luther	StMWi, Industrie
Mustererkennung in der KI-Netzschutztechnik	2018 - 2024	Jäger	Industrie
Entwicklung von Zeitkonstanten in der Regelung von elektrischen Netzen	2019 - 2021	Luther	Industrie
ENSURE II - Neue Energienetzstrukturen - Teilvorhaben FAU	2020 - 2023	Luther, Jäger	BMBF
INTEGRAL 7: Referenzmodelle des Deutsch-Europäischen Übertragungsnetzes zur Leistungsfluss- und KS-Stromberechnung	2020 - 2021	Luther	Industrie
Modellbasierter Schutz in stromrichter gespeisten Netzen	2020 - 2023	Jäger	DFG

<b>Projektitel</b>	<b>Laufzeit</b>	<b>Verantwortliche</b>	<b>Projektpartner</b>
Unterstützende Methoden für einen DSA-Prozess	2021	Luther	Industrie
Demonstrator zur RMS-EMT NetzkoStMWKung in Echtzeit	2021	Luther	BFS
VENUS - Vernetzter Netzschutz für die Energiewende - Adaptivschutz	2021 - 2024	Jäger	BMBF
Freiraum 2022: Blackout-Demonstrations-Zentrum (Phase 1)	2022 - 2023	Luther	SIH
Teilentladungsmessung an Röntgengeneratoren	2022 - 2024	Luther	Industrie
Einfluss von MVDC-Netzen auf ein Übertragungsnetz mit erhöhtem Anteil an Erneuerbaren Energien	2022 - 2025	Luther	Industrie
Stoßspannungsprüfungen an Mittelspannungskabeln	2023	Luther	Industrie
ENSURE III - Neue Energienetzstrukturen Teilvorhaben FAU	2023 - 2026	Luther, Jäger	BMBF
Koordinierter Netzschutz auf Basis maschineller Lernverfahren	2024 - 2027	Jäger	DFG
Anomalieerkennung mit maschinellen Lernverfahren und modellbasierter Schutz in Stromrichternetzen	2024 - 2025	Jäger	Industrie
EOS: Digitaler Zwilling einer Energie-Plus-Siedlung	2024 - 2027	Luther	BMWi
REMBup: Hardware-in-the-Loop basiertes Dynamic Stability Assessment an einem Digitalen Zwilling	2024 - 2027	Luther	BMWi
GridAssist - Assistenzsysteme für eine optimierte automatisierte Systemführung in Verteilnetzen	2024 - 2027	Luther, Jäger	BMBF
Untersuchung der Kriechwegfestigkeit in Röntgengeneratoren	2025	Luther	Industrie

DFG – Deutsche Forschungsgemeinschaft

BMBF – Bundesministerium für Bildung und Forschung

BMWK – Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

BMWi – Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

SIH – Stiftung Innovation in der Hochschullehre

StMWi – Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie

StMWK – Bayerisches Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst

BFS – Bayerische Forschungstiftung

## 3.5 Aktuelle öffentliche Verbundprojekte

Die heutige Forschungslandschaft zeichnet sich durch eine zunehmende Interdisziplinarität aus, die innovative Ansätze an den Schnittstellen verschiedener Fachbereiche nicht nur ermöglicht, sondern oftmals auch erfordert. Auch im Zusammenhang mit elektrischen Energieversorgungssystemen zeigt sich, dass viele zukunftsweisende Projekte nicht strikt einem Themenfeld zuzuordnen sind. Vielmehr sind Inhalte aus den Bereichen Hochleistungstechnik, Systemstabilität sowie Schutz- und Leittechnik miteinander verbinden. Diese Überschneidungen eröffnen neue Perspektiven und Synergien, die maßgeblich zur Entwicklung ganzheitlicher Lösungen beitragen. Im Folgenden werden Forschungsprojekte vorgestellt, die durch ihren integrativen Ansatz gleich mehrere der zuvor behandelten Schwerpunkte berühren und damit einen zentralen Beitrag zur Weiterentwicklung der Technologien leisten.

### 3.5.1 Kopernikus ENSURE I-III – Neue Energie Netzstrukturen für die Energiewende (2016 - 2026, BMBF)

Das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Verbundprojekt Kopernikus ENSURE verfolgt mit einem ganzheitlichen Ansatz das Ziel, neue Energienetzstrukturen für die Energiewende zu erforschen und bereitzustellen. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler von Universitäten, der Industrie, der Netzbetreiber und gesellschaftliche Akteure arbeiten dabei gemeinsam an einer umfassenden Optimierung des Energiesystems unter Berücksichtigung aller relevanten Energieträger. Ein zentrales Ziel des Projekts ist die Entwicklung eines Gesamtsystems, das sowohl zentrale als auch dezentrale Energieversorgungselemente sinnvoll integriert. Zudem werden die entwickelten systemischen Konzepte in einem großtechnischen Demonstrationsprojekt praktisch umgesetzt und neue Technologien erprobt.

Die Schwerpunkte des Lehrstuhl liegen in den Bereichen MVDC- und HVDC-Systeme, der Regelungs- und harmonischen Interaktion von Umrichtern, netzbildender Regelungen, adaptivem Schutz sowie in den Anforderungen an Schutzalgorithmen in Netzen mit hohem Anteil leistungselektronischer Erzeugung. Darüber hinaus entsteht unter Leitung des Lehrstuhls eine kooperative Plattform zur Validierung von Lösungen für die Energiewende. Diese sogenannte Co-Demonstrationsplattform verknüpft geographisch verteilte Echtzeitsimulationen und Netzmodelle zu einem einzigartigen Laborcluster. Hierzu haben Expertinnen und Experten des KIT, der RWTH, von OPAL-RT GmbH sowie des Lehrstuhls ihre Kompetenzen gebündelt, um Europas leistungsfähigsten Simulationsverbund für Untersuchungen zur Netzintegration und Netzkonformität mittels Hardware-in-the-Loop zu schaffen und nachhaltig zu etablieren.

## Projekthighlights aus Kopernikus ENSURE

### Protection Toolchain und Adaptivschutz mit Stationsautomatisierung (ProToc)

Die Protection Toolchain ermöglicht als Assistenzsystem in der Netzplanung die frühzeitige Erkennung und Behebung von Schwachstellen in der Schutztechnik von Energieversorgungsnetzen. Zusammen mit der Anpassbarkeit der Schutzparameter durch den Adaptivschutz schafft sie eine hochflexible Schutzarchitektur, die eine schnelle Anpassung an wechselnde Netzbedingungen ermöglicht. Diese Entwicklung wird die Schutztechnik in dynamischen, dezentralisierten Netzen grundlegend verändern.

### Entwicklung und Validierung des Phase Restoring Principle

Dieses neue netzbildende Regelungskonzept dient zur Erhöhung der Frequenzstabilität. Das Regelungskonzept arbeitet ohne Phasenregelkreis (PLL) und zeichnet sich durch PT1 Verhalten aus. Die Priorisierung der Reaktion auf Störungen gegenüber Sollwertänderungen ist im Einklang mit internationalen Netzanschlussrichtlinien (z. B. NERC). Die Regelung kann somit einen Beitrag zur Systemstabilität in Netzen mit hohem Anteil leistungselektronischer Komponenten leisten und hat das Potenzial, Netzstrukturen im Sinne der Energiewende signifikant zu verbessern.

### MVDC-Kollektornetz im netzbildenden Betrieb

Die Bündelung von erneuerbaren Energiesystemen und Batteriespeichern in Mittelspannungsgleichstromnetzen ermöglicht die konzentrierte Einspeisung über zentrale Umrichterstationen. Dadurch kann die Volatilität erneuerbarer Energien abgemildert werden und es ermöglicht mittels netzbildender Regelungen einen Kraftwerksbetrieb mit inhärenter Momentanreserve- und Regelleistungsbereitstellung mit erneuerbaren Energien zu realisieren.

### Co-Demonstrationsplattform

Die Co-Demonstrationsplattform ist eine kooperative Testumgebung für die Entwicklung und Erprobung von Technologien der Energiewende. Der Fokus der Plattform liegt auf Hardware-in-the-Loop-Simulationen. Durch gemeinsame Netzmodelle und spezialisierte Tools zur Co-Simulation, zur Aufbereitung von Netznutzungsfällen oder zur Datenkonvertierung stellt die Plattform eine hochinnovative und praxisorientierte Entwicklung dar. Sie bietet eine realitätsnahe Umgebung für die Prüfung neuer Technologien, insbesondere im Hinblick auf Systemstabilität und Netzschutz.

### **3.5.2 EOS – Energetische Optimierung einer Energie-Plus-Siedlung auf Systemebene (2024 - 2027, BMWK)**

Das Verbundprojekt EOS verfolgt unter Leitung des Lehrstuhls den Ansatz eines optimierten Energieeinsatzes von Strom, Wärme und Kälte in einer Energie-Plus-Siedlung. Dies soll durch den koordinierten Betrieb der drei Sektoren unter Berücksichtigung von Erzeugung, Verbrauch und den vorhandenen Speichern durchgeführt werden. Die verfügbaren Netzkapazitäten im Wohngebiet werden dabei mitberücksichtigt und optimal genutzt. Dabei werden verschiedene regulatorische Ansätze betrachtet, um die technischen Potentiale der Energiegemeinschaft vollständig auszunutzen. Für die Untersuchungen wird ein sektorenübergreifendes Echtzeitsimulationsmodell der Siedlung erstellt. Durch die Kopplung des Echtzeitmodells mit realen Messungen entsteht ein digitaler Zwilling. Der digitale Zwilling bietet die notwendigen Freiheitsgrade für planerische Untersuchungen und umfangreiche Simulationen verschiedener Szenarien. Dies ermöglicht, im Vorfeld des realen Probebetriebs Optimierungsalgorithmen und Schnittstellen individuell auf die Anforderungen des Einsatzszenarios abzustimmen.

Zusätzlich werden Optimierungsmodelle entwickelt, mit denen die Auswirkungen regulatorischer Rahmenbedingungen sowie Tarifmodelle auf die Investitions- und Betriebsentscheidungen untersucht werden können. Eine Untersuchung der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Bestandssiedlungen ist wichtig, da die Energiewende im Gebäudebereich nur gelingen kann, wenn innovative Konzepte auch auf bestehende Infrastruktur übertragbar sind. Eine Überprüfung der Übertragbarkeit auf eine Bestandssiedlung ist daher ein wichtiger Baustein im Projekt. Schwerpunkte des Lehrstuhls sind die elektrische Modellierung und die Optimierung. Hierzu wird ein sektorengesetztes digitaler Zwilling entwickelt und daran die Optimierungen für das Wohngebiet untersucht.

### **3.5.3 GridAssist – Assistenzsysteme für eine optimierte automatisierte Systemführung in Verteilnetzen (2024 - 2027, BMWK)**

Das Verbundprojekt GridAssist verfolgt das Ziel, Assistenzsysteme für eine optimierte automatisierte Systemführung in Verteilnetzen zu entwickeln. Dies soll eine höhere Integration von erneuerbaren Erzeugern in das Stromnetz ermöglichen. Hierbei werden auf die Spannungsebenen individuell zugeschnittene Lösungen entwickelt. Die Übertragbarkeit dieser Lösungen und die Erprobung der Assistenzsysteme im Feld sind zentrale Bestandteile des Projekts. Eine ausreichende Beobachtbarkeit, stellt die Grundlage jeglicher Automatisierung in den Verteilnetzen dar.

Je niedriger die Spannungsebene ist, desto geringer ist auch die Kenntnis über den aktuellen Netzzustand. In GridAssist soll daher zunächst die notwendige Beobachtbarkeit hergestellt werden. Neben der Installation von Messtechnik sind entsprechende Konzepte zu erarbeiten, wie die Messdaten am sinnvollsten bei den jeweiligen Netzbetreibern und deren Prozessen integriert werden können. Bei ausreichend installierter Mess- und Kommunikationstechnik, also gegebener Beobachtbarkeit, kann der jeweilige Netzzustand analysiert werden. Neben analytischen sollen auch datenbasierte Methoden eingesetzt werden. Aufbauend auf der Analyse des Netzzustands müssen dann durch die Assistenzsysteme Entscheidungen vorgenommen werden. Diese können von Handlungsempfehlungen für den Systemführer bis hin zu dem voll automatisierten Flexibilitätsabruf reichen.

Ein Schwerpunkt des Lehrstuhls liegt auf der Entwicklung einer embedded KI der Stationsleittechnik für das prognosebasierte Engpassmanagement in Ortsnetzstationen. Weitere Themen sind automatisiertes Engpass- und Störungsmanagement auf Basis maschineller Lernverfahren in Verteilnetzen sowie die Entwicklung eines Assistenzsystems für den Netzwiederaufbau. Außerdem beteiligt sich der Lehrstuhl für Mustererkennung (Pattern Recognition Lab) am Aufbau einer Graphendatenbank zur Vereinheitlichung heterogener Datenquellen.

### **3.5.4 REMBup – Sektorengesetztes Hybridkraftwerk zur CO<sub>2</sub> neutralen Energieversorgung der Nürnberg Messe-GmbH (2024 - 2028, BMWK)**

Im Projekt REMBup soll im Rahmen eines Reallabors eine zuverlässige CO<sub>2</sub>-neutrale Energieversorgung am Standort der NürnbergMesse umgesetzt und erprobt werden. Den damit verbundenen Herausforderungen im Bereich der Sektorenkopplung und Netzdienlichkeit wird durch Innovationen im Bereich des prädiktiven Energiemanagements, der Energiespeicherung, der Simulation und der Digitalisierung begegnet. Durch enge Kooperation von Industrie und Forschung soll ein nachhaltiges und versorgungssicheres Energiesystem durch eine Mischung aus etablierten Technologien und innovativen Ansätzen geschaffen werden. Das Kernstück stellt ein digitaler Zwilling aller Komponenten dar, der eine prädiktive und optimierte Steuerung garantieren soll. Der Lehrstuhl für Elektrische Energiesysteme untersucht im Projekt verschiedene Stabilitätsphänomene und Gegenmaßnahmen, die im Zusammenhang der leistungselektronischen Betriebsmitteln auf dem Messegelände entstehen können.

## 4 Labore und Versuchseinrichtungen des Lehrstuhls

Für die praktische Umsetzung unserer Forschung stehen dem Lehrstuhl verschiedenste Labore und Versuchseinrichtungen zur Verfügung. Grundlage aller Untersuchungen sind digitale Berechnungen elektrischer Netze, Betriebsmittel oder deren Sekundärtechnik. Die hierbei entwickelten Konzepte können je nach Anwendungsfall in den Laboren an den beiden Standorten in Erlangen und Nürnberg in einem realen Umfeld getestet werden.

Am Standort Erlangen befindet sich die Hochspannungshalle und die Hochstromanlage. Hier findet die praktische Umsetzung der Forschung der Arbeitsgruppe Hochleistungstechnik statt. In den Laboren werden unter anderem elektrische Prüfungen für Hochspannungs- und Hochstromanwendungen nach genormten Verfahren durchgeführt. Außerdem befindet sich der Analog-Hybrid-Simulator in Erlangen. Dieser wird hauptsächlich in der Lehre eingesetzt, um die Studierenden im Rahmen von Hochschulpraktika mit dem Betrieb elektrischer Anlagen vertraut zu machen.

An unserem Standort in Nürnberg „Auf AEG“ befindet sich das Zentrum für angewandte Simulationen, welches drei Labore vereint. In dem flexiblen Niederspannungslabor (Auf AEG) steht hier eine Auswahl an physikalischen Betriebsmitteln zur Verfügung, die über Power Hardware-in-the-Loop-Simulationen mit dem Echtzeitlabor gekoppelt werden können. Dort stehen diverse Echtzeitsimulatoren und diverse Sekundärtechnik zur Verfügung, um eine möglichst realitätsnahe Abbildung des tatsächlichen elektrischen Energiesystems zu erhalten.

### 4.1 Hochspannungshalle und Hochstromanlage (Erlangen)

#### Hochleistungsprüffeld

Seit dem Umzug in das neue Gebäude im Jahre 1990 steht dem Lehrstuhl eine moderne Prüfhalle zur Verfügung, die sowohl für Hochspannungsversuche als auch für Hochstromversuche genutzt wird. Die Prüfhalle hat eine Grundfläche von 12 x 12 m und eine Innenhöhe von 6,5 m. Sie ist vollständig geschirmt, womit ein maximaler Teilentladungsstörspegel von ca. 500 fC erreicht wird. Mit dem Wechselspannungsprüftransformator (Abb. 32, rechts) können Spannungen bis 500 kV eff geprüft werden, wobei Teilentladungen oder der Verlustfaktor  $\tan \delta$  messbar sind. Mit dem Stoßgenerator (Abb. 32, links) nach dem Marx-Prinzip können Blitz- und Schaltstoßspannungen bis maximal 1 MV geprüft werden.

Neben der Prüfhalle befinden sich noch 2 kleinere geschirmte Hochspannungsmesskabinen mit einem Hochspannungsbaukasten der Firma MWB für Prüfspannungen bis 100 kV eff als Wechselspannung, Gleichspannung und Stoßspannung.

Der Baukasten wurde ursprünglich für Studentenpraktika entworfen, wird aber auch für Forschungszwecke eingesetzt.

In einer weiteren kleinen geschirmten und gefliesten Hochspannungsmesskabine werden Versuche auch mit Flüssigkeiten durchgeführt.

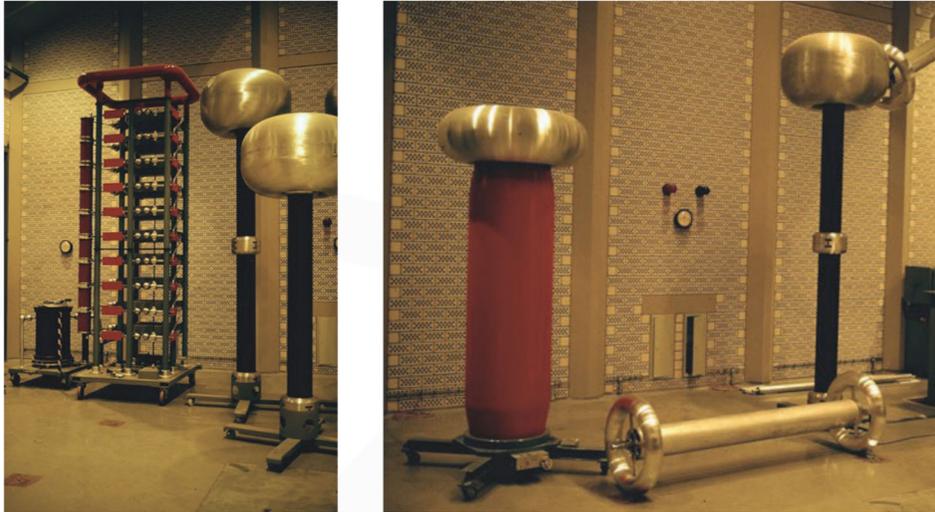


Abb. 32: Stoßgenerator (links) und Wechselspannungsprüfanlage mit Kesseltransformator (rechts) nach Inbetriebnahme im Jahr 1990

Mit der Hochstromprüfanlage (Abb. 33) steht eine Spannung von 50 .. 250 V (Leiter-Leiter) und ein Dauerstrom von 4,5 kA als Drehstromsystem zur Verfügung. Ein Kurzschlussstrom von 40 kA ist bis max. 5 s möglich. Die Stromstärke und das Gleichstromglied sind mit 2 Widerstands- und Drosselsätzen in jeweils 4 Stufen einstellbar. Mit einem zusätzlichen Anschluss ins Freifeld vor der Hochspannungshalle sind auch Hochstromprüfungen im Außenbereich möglich.

2015 wurde das Sicherheitskonzept des Prüffeldes mit Schutzzäunen und Türverriegelung an die neuen Sicherheitsrichtlinien für Prüfanlagen angepasst.

2016 wurde eine Resonanzprüfanlage der Firma HIGHVOLT (Abb. 34) für Prüfspannungen bis 50 kV eff beschafft. Sie kann kapazitive Lasten mit bis zu 7 A prüfen und ist vor allem für Kabelprüfungen geeignet.

2017 wurde die Hochstromanlage mit einer neuen Steuerung Simatic S7 ausgestattet. Damit sind die Prüfzeiten feiner einstellbar sowie die Anlageneinstellungen besser zu überwachen.

2018 wurden für die beiden Hochspannungsmesskabinen 2 neue Hochspannungsbaukästen der Haefely AG beschafft (Abb. 35). Die Steuerung erfolgt auf Umrichterbasis mit Prüffrequenzen 30 .. 400 Hz. Damit wird das vorlesungs begleitende Hochspannungspraktikum am Lehrstuhls moderner gestaltet und von den Studierenden sehr gerne besucht.

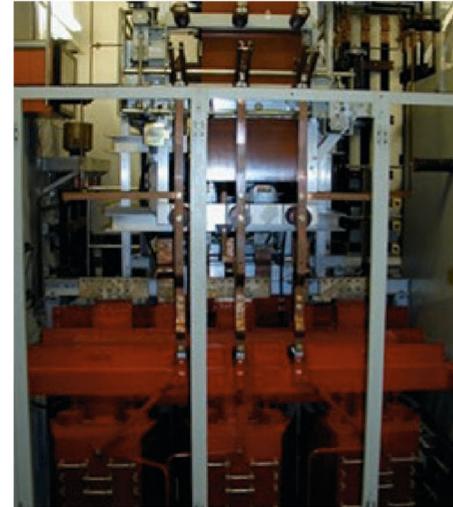


Abb. 33: Hochstromprüftransformator an Mittelspannungseinspeisung



Abb. 34: Resonanzprüfanlage

2020 erhielt die Prüfhalle eine Klimatisierung, damit die Temperatur und Luftfeuchtigkeit in einem engeren Normbereich einstellbar sind. Konstante und vergleichbare Prüfbedingungen sind somit realisierbar.

2023 wurden im Rahmen einer DFG-Forschungsgroßgerätebeschaffung die Wechselspannungsprüfanlage bis auf den Transformator komplett erneuert (Abb. 36, links). Weiterhin wurde eine neue Gleichspannungsprüfanlage bis 400 kV beschafft (Abb. 36, rechts). Beide Anlagen wurde von der HIGH-VOLT Prüftechnik Dresden GmbH geliefert.

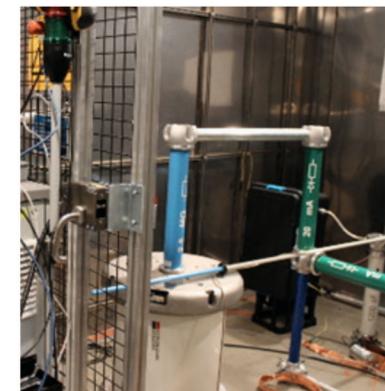


Abb. 35: Hochspannungsbaukästen



Abb. 36: Wechselspannungsprüfanlage (links), Gleichspannungsprüfanlage (rechts)

## Übersicht über die Prüfmöglichkeiten

### Laborräume:

- Hochspannungshalle Grundfläche 12 m x 12 m, Innenhöhe 6,5 m, vollständig geschirmt,
- Teilentladungsruhepegel 0,5 pC
- 3 Hochspannungsmesskabinen, davon eine als Feuchtraum
- Außenbereich (Freifeld) vor der Hochspannungshalle

### Prüfanlagen:

- Wechselspannungsprüfanlage bis 500 kV eff bei max. 1 A
- Wechselspannungsresonanzanlage bis 50 kV eff bei max. 7 A kapazitiv
- Gleichspannungsprüfanlage 400 kV, 40 mA, 16 kVA
- Blitz- und Schaltstoßgenerator bis 1 MV bei max. 50 kJ Stoßenergie
- Zwei Hochspannungsausätze bis 100 kV eff bei max. 50 mA
- Hochstromanlage bis 4,5 kA (dauernd), 40 kA eff (5 s) bei max. 250 V eff (3ph L-L)

## 4.2 Drehstrom-Demonstrationsmodell (Erlangen)

Das Drehstrom-Demonstrationsmodell (DDM) ist ein dreiphasiges Gesamtmodell von Anlagen und Komponenten der elektrischen Energieversorgung, das zur Simulation und Veranschaulichung dynamischer Vorgänge in Drehstromnetzen dient. Am DDM kann sowohl das Verhalten einzelner Betriebsmittel als auch die Funktion des Gesamtsystems nachgebildet werden. Außerdem ist es möglich, Netzzustände zu analysieren, die in der Praxis unbedingt vermieden werden müssen, wie Netzkurzschlüsse, Fehlsynchronisation oder Instabilität. Die praktische Umsetzung von Simulationsergebnissen am Modell liefert dabei Impulse für die praxisnahe Erprobung theoretischer Erkenntnisse.

Das DDM besteht aus Nachbildungen im Verhältnis 1000 V/1 V der wichtigsten in der elektrischen Energieversorgung vorkommenden konventionellen Betriebsmittel und umfasst Modelle eines Kraftwerks, von Freileitungen (insgesamt ca. 900 km), dreier Umspannwerke, einer Hochspannungsgleichstromübertragung, einer Netzeinspeisung (Verbundnetz) und von Netzschutzeinrichtungen.

Die Verbindung zwischen den Freileitungsnachbildungen und dem starren Netz ("Verbundnetz") erfolgt über einen Kuppeltransformator mit Stufenschalter und ein Umspannwerk, das als Doppelsammelschienenanlage ausgelegt ist. Für die Betätigung der Trenner und Leistungsschalter sind Steuerquittierschalter mit unterschiedlichen Betätigungselementen eingebaut. Leistungsschalter und Trenner sind so gegeneinander verriegelt, dass fehlerhafte Schaltfolgen nicht möglich sind. Dies soll die Vorgänge bei Schalthandlungen im Umspannwerk nachahmen, sodass invalide Schaltzustände vermieden werden.

Die Kraftwerksnachbildung besteht aus Turbine, Generator mit Erregermaschine und Tachodynamo sowie dem nachgeschalteten Blocktransformator.

Die Turbine wird durch einen drehzahlgeregelten fremderregten Gleichstrommotor nachgebildet. Der Drehzahlregler kann auch auf Ankerstromregelung umgestellt werden, was einem Betrieb mit konstanter Leistung im Verbundbetrieb entspricht. Der Generator ist ein 4-poliger Drehstromsynchrongenerator. Die Erregerspannung für den Drehstromgenerator wird von einem fremderregten Gleichstromgenerator erzeugt. Der Spannungsregler, der die Feldspannung der Erregermaschine verändert, kann per Hand eingestellt werden. Das Zuschalten des Kraftwerkmodells auf das Verbundnetz kann dann manuell mit Hilfe von Doppelspannungsmesser, Doppelfrequenzmesser und Synchronoskop erfolgen. Die Verbrauchernachbildungen dienen der Belastung des Kraftwerkes und der Netzeinspeisung. Sie bestehen aus ohmschen, kapazitiven und induktiven Verbrauchern. Die Verbraucherleistung kann fein abgestuft mit Wahlschaltern oder stufenlos mittels eingebauter Spartransformatoren eingestellt werden, wodurch Resistenzen wie auch Reaktanzen weitgehend unabhängig voneinander definiert werden können.



Abb. 37: Das Drehstrom-Demonstrationsmodell

Als motorischer Verbraucher dient ein polumschaltbarer Asynchronmotor in Dahlanderschaltung.

Er ist zur besseren Beobachtung der Anlaufvorgänge mit einer zusätzlichen großen Schwungmasse ausgerüstet. In der Mitte der Anlage befinden sich vier gleich aufgebaute Freileitungsfelder. Die Leitungen sind als  $\pi$ -Glieder ausgeführt und entsprechen Freileitungen von 50 bzw. 100 km Länge. Die einzelnen Leitungsabschnitte lassen sich zu beliebigen Netzformen miteinander verbinden. Das Modell ist mit allen wesentlichen Schutzeinrichtungen ausgerüstet, die auch in einem realen Kraftwerk und Versorgungsnetz vorhanden sind.

Am Generator sind Überstromschutz, Differentialschutz, Schiefllastschutz, Rückleistungsschutz, Spannungssteigerungsschutz, Läufererdschlußschutz und Ständererdschlußschutz eingebaut. Im Modell können mehrere unterschiedliche analoge und digitale Distanzschutzgeräte eingesetzt werden und für den Transformatorschutz sind Überstromschutz und Differentialschutz vorhanden.

Das DDM bietet Studierenden in Praktikumsversuchen die Gelegenheit angeeignetes theoretisch Wissen an einer Nachahmung realer Elemente anzuwenden, wobei auch die Verwendung von Messinstrumenten und die Analyse von eigenen Versuchsaufbauten vermittelt wird. Somit dient das DDM zur Vernetzung und Anwendung des Wissens zur elektrischen Energieversorgung.

### 4.3 Das flexible Niederspannungslabor (Auf AEG)

Das flexible Niederspannungslabor „Auf AEG“ ist eine hochmoderne Forschungsplattform des Lehrstuhls, die eine Vielzahl von Möglichkeiten für die Untersuchung von Niederspannungssystemen bietet. Die Einrichtung ist Teil des ehemaligen AEG-Areals und kombiniert innovative Technologien, um vielseitige Experimente und Tests zu ermöglichen.

#### Technische Ausstattung

##### 1. Schaltmatrizen

- AC-Schaltmatrix: Flexibler Anschluss von Betriebsmitteln mit einer Nennspannung von 400 V und einer Stromtragfähigkeit bis 400 A.
- DC-Schaltmatrix: Maximalspannung 800 V, Stromtragfähigkeit 400 A.

##### 2. Speichersysteme

- Lithium-Ionen- und Blei-Batterien mit Speichervermögen bis 60 kWh.
- Regelbare Batteriesysteme für netzdienliche Anwendungen.

##### 3. PV-Anlage

- Installierte Leistung von 17,42 kWp mit separater Ausrichtung nach Süden, Westen und Osten.

##### 4. Leistungselektronik

- 2-Level-Umrichter und MMC-Systeme mit variabler Spannungsregelung.
- Linear- und geschaltete Verstärker im Vierquadrantenbetrieb mit bis zu 100 kVA Leistung und einem Frequenzbereich bis 30 kHz zur Simulation unterschiedlicher Betriebszustände.
- Ein thyristorgesteuerter Niederspannungsregler der Firma A. Eberle HmbH & Co. KG für flexible Spannungsregelung im Bereich  $\pm 10\%$  Nennspannung.

##### 5. Echtzeitsimulatoren

- Power-Hardware-in-the-Loop (PHIL) für flexible Testszenarien.
- Integration in das Echtzeitlabor mit einer 200 m Lichtwellenleiterverbindung.

#### Forschungsschwerpunkte

Das Labor unterstützt die Analyse von netzdienlichen Regelungen, einschließlich Netzfolgebetrieb, netzbildender Steuerungen und der Untersuchung von virtuellen Impedanzen. Darüber hinaus erlaubt es die Untersuchung von un-symmetrischen Lastzuständen und die Simulation zukünftiger Energieszenarien.

## Besondere Merkmale

- Hohe Flexibilität durch modulare Komponenten.
- Verwendung von Echtzeitsimulatoren zur Kopplung mit virtuellen Betriebsmitteln.
- Einsatz smarter Messtechnik für präzise Datenerhebung.

Das Niederspannungslabor ist eine zentrale Infrastruktur für Forschung und Lehre im Bereich elektrischer Energiesysteme und bietet eine ideale Umgebung zur Entwicklung und Prüfung innovativer Technologien.

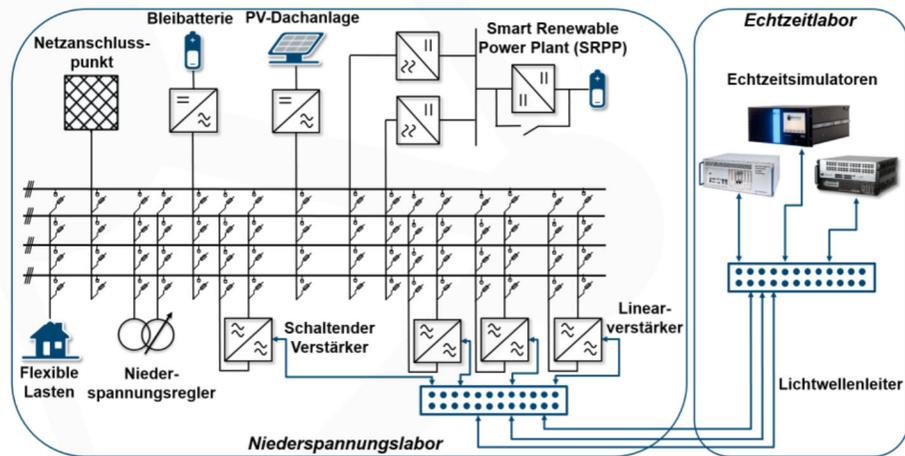


Abb. 38: Aufbau Niederspannungslabor

## 4.4 Echtzeitlabor (Auf AEG)

Die Versorgungssicherheit und -verfügbarkeit sind zentrale Anforderungen an den Betrieb eines Energienetzes. Um diese dauerhaft sicherzustellen, ist ein tiefgreifendes Verständnis des Netzes, seiner Komponenten und insbesondere ihrer Interaktionen notwendig. Da die Erforschung solcher Wechselwirkungen die Integrität des realen Stromnetzes gefährden könnte, ist der Einsatz des bestehenden Netzes zu Testzwecken ausgeschlossen. Stattdessen bietet ein Echtzeitsimulator eine sichere Alternative. In diesem Kontext werden reale Geräte und Betriebsmittel mit einem modellierten und simulierten Netz über Kommunikationsprotokolle oder analoge und digitale Signale verbunden. Dadurch lassen sich die Interaktionen zwischen Geräten und Betriebsmitteln mit dem Energienetz gefahrlos untersuchen. Simulationssysteme können dabei entweder die Funktion eines Energienetzes übernehmen oder ein Betriebsmittel in dessen Aufbau und physikalischen Eigenschaften nachbilden.

Im Echtzeitlabor des Lehrstuhls, siehe Abb. 39 stehen dafür leistungsstarke Echtzeitsimulatoren der Hersteller RTDS Technologies, Opal-RT und Speedgoat zur Verfügung.



Abb. 39: Das Echtzeitlabor des Lehrstuhls für Elektrische Energiesysteme

Mit den zugehörigen Simulationsumgebungen RSCAD, RT-Lab, Hypersim und Matlab Simulink können sowohl RMS- als auch EMT-Analysen durchgeführt werden. Das Echtzeitlabor ermöglicht darüber hinaus die Untersuchung von Sekundärhardware wie Mess- und Schutzgeräten sowie Regelungseinheiten mithilfe von Control Hardware-in-the-Loop (CHIL)-Simulationen. Eine Verbindung über optische Kabel erlaubt die Durchführung von Power Hardware-in-the-Loop (PHIL)-Simulationen im Niederspannungslabor des Lehrstuhls, bei denen Leistungsverstärker für realitätsnahe Tests eingebunden werden. Abb. 40 veranschaulicht die Kopplung des Echtzeitlabors mit dem Niederspannungslabor sowie die zuvor beschriebenen CHIL- und PHIL Simulationen.

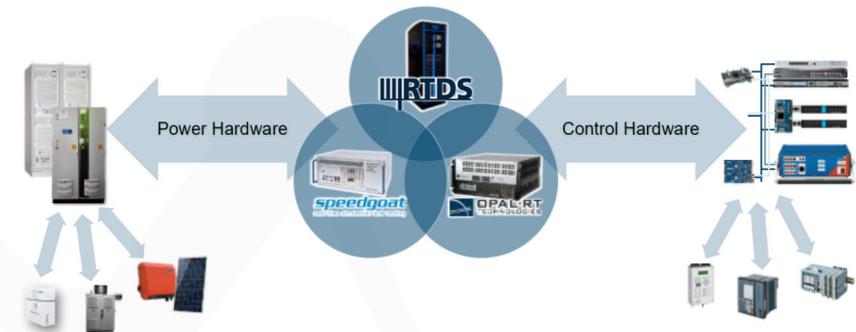


Abb. 40: Beschreibung: Laborkopplung des Echtzeitlabors und des Niederspannungslabors durch die Echtzeitsimulatoren

## 4.5 Netzleitwartenmodell (Erlangen)

Die Forschungsleitwarte am Lehrstuhl für Elektrische Energiesysteme stellt ein zentralisiertes System dar, das für die Visualisierung und Analyse dynamischer Vorgänge in der Energietechnik konzipiert wurde. Sie ermöglicht es, sowohl das Verhalten einzelner Betriebsmittel als auch die Funktion komplexer Systeme der elektrischen Energieversorgung nachzubilden und zu steuern. Dank des flexiblen Aufbaus der Leitwarte können praktische Experimente und Szenarien durchgeführt werden, die auf realen Netzzuständen basieren. Diese Szenarien umfassen sowohl reguläre Betriebsbedingungen als auch kritische Situationen wie Instabilitäten oder Blackouts, die in der Praxis vermieden werden müssen.

Das Leitwartenmodell integriert modernste Keyboard-Video-Mouse-Technologie, welche eine unabhängige und herstellerübergreifende Visualisierung ermöglicht. In die Praktikums Umgebung können verschiedene Softwarelösungen eingebunden werden. Das Modell selbst besteht aus mehreren Stationen, die mit hochmodernen Arbeitsplätzen ausgestattet sind und über eine zentrale Steuerungseinheit miteinander verbunden sind. Diese zentrale Einheit ermöglicht eine simultane Überwachung und Steuerung aller angeschlossenen Komponenten und eröffnet den Studierenden die Möglichkeit, in Echtzeit verschiedene Szenarien zu simulieren. Darüber hinaus erlaubt die Struktur des Leitwartensystems eine modulare Anordnung der Systeme, sodass unterschiedliche Szenarien und Netzkonfigurationen problemlos aufgesetzt und getestet werden können. Durch die Kopplung der Leitwarte mit dem Echtzeitlabor in Nürnberg wird ein innovativer Ansatz für die Kombination von Hardware- und Software-in-the-Loop erreicht. Diese Verbindung fördert die praktische Umsetzung von Simulationsergebnissen und trägt dazu bei, theoretische Kenntnisse in der Praxis zu erproben und zu vertiefen.

Die Leitwarte ist zudem für die Durchführung eines umfassenden Praktikums in der Energiewirtschaft und -technik konzipiert, das allen Studierenden, unabhängig von ihrer Studienrichtung, zugänglich ist. Hier können zentrale Elemente eines Blackouts simuliert, analysiert und in einem praktischen Kontext behandelt werden. Neben ihrer Funktion als hochmoderne Lehrumgebung fungiert der Raum auch als vielseitiger Showroom für die Präsentation von Projekten und als Besprechungsraum für wissenschaftliche Diskussionen, siehe dazu Abb. 41.

Durch die Integration der Technologien und didaktischer Ansätze unterstützt die Leitwarte die Studierenden dabei, praxisnahe Erfahrungen zu sammeln und ein besseres Verständnis für die Herausforderungen der modernen Energienetze zu entwickeln. Somit trägt die Leitwarte zur Weiterentwicklung unserer Bildungs- und Forschungsziele an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg bei.



Abb. 41: 3D-Modells der Leitwarte (finale Ausbaustufe)

## 5 Leben und Arbeiten am Lehrstuhl

### 5.1 Promotionen

Das wichtigste Ereignis eines Doktoranden hier am Lehrstuhl ist die Promotionsprüfung. Für die restlichen Mitarbeitenden sind die anschließenden Promotionsfeiern eine willkommene Gelegenheit, sich bereits im Vorfeld kreativ auszuleben.

Ein zentrales Element dabei sind die individuell gestalteten Doktorhüte. Jeder Hut ist ein kleines Kunstwerk für sich, das die Forschungsthemen, aber auch die Persönlichkeiten und Eigenheiten der frisch Promovierten auf kreative Weise widerspiegelt.



*Promotion Christoph Hahn 2018*



*Promotion Ananya Kuri 2025*



*Promotion Wolfgang Gawlik 2004*



*Promotion Christian Scheibe 2024*

Ebenfalls ein fester Bestandteil der Promotionsfeier ist die Fahrt mit der Riksha, eine Tradition, die stets für viel Freude und Aufmerksamkeit sorgt. Die Promovierten werden auf geschmückten Wägen von ihrem Doktorvater, oft begleitet von lauter Musik und fröhlichen Wegbegleitern um das gesamte Lehrstuhlgebäude gefahren.

Im Sommer häufig begleitet mit wild umherfliegenden Wasserbomben und im Winter hängen sich Kollegen gerne an den Wagen, sodass die Professoren ordentlich ins Schwitzen kommen.

Die Promotionsfeiern sind nicht nur eine Würdigung der wissenschaftlichen Leistung der Mitarbeitenden, sondern auch eine Gelegenheit für Familie, Freunde und Kollegen, diesen besonderen Erfolg gemeinsam zu feiern. Sie stärken den Zusammenhalt innerhalb des Lehrstuhls und sorgen dafür, dass die Promotion als ein unvergessliches Ereignis in Erinnerung bleibt.

## 5.2 Konferenzen

So wie das europäische Verbundnetz viele Teile Europas miteinander verbindet, gehört zur Arbeit am Lehrstuhl ebenfalls das Vernetzen mit den unterschiedlichsten Akteuren des elektrischen Netzes. Konferenzen sind hierfür immer eine geeignete Gelegenheit.

Regelmäßig nehmen Mitarbeitende des Lehrstuhls an internationalen und nationalen Konferenzen teil, um neueste Forschungsergebnisse zu präsentieren, sich mit anderen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern auszutauschen und neue Kooperationen zu initiieren. Diese Veranstaltungen bieten nicht nur eine Plattform zur Vorstellung eigener Arbeiten, sondern auch wertvolle Einblicke in aktuelle Entwicklungen und Herausforderungen der Energietechnik.



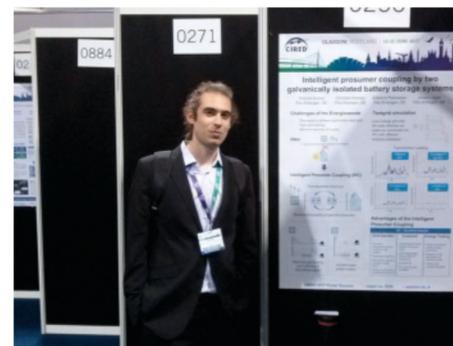
IEEE PES 2024



IEEE PES am EnCN 2025

Besonders hervorzuheben seien Veranstaltungen die hier am Lehrstuhl stattfinden. So fand dieses Jahr der IEEE PES Chapter Workshop unter dem Titel „Auf dem Weg in die Autonomie? Planung und Betrieb von Sektorgekoppelten Verteilnetzen“ seinen Weg zum Standort in Nürnberg, bei der unsere Arbeit vor Ort präsentiert wurde. In der jüngeren Vergangenheit richtete der Lehrstuhl 2017 den IEEE Power and Energy Student Summit aus, eine speziell für Studierende konzipierte Konferenz. Ein besonderes Highlight im Jahr 2023 war die Gastgeberrolle für das RTDS European User Group Meeting. Bei diesem Expertentreffen wurden aktuelle Entwicklungen, innovative Anwendungen und neueste Forschungsergebnisse zur Echtzeitsimulation von Stromnetzen präsentiert und diskutiert.

Neben der fachlichen Komponente spielen auch informelle Begegnungen eine große Rolle. Ob bei gemeinsamen Abendveranstaltungen, Exkursionen oder spontanen Gesprächen in den Pausen – oft entstehen hier die wertvollsten Kontakte und Ideen. Die Teilnahme an Konferenzen trägt somit maßgeblich zur internationalen Sichtbarkeit und Vernetzung des Lehrstuhls bei und bleibt ein wichtiger Bestandteil der wissenschaftlichen Arbeit.



CIRED 2017



ETG Schutz- und Leittechnik 2018

## 5.3 Öffentlichkeitsarbeit und Nachwuchsförderung

Das elektrische Netz und der damit einhergehende Wandel betreffen nicht nur Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, sondern auch jeden einzelnen Bürger. Eine wichtige Säule des Lehrstuhls ist es deshalb nicht nur exzellente wissenschaftliche Arbeit voranzubringen, sondern diese auch nach außen hin zu kommunizieren.

Beim jährlich stattfindenden Schlossgartenfest bietet sich die Möglichkeit, in festlicher Atmosphäre mit Vertreterinnen und Vertretern aus Wissenschaft, Wirtschaft und Politik ins Gespräch zu kommen und aktuelle Themen der Energietechnik zu diskutieren.



LndW 2019 im DDM



Schlossgartenfest 2024

Die Lange Nacht der Wissenschaften (kurz LndW) ermöglicht es, einem breiten Publikum spannende Einblicke in aktuelle Forschungsprojekte zu geben und komplexe Zusammenhänge verständlich zu vermitteln.

Ein weiterer wichtiger Baustein der Nachwuchsarbeit des Lehrstuhls sind die Schülerinfotage, die interessierten jungen Menschen einen Einblick in das Studium und die Forschung am Lehrstuhl bieten.



Forscherinnencamp 2012



Schülerinfotag 2018

Ebenso richtet sich das Forscherinnen-Camps im Rahmen der Initiative „Technik – Zukunft in Bayern?!“ an junge Gymnasiastinnen und Fachoberschülerinnen, um praxisnahe Studienorientierung im Ingenieurberuf zu ermöglichen.

## 5.4 Festliche Traditionen: Sommerfeste und Weihnachtsfeiern

Seit nunmehr 50 Jahren prägen nicht nur akademische Erfolge und wissenschaftlicher Austausch den Alltag an unserem Lehrstuhl, sondern auch die lebendige Gemeinschaft und das gesellige Miteinander. Zwei feste Bestandteile unseres Jahreskalenders sind das alljährliche Sommerfest und die traditionelle Weihnachtsfeier. Diese Veranstaltungen bringen Studierende, Mitarbeitende und Ehemalige zusammen und sind Ausdruck des starken Zusammenhalts.

Das Sommerfest markiert den feierlichen Abschluss des Sommersemesters und findet meist an einem lauen Juni- oder Juliabend statt.

Im Haselgarten beim Seminarraum versammeln sich alle zu einem entspannten Beisammensein. Bei Gegrilltem, Salaten und kühlen Getränken wird auf die Erfolge des vergangenen Semesters angestoßen.

Frisch gestärkt kann dann das Können beim Torwandschießen gezeigt werden, bei dem auch die beiden Professoren ihr Geschick unter Beweis stellen müssen.



Torwandschießen 2023



Sommerfest 2018

Das Sommerfest ist immer ein Anlass, um in ungezwungener Atmosphäre Kontakte zu knüpfen, neue Mitglieder willkommen zu heißen und sich auf die bevorstehenden Semesterferien einzustimmen.

Die Weihnachtsfeier hingegen bildet den stimmungsvollen Jahresausklang. Gespickt mit kulinarischen Feinheiten und begleitet von dem klassischen Weihnachtsgetränk, der Feuerzangenbowle, lässt man das Jahr Revue passieren.

Ein besonderes Highlight bietet dabei die Präsentation, bei der auf das vergangene Jahr zurückgeblickt wird. In einigen Jahren wird diese noch um eine Preisverleihung erweitert, bei der humoristisch die Verdienste einzelner Mitarbeitenden gewürdigt werden.

Nicht nur wissenschaftlich, auch musikalisch, finden sich immer wieder Talente unter den Mitarbeitenden. Beispielhaft sorgte unter anderem im Jahr 2014 ein gemischtes Ensemble für einen feierlichen Rahmen.



Preisverleihung 2024



Gemischtes Ensemble 2014

Beide Feste zeigen, dass unser Lehrstuhl nicht nur ein Ort des Lernens und Forschens ist, sondern auch eine lebendige Gemeinschaft, die durch gemeinsame Erlebnisse und Traditionen gestärkt wird.

## 5.5 Team Events

Neben der wissenschaftlichen Zusammenarbeit spielen auch gemeinsame Freizeitaktivitäten eine wichtige Rolle für den Zusammenhalt am Lehrstuhl. Team-Events bieten eine willkommene Gelegenheit, sich in ungezwungener Atmosphäre besser kennenzulernen und den Teamgeist zu stärken.



Fußball 2000



Fußball 2018

Eine besondere Konstante über die 50 Jahre hinweg ist das gemeinsame Fußballspielen, bei dem sich Studierende und Mitarbeitende in lockeren Matches messen. Diese sportlichen Begegnungen sind nicht nur ein großer Spaß, sondern fördern auch das Gemeinschaftsgefühl. Trotz des kühlen Augustwetters ließ sich der Lehrstuhl 2016 nicht von seinen Plänen beirren, und so ging es bei frischen 15°C dennoch auf die Wiesen in der Fränkischen Schweiz.



Teamevent 2016



Berg 2023

Zu Erlangen gehört natürlich der „Berch“. So macht sich der Lehrstuhl auch jedes Jahr aufs Neue auf diesen Gipfel der fränkischen Kulinarik zu erklimmen. Das fränkische Volksfest ist ein fester Bestandteil des Lehrstuhlkalenders und bietet Gelegenheit, bei Bier und regionalen Spezialitäten das Semester in geselliger Runde zu feiern.

## 5.6 Darmstädter Kreis und Wanderausflüge

Der Darmstädter Kreis bestand aus den Lehrstühlen

- Institut für Elektrische Energieversorgung (TU Darmstadt)
- Lehrstuhl für Elektrische Energieversorgung (FAU Erlangen-Nürnberg)
- Institut für Hochspannungs- und Anlagentechnik (TU München)
- Lehrstuhl für Energieversorgung (Universität des Saarlandes)
- Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Elektrotechnologie (Politechnikum Breslau)

und pflegte den wissenschaftliche Austausch auf dem Gebiet der elektrischen Energieversorgung. In Vorträgen von wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern wurden Ergebnisse zu laufenden Forschungsprojekten präsentiert und diskutiert. Im September 2000 fand ein Treffen des Darmstädter Kreises im Ferienhaus des Politechnikums Breslau in Karpacz (Polen) statt. Nach den interessanten Vorträgen wurden Wanderungen zur Schneekoppe unternommen.



Wanderung zur Schneekoppe, v.l.n.r.: Prof. Gretsch, Dr. Shang Li, Dr. Holger Müller, Prof. Lobos



Geselliger Abend im Ferienheim, Prof. Herold (mit Glas) und weitere Wiss. Mitarbeiter



Feierliches Abendessen, v.l.n.r.: Frau Gretsch, Prof. Gretsch, Prof. Herold



Tischrede, v.l.n.r.: Wiss. Mitarbeiter, Prof. Koglin, Prof. Lobos

## 5.7 Skiausflüge

### Eine Tradition auf Ski – Das Lehrstuhlskifahren lebt wieder!

Manche Traditionen sind zu gut, um sie in der Vergangenheit ruhen zu lassen. So auch das legendäre Lehrstuhlskifahren, das seit letztem Jahr (2024) aus seinem Dornröschenschlaf erweckt wurde. Was einst als feste Institution galt, erlebte mit neun mutigen Skifahrern seine Renaissance – und schon ein Jahr später schwingen sich stolze 13 Teilnehmer über die Pisten. Tendenz (hoffentlich) weiter steigend!

Für den vollen Dreitagesgenuss geht es am ersten Tag um 3:30 Uhr los – ein Weckruf, der echte Hingabe verlangt. Die Fraktion „zwei Tage reichen auch“ stößt dann am Freitagabend dazu, während die Dreitagesfahrer bereits angeschlagen mit dem ein oder anderen hochprozentigen Hexenschuss aus dem Hexenkessel zurückkehren.



Gruppe 2000



Gruppe 2002 in Sölden



Gruppe 2024



Gruppe 2025



Geübte Skifahrer



Gemeinsames Mittagessen

Untergebracht im gemütlichen Junser Gasthäusl, strategisch ideal zwischen Mayrhofen und dem Hintertuxer Gletscher gelegen, fühlt man sich direkt in alte Skilagerzeiten zurückversetzt – nur eben inzwischen ohne Aufsicht. Ob das gutgehen kann?

Dafür gibt es frisches Bier von Wirt Peter, deftiges Essen und für manche Kollegen auch die Erkenntnis, dass der Abend vor zwei Uhr morgens eigentlich noch gar nicht vorbei sein kann. Am nächsten Tag müssen ohnehin nur Kurven gefahren werden – was soll also schiefgehen?

Doch bevor es abends erneut zurück ins Gasthäusl geht, wird diesmal der Après-Ski-Tempel Tenne gründlichst auf die Belastbarkeit getestet. Hier treffen sich dann absolute Anfänger, die sich noch mit der ersten Schneeflugfahrt abmühen, mit Off-Pisten-Profis, die sich jenseits der markierten Pisten austoben. Jede Könnensstufe ist vertreten – und spätestens am Tresen sind alle auf Augenhöhe.



*Gesellige Runden auf der Piste*



*Gesellige Runden abseits der Piste*

Und damit dieses Highlight nicht wieder in Vergessenheit gerät, steht eines fest: Das Lehrstuhlskifahren ist zurück! Fix terminiert auf das letzte Januar- bzw. erste Februarwochenende, für alle aktuellen Kollegen und jene, die sich seit dem Wiederaufleben als treue Teilnehmer verdient gemacht haben. Somit dürfen sich alle auf viele weitere Jahre voller Pistengaudi, Après-Ski-Eskapaden und kulinarischer Hochgenüsse freuen. Prost – und Ski heil!

## 6 Geschichte und Meilensteine des Lehrstuhls

### 6.1 Chronologie

#### 8. April 1975

- Neueinrichtung des Lehrstuhls für Elektrische Energietechnik als siebter Lehrstuhl der Elektrotechnik an der FAU
- Berufung von Dr.-Ing. Gerhard Hosemann zum C4-Professor und Lehrstuhlinhaber
- Unterbringung des Lehrstuhls in der Egerlandstraße 9 auf einer Fläche von 322 m<sup>2</sup>
- Umzug in neue Räume mit Laboreinrichtungen und Versuchshalle erst ab 1990 möglich

#### Sommer 1975

- Einrichtung der Mechanikwerkstatt und des Zeichenbüros

#### Bis April 1976

- Besetzung der sechs zugewiesenen Stellen für wissenschaftliche Assistenten auf Zeit

#### 1977

- Bezug des Kopfteils im Gebäude Egerlandstraße 11 (176 m<sup>2</sup>)
- Einstellung von Dr.-Ing. Ralf Gretsch
- Besetzung der Stelle des Akademischen Rats auf Lebenszeit durch Dr.-Ing. Karl-Fritz Eichhorn

#### 1978

- Habilitation von Dr.-Ing. Ralf Gretsch und Ernennung zum Privatdozenten
- Bezug des westlichen Teils im Gebäude Egerlandstraße 11 (164 m<sup>2</sup>)
- Einrichtung der Elektrowerkstatt
- Inbetriebnahme des Drehstrommodells für Kraftwerks- und Netztechnik
- Das Kultusministerium stimmt am 01.02.1978 dem von Prof. Dr. Gerhard Hosemann gestellten Antrag, auf eine den Aufgaben des Lehrstuhls angemessene Bezeichnung, zu. Der Lehrstuhl Elektrische Energietechnik heißt nun „Elektrische Energieversorgung“

#### 1979

- Aufbau eines Versuchsstandes für Oberschwingungsmessungen
- Erste Promotion am Lehrstuhl

## 1981

- Berufung von Privatdozent Dr.-Ing. habil. Ralf Gretsch zum C3-Professor und Ernennung zum Extraordinarius
- Einrichtung des Labors für Niederspannungs-Isoliertechnik im Hörsaalgebäude, Erwin-Rommel-Straße 60

## 1982

- Aufbau eines Versuchsstandes für die Kurzzeiterwärmung von Leitungsseilen und Kurzschlusskräften von Bündelleitern (Kurzschlussströme bis 11 kA)

## 1983

- Umwandlung einer Assistentenstelle auf Zeit in eine Lebenszeitstelle und Besetzung mit Dr.-Ing. Wolfgang Meyer

## 1985

- Einrichtung eines Labors zur Untersuchung der Strombelastbarkeit von Kabelanlagen (bis 2 kA) und Erweiterung zur Messung der Kurzschlussenergieerwärmung
- Grundsteinlegung für das Gebäude „Verfahrenstechnik“, Cauerstraße 4, durch den Bayerischen Ministerpräsidenten Dr. Franz-Josef Strauß

## April/Mai 1990

- Umzug von Egerlandstraße 9/11 in das Gebäude „Verfahrenstechnik“, Cauerstraße 4, Haus 1
- Umzug des Drehstrommodells in das Hörsaalgebäude, Erwin-Rommel-Straße 60

## 30. September 1990

- Emeritierung von Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Gerhard Hosemann und kommissarische Leitung bis zur Ernennung eines Nachfolgers

## 1991

- Übergabe der Hochspannungseinrichtung und Hochstromanlage in der Versuchshalle an den Lehrstuhl

## 1992

- Berufung von Akad. Dir. Dr. Karl-Fritz Eichhorn zum Professor für Energieversorgung an die Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig (FH)
- Besetzung der freigewordenen Lebenszeitstelle mit Dr.-Ing. Werner Heinrich

## 16. Januar 1993

- Berufung von Dr.-Ing. habil. Gerhard Herold zum C4-Professor und Ernennung zum Lehrstuhlinhaber

## 1996 bis 1997

- Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Herold – Geschäftsführender Vorstand des Instituts für Elektrotechnik und Sprecher der Studienkommission Elektrotechnik und Mitglied des Senats der Universität

## 14. November 1996 bis 30. September 1998

- Amtszeit von Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Herold als Prodekan der Technischen Fakultät

## 1. Oktober 1997 bis 30. September 1999

- Amtszeit von Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Herold als Dekan der Technischen Fakultät

## 1. Oktober 1999 bis 30. September 2000

- Amtszeit von Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Herold als Prodekan der Technischen Fakultät

## 1. Januar 2004

- Pensionierung von Prof. Dr.-Ing. habil. Ralf Gretsch
- Berufung von Dr.-Ing. Johann Jäger zum C3-Professor und Ernennung zum Extraordinarius

## 22. April 2005

- Antrittsvorlesung von Prof. Dr.-Ing. Johann Jäger zum Thema „Perspektiven moderner Schutztechnik in der elektrische Energieversorgung“

## 1. April 2011

- Neugründung des Lehrstuhls für Elektrische Energiesysteme an der FAU Erlangen-Nürnberg am Röthelheim-Campus, Konrad-Zuse-Str. 3-5, Erlangen
- Berufung von Dr.-Ing. Matthias Luther zum W3-Professor und Ernennung zum Lehrstuhlinhaber

## 15. Juli 2011

- Antrittsvorlesung von Prof. Dr.-Ing. Matthias Luther zum Thema „Stromnetze im Wandel - Herausforderungen und Innovationen für eine nachhaltige Energieversorgung“

## 1. März 2012

- Der Energie Campus Nürnberg (EnCN) wird auf dem ehemaligen AEG-Gelände in Nürnberg gegründet. Es ist ein interdisziplinäres Energieforschungszentrum, das neue Technologien für ein regeneratives Energiesystem entwickelt
- Der Lehrstuhl richtet am EnCN Büros und Labore ein.

## 1. Oktober 2012

- Zusammenlegung der Lehrstühle Elektrische Energiesysteme und Elektrische Energieversorgung am Standort Südgelände, Cauerstr. 4, Erlangen

## 31. Oktober 2012

- Pensionierung von Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Herold

## 13. Mai 2013

- Übergabe des Analog-Digital-Simulators und eines Gasturbinenmodells durch Siemens Energy

## 2013

- Umzug des Kraftwerks- und Netzmodells vom Hörsaalgebäude in die Cauerstr. 4. Die Inbetriebnahme verläuft erfolgreich.

## 20. Mai 2015

- Eröffnung des Standorts des Lehrstuhls „Auf AEG“ in Nürnberg (Fürther Str. 248, Gebäude 33)
- 450 m<sup>2</sup> neue Räumlichkeiten und Labore werden eingeweiht.

## 2015

- Dienstzeitbeginn von Dr.-Ing. Dieter Braisch am 1. August als Akademischer Rat
- Berufung von Dr.-Ing. habil. Christian Weindl zum Professor auf dem Fachgebiet Elektrische Netze und Speicherintegration an die Hochschule Coburg.
- Inbetriebnahme des Analog-Hybrid-Simulators (AHS) am Standort Erlangen

## 2016

- Versetzung in den Ruhestand von Dr.-Ing. Wolfgang Meyer
- Dienstzeitbeginn von Dr.-Ing. Gert Mehlmann am 1. April als Akademischer Rat

## 16. Februar 2016

- Auflösung des Standorts Röthelheim-Campus und Umzug in die Cauerstraße

## 2017

- 06. Oktober Inbetriebnahme des Speicherlabors „ENGiNe“ am Standort „Auf AEG“

## 2018

- Inbetriebnahme der Photovoltaikanlage (17 kWp) am Standort „Auf AEG“, welches das Labor-Mikronetz speist

## 2019

- Inbetriebnahme des Echtzeitlabors am Standort „Auf AEG“ und Kopplung mit dem Speicherlabor

## 2022

- Bewilligung des DFG-Großgeräte-Antrag zur Modernisierung und Erweiterung Hochspannungshalle
- 01. Dezember Übergabe eines Niederspannungsreglers als Labor-Demonstrator durch die Firma A. Eberle GmbH & Co. KG

## 1. Oktober 2023

- Ernennung von Prof. Dr.-Ing. Matthias Luther zum Sprecher des Departments (EEI)

## 2025

- Rückbau des Analog-Hybrid-Simulators (AHS) und Eröffnung der neuen Netzleitwarte

## 6.2 Entwicklung der studentischen Arbeiten

Abb. 42 zeigt die Anzahl der Studien- und Diplomarbeiten seit der Gründung des Lehrstuhls im Jahre 1975.

Mit der Umsetzung des Bologna-Prozesses wurden dann Bachelor- und Masterarbeiten angefertigt.

Bis zum Jahr 2024 haben 1626 Studierende (Summe aus Diplom- und Masterarbeiten) ihr Studium am Lehrstuhl abgeschlossen.

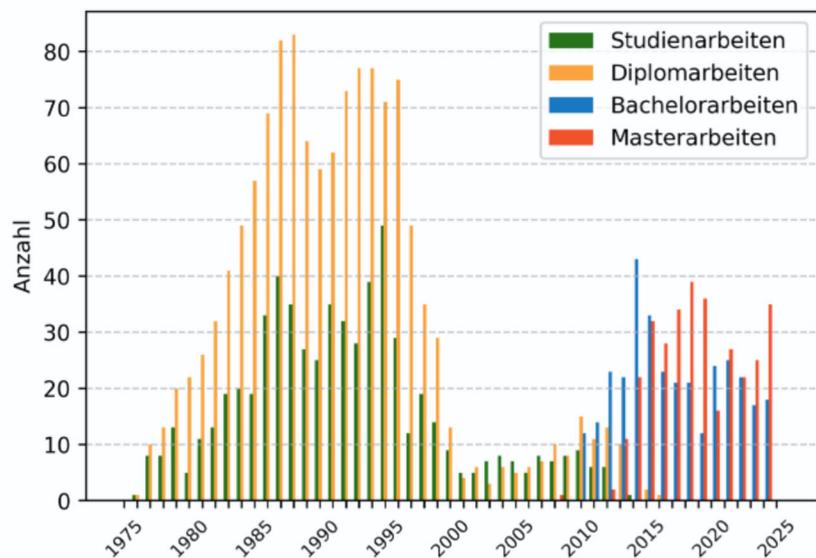


Abb. 42: Entwicklung der studentischen Arbeiten seit Gründung des Lehrstuhls

## 6.3 Promotionen und Habilitationen

Abb. 43 zeigt die Anzahl der Promotionen und Habilitationen seit der Gründung des Lehrstuhls im Jahre 1975.

Bis zum Jahr 2024 wurden 78 wissenschaftliche Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter am Lehrstuhl promoviert und 3 habilitiert.

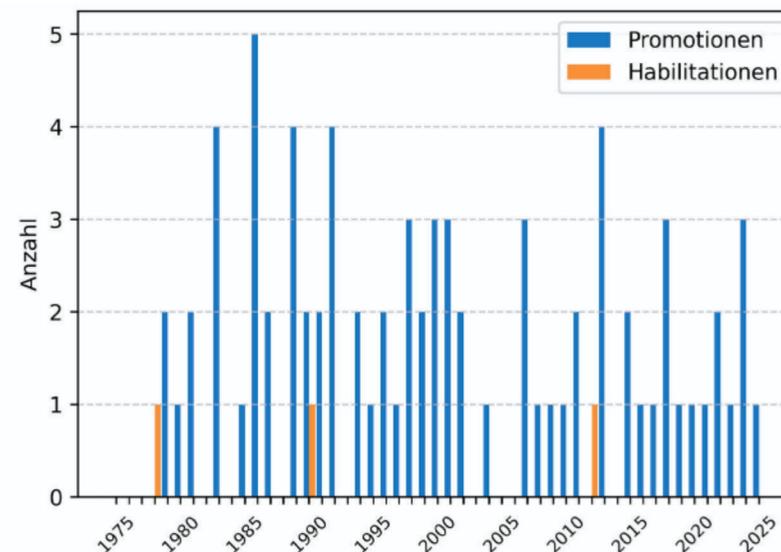


Abb. 43: Promotionen und Habilitationen seit Gründung des Lehrstuhls

### Habilitationsschriften:

[1] Ralf Gretsch: Ein Beitrag zur Gestaltung der elektrischen Anlagen in Kraftfahrzeugen, 1978

[2] Klaus Stimper: Grundlagen für eine beanspruchungsgerechte Koordination der Isolierungen bei Niederspannung, 1990

[3] Christian Weindl: Verfahren zur Bestimmung des Alterungsverhaltens und zur Diagnose von Betriebsmitteln der elektrischen Energieversorgung, 2012

<b>Name</b>	<b>Titel</b>	<b>Berichter</b>	
Tunçay Caylı	Verbesserte Einstellung der Distanzschutz-Relais in vermaschten Netzen	Prof. Dr.-Ing. G. Hosemann, Prof. Dr.-Ing. G. Pfaff	30. Oktober 1979
Bardolf Engel	Berechnung der Kurzschlußstrombeanspruchung in Starkstromanlagen mit ungebündelten Leiterseilen	Prof. Dr.-Ing. G. Hosemann, Prof. Dr.-Ing. G. Pfaff	12. November 1979
Hartmut Peters	Eine Methode zur Erfassung der Umweltwirksamkeiten und der Zuverlässigkeit im Rahmen einer Gesamtbeurteilung von Energieversorgungsnetzen	Prof. Dr.-Ing. G. Hosemann, Prof. Dr.-Ing. G. Pfaff	04. Juli 1980
Klaus Stimper	Thermische Beanspruchung verschmutzter Isolatoroberflächen	Prof. Dr.-Ing. G. Hosemann, Prof. Dr.-Ing. G. Pfaff	03. Juli 1981
Rudolf Temesl	Technische, wirtschaftliche und rechtliche Einflüsse auf die Planung und Genehmigung elektrischer Hochspannungsfreileitungen außerhalb der Verdichtungsräume	Prof. Dr.-Ing. G. Hosemann, Prof. Dr.-Ing. W. Boeck (TU München), Prof. Dr. Soell (Universität Regensburg)	13. Juli 1981
Wolfgang Meyer	Eine Methode zur Berechnung von Strömen und Kräften in gekapselten Betriebsmitteln	Prof. Dr.-Ing. G. Hosemann, Prof. Dr.-Ing. R. Unbehauen	28. April 1983
Dirk Rittinghaus	Über den Einfluß der im Netzbetrieb veränderlichen Größen auf die Kurzschlußstromstärke	Prof. Dr.-Ing. G. Hosemann, Prof. Dr.-Ing. G. Pfaff	24. Juli 1983
Dietmar Retzmann	Digitaler Echtzeitwandler für Raumzeigerkomponenten zur Analyse von Drehstromgrößen, vorzugsweise der Spannungsgegenkomponenten	Prof. Dr.-Ing. G. Hosemann, Prof. Dr.-Ing. G. Pfaff	28. Juli 1983
Gerhard Krost	Frequenzabhängige Impedanzen von Verbrauchern, Nieder- und Mittelspannungsnetzen	Prof. Dr.-Ing. habil. R. Gretsche, Prof. Dr.-Ing. G. Pfaff	25. Oktober 1983
Martin Waeber	Dynamische Vorgänge bei der mechanischen und thermischen Kurzschlußbeanspruchung von Starkstromanlagen mit Leitungseilen	Prof. Dr.-Ing. G. Hosemann, Prof. Dr.-Ing. G. Pfaff;	17. Mai 1985
Antonio Jorge Viegas de Vasconcelos	Berechnung nichtstationärer Vorgänge in Drehstromnetzen mit Raumzeigerkomponenten auf einem Multiprozessor	Prof. Dr.-Ing. G. Hosemann, Prof. Dr. rer. nat. W. Händler	19. Juli 1985
Reiner Kolb	Neue Möglichkeiten für digitale Distanzschutz-Einrichtungen, insbesondere in Reservestufen	Prof. Dr.-Ing. G. Hosemann, Prof. Dr.-Ing. G. Pfaff	15. Januar 1986
Werner Ocker	Thermische Beanspruchung verschmutzter Isolatoroberflächen durch Gasentladung bei Niederspannung	Prof. Dr.-Ing. G. Hosemann, Prof. Dr.-Ing. G. Pfaff	20. Februar 1986
Ying-duo Han	Berechnung der Wirkleistungs-Frequenz-Ausgleichsvorgänge in ausgedehnten Netzen mit Hilfe inhomogener Ersatzleitungen	Prof. Dr.-Ing. G. Hosemann, Prof. Dr.-Ing. E. Handschin (TU Dortmund)	27. März 1986

<b>Name</b>	<b>Titel</b>	<b>Berichter</b>	
Wilhelm Schubert	Therapeutische und funktionale Elektrostimulation schlaffer Lähmungen. Anwendung, Geräte- und Sicherheitstechnik	Prof. Dr.-Ing. G. Hosemann, Prof. Dr.-Ing. Dr. med. habil. M. Spreng	21. April 1986
Werner Kühnel	Der Schwingkreiswechselrichter mit Gegenspannungslast zur Versorgung von Verbrauchern mit gepulstem Gleichstrom	Prof. Dr.-Ing. G. Hosemann, Prof. Dr.-Ing. G. Pfaff	09. Juli 1986
Volker Eckhardt	Drehfeldgerechte Messung der Momentanfrequenz in mehrphasigen Energieversorgungsnetzen	Prof. Dr.-Ing. G. Hosemann, Prof. Dr.-Ing. H. W. Schüßler	30. Juni 1987
Wolfgang Rüger	Einleiterkabel bei hohen Betriebs- und höchsten Kurzschlußströmen	Prof. Dr.-Ing. G. Hosemann, Prof. Dr.-Ing. G. Pfaff	11. Dezember 1987
Günter Kießling	Die mechanische Kurzschlußbeanspruchung von Seilanlagen - Analytische und numerische Berechnungsverfahren	Prof. Dr.-Ing. G. Hosemann, Prof. Dr.-Ing. G. Pfaff	09. Januar 1989
Christoph Sachsenweger	Klassifizierung und Simulation der für Niederspannungsisolierungen maßgebenden Umgebungseinflüsse	Prof. Dr.-Ing. G. Hosemann, Prof. Dr.-Ing. O. Molerus	02. März 1989
Egid Schneider	Drehfeldorientierte digitale Zündsteuerverfahren für den Wechselrichtbetrieb einer Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung	Prof. Dr.-Ing. G. Hosemann, Prof. Dr.-Ing. G. Pfaff	29. Mai 1989
Thomas Stiller	Ein Beitrag zur Bestimmung der Oberschwingungen in elektrischen Nieder- und Mittelspannungsnetzen	Prof. Dr.-Ing. R. Gretsche, Prof. Dr.-Ing. H. W. Schüßler	02. Juni 1989
Werner Heinrich	Digitale Analyse der Außenleiterströme zur sensorlosen Ermittlung von Kurzschlußläuferfehlern an Asynchronmaschinen im Betrieb	Prof. Dr.-Ing. G. Hosemann, Prof. Dr.-Ing. G. Pfaff	31. Juli 1989
Gerhard Dinkel	Schneller Kompensator für Blindleistungen, Oberschwingungen und Unsymmetrie	Prof. Dr.-Ing. R. Gretsche, Prof. Dr.-Ing. W. Bär	19. September 1989
Rainer Krebs	Analysis der Anisotropien dreiphasiger Betriebsmittel	Prof. Dr.-Ing. G. Hosemann, Prof. Dr.-Ing. G. Pfaff	02. März 1990
Gerhard Schmidt	Aufbau, Funktion und Betriebsweise eines Batterie-Netzstützpunktes	Prof. Dr.-Ing. R. Gretsche, Prof. Dr.-Ing. G. Pfaff	27. April 1990
Christoph Nietsch	Ermittlung des Kurzschlußstromverlaufs in Gleichstromanlagen	Prof. Dr.-Ing. G. Hosemann, Prof. Dr.-Ing. D. Tsanakas (Universität Patras)	30. November 1990
Hubert Steigerwald	Digitaler modaler Differentialschutz mit Sättigungserkennung für Sammelschienen	Prof. Dr.-Ing. G. Hosemann, Prof. Dr.-Ing. G. Pfaff	06. Februar 1991

<b>Name</b>	<b>Titel</b>	<b>Berichter</b>	
Washington Humberto Peralta	Aufwandminimale dynamische Netzberechnung beim Vielmaschinenproblem	Prof. Dr.-Ing. G. Hosemann, Prof. Dr.-Ing. G. Pfaff	10. Juni 1991
Erhard Walter	Ein Verfahren zur synchronisierten dynamischen Messung der Spannungsmittelkomponente in ausgedehnten Netzen	Prof. Dr.-Ing. G. Hosemann, Dr.-Ing. habil. P. Steffen	21. Mai 1992
Stefan Schwetz	Beanspruchung und Bemessung ebener Kriechstrecken bei Niederspannung	Prof. Dr.-Ing. G. Hosemann, Prof. Dr.-Ing. A. Winnacker	21. Mai 1992
Norbert Vierheilig	Das Temperaturfeld von Mehrleiterkabeln bei Kurzschluß und im Dauerbetrieb	Prof. Dr.-Ing. G. Hosemann, Prof. Dr.-Ing. G. Pfaff	05. Oktober 1992
Bernhard Arndt	Überlegungen zur Schutz- und Leittechnik in Niederspannungsnetzen	Prof. Dr.-Ing. G. Hosemann, Prof. Dr.-Ing. S. Altmann (TH Leipzig)	29. Oktober 1992
Elmar Zeitler	Berechnung der Seilbewegungen und Kräfte bei vorwiegend vertikalen Verbindungen in Schaltanlagen	Prof. Dr.-Ing. G. Hosemann, Prof. Dr.-Ing. G. Pfaff	21. Juni 1994
Peter Richter	Digitale Strom- und Spannungsmeßeinrichtung mit großer Bandbreite auf Hochspannungspotential	Prof. Dr.-Ing. G. Herold, Prof. Dr.-Ing. G. Pfaff	28. Juli 1994
Uwe Linnert	Berechnung von Ausgleichsvorgängen in Elektroenergiesystemen unter Verwendung größtmöglicher Schrittweiten	Prof. Dr.-Ing. G. Hosemann, Prof. Dr.-Ing. B.R. Oswald (Universität Hannover)	09. Mai 1995
Johann Jäger	Stromrichter gesteuerter Schrägtransformator zur dynamischen Leistungsflußregelung in Hochspannungsnetzen	Prof. Dr.-Ing. G. Herold, Prof. Dr.-Ing. D. Povh (Siemens AG, Erlangen)	11. Oktober 1996
Christof Pastors	Kontrolliertes Schalten mit Hochspannungs-Leistungsschaltern	Prof. Dr.-Ing. G. Herold, Priv. Doz. Dr.-Ing. P. Steffen	05. November 1996
Norbert Graß	Fuzzy-Logik gesteuerter Spannungszwischenkreis-Umrichter für Elektrofilter	Prof. Dr.-Ing. R. Gretsche, Prof. Dr.-Ing. G. Pfaff	31. Oktober 1997
Martin Konermann	Bewertung von Energieversorgungsunternehmen in Reformländern	Prof. Dr.-Ing. G. Herold, Prof. Dr.-rer. pol. P. Mertens	07. Januar 1998
Martin Neubauer	Seitenregler mit Batteriespeicher für schwache Niederspannungsnetze	Prof. Dr.-Ing. R. Gretsche, Prof. Dr. sc. techn. J. Weiler (ETH Zürich)	12. Februar 1998
Matthias Laukner	Berechnung ebener Leiteranordnungen beliebiger Querschnittsform unter Berücksichtigung von Stromverdrängung und Magnetisierung	Prof. Dr.-Ing. G. Herold, Prof. Dr.-Ing. K. Feser (Universität Stuttgart)	25. Mai 1998
Michael Kunz	Berechnung der Kurzschlußströme in Gleichstrom- und Steuerspannungsnetzen	Prof. Dr.-Ing. G. Herold, Prof. Dr.-Ing. G. Pfaff	25. März 1999

<b>Name</b>	<b>Titel</b>	<b>Berichter</b>	
Martin Schneider	Stationäre Optimierung elektrischer Energieversorgungsnetze im Zustandsraum	Prof. Dr.-Ing. G. Herold, Prof. Dr.-Ing. B.R. Oswald (Universität Hannover)	17. Juni 1999
Christian Weindl	Beschreibung und Berechnung von Drehstromsystemen mit leistungselektronischen Anlagen im Zustandsraum	Prof. Dr.-Ing. G. Herold, Prof. Dr.-Ing. M. Grötzbach (Universität der Bundeswehr München)	03. April 2000
Michael Schuster	Vergleichsschutz auf Leistungsbasis	Prof. Dr.-Ing. G. Herold, Prof. Dr.-Ing. F. Noack (TU Ilmenau)	26. Juni 2000
Joachim Schneider	Zentrale Oberschwingungskompensation in elektrischen Energieversorgungsnetzen	Prof. Dr.-Ing. R. Gretsche, Prof. Dr.-Ing. G. Brauner (TU Wien)	27. Oktober 2000
Claus Hofmann	Numerische Feldberechnung für energietechnische Anwendungen von Hochtemperatur-Supraleitern	Prof. Dr.-Ing. G. Herold, Prof. Dr. rer. nat. P. Müller	19. Februar 2001
Bernhard Strobl	Symmetrische Raumzeiger-Komponenten zur Beschreibung und Analyse unsymmetrischer Stromrichter-Schaltungen	Prof. Dr.-Ing. G. Herold, Prof. Dr.-Ing. G. Pfaff	08. Mai 2001
Helmuth Hitzeroth	Influence of FACTS Devices on Voltage Stability of Power Systems and Wheeling Transactions	Prof. Dr.-Ing. G. Herold, Prof. Dr.-Ing. G. Brauner (TU Wien)	30. Mai 2001
Shang Li	Wavelet Transform Applications in Power Systems	Prof. Dr.-Ing. G. Herold, Prof. Dr.-Ing. J. Stenzel (TU Darmstadt)	18. Juni 2002
Bin Wu	Raumzeiger-Modell von Drehstromsystemen mit Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung oder universalem Lastflußregler	Prof. Dr.-Ing. G. Herold, Prof. Dr.-Ing. B.R. Oswald (Universität Hannover)	25. September 2002
Wolfgang Gawlik	Gegenseitige Beeinflussung zentraler Oberschwingungskompensatoren	Prof. Dr.-Ing. R. Gretsche, Prof. Dr.-Ing. G. Brauner (TU Wien)	01. Juli 2004
Jamal Al-Nasseir	Theoretical and Experimental Investigations on Snubber Circuits for High Voltage Valves of FACTS-Equipment for Overvoltage Protection	Prof. Dr.-Ing. G. Herold, Prof. Dr.-Ing. J. Petzoldt (TU Ilmenau)	23. März 2007
Günter Ebner	Thyristorgesteuerter Zwischenphasenregler zur Optimierung des stationären und dynamischen Betriebes elektrischer Energieversorgungsnetze	Prof. Dr.-Ing. G. Herold, Prof. Dr.-Ing. B.R. Oswald (Universität Hannover)	10. Oktober 2007
Hubert Rubenbauer	Dynamische Kurzschlußstrombegrenzung auf Basis eines sechspulsigen Thyristorgleichrichters	Prof. Dr.-Ing. G. Herold, Prof. Dr.-Ing. G. Pfeiffer (Universität Cottbus)	11. Oktober 2007

<b>Name</b>	<b>Titel</b>	<b>Berichter</b>	
Roland Bauer	Zustandsraummodelle von FACTS in Elektroenergiesystemen	Prof. Dr.-Ing. G. Herold, Prof. Dr.-Ing. B. Piepenbreier	03. Juli 2008
Andreja Rašić	Performance Analysis of the Voltage Source Converter based Back-to-back Systems in Medium Voltage Networks	Prof. Dr.-Ing. G. Herold, Prof. Dr.-Ing. A. Steimel (Ruhr-Universität Bochum)	17. Juli 2009
Dieter Braisch	Berechnung der Erwärmung ebener Leiteranordnungen bei Stromverdrängung und Magnetisierung	Prof. Dr.-Ing. G. Herold, Prof. Dr.-Ing. St. Großmann (TU Dresden)	20. Juli 2010
Timo Keil	Schutzsysteme für elektrische Energieversorgungsnetze mit dezentralen Stromerzeugungsanlagen	Prof. Dr.-Ing. J. Jäger, Prof. Dr.-Ing. J. Schmid (Universität Kassel)	04. Februar 2011
Etienne Tschonla	SOFC-Brennstoffzellen-Kraftwerke für die dezentrale elektrische Energieversorgung	Prof. Dr. -Ing. Gehard Herold, Prof. Dr.-Ing. Bernhard Piepenbreier	19. Dezember 2011
Ivana Mladenovic	Determination of the Remaining Lifetime of Paper Insulated Lead Covered Cables based on the Diagnostics of Partial Discharges and the Dissipation Factor	Prof. Dr. -Ing. habil. Gehard Herold, Prof. S. Rowland, PhD	21. März 2013
Gert Mehlmann	Grundfrequenzmodulation und Spannungsqualität mehrstufiger Spannungsumrichter	Prof. Dr.-Ing. G. Herold, Prof. Dr.-Ing. J. Petzold (TU Ilmenau)	13. Mai 2013
Manuel Weiland	Ein Beitrag zur Berechnung des unsymmetrischen und transienten Betriebes netzgeführter Stromrichter	Prof. Dr.-Ing. G. Herold, Prof. Dr.-Ing. B. Piepenbreier	18. Juli 2013
Christian Freitag	Entwicklung und Untersuchung messtechnischer Verfahren zur Bestimmung des Zustands von Betriebsmitteln der elektrischen Energieversorgung	Prof. Dr.-Ing. G. Herold	07. November 2013
Simon König	Ein Beitrag zur Berechnung selbstgeführter mehrstufiger und höherpulsiger Stromrichter mit Stromzwischenkreis	Prof. Dr.-Ing. G. Herold, Prof. Dr.-Ing. J. Petzold (TU Ilmenau)	19. Juni 2015
Rafal Lubiowski	Leistungsdifferentialschutz für netzgeführte Stromrichter	Prof. Dr.-Ing. G. Herold, Prof. Dr.-Ing. Z. A. Styczynski (Universität Magdeburg)	23. Juli 2015
Jochen Fuchs	Koordination von Schutzsystemen für multivariate Netzzustände mit Hilfe von mathematischer Optimierung	Prof. Dr.-Ing. J. Jäger, Prof. Dr.-Ing. C. Rehtanz (TU Dortmund)	11. November 2016
Christian Romeis	Dynamische Schutzsicherheit unter Berücksichtigung elektromechanischer Ausgleichsvorgänge in Hochspannungsnetzen	Prof. Dr.-Ing. J. Jäger, Prof. Dr.-Ing. R. Krebs (Universität Magdeburg)	17. März 2017

<b>Name</b>	<b>Titel</b>	<b>Berichter</b>	
Markus Schröder	Multidirektionale Energieflusssteuerung eines Modulare Multilevel-Umrichters mit integrierten Batteriespeichern in elektrischen Netzen	Prof. Dr.-Ing. J. Jäger, Prof. Dr.-Ing. W. Gawlik (TU Wien)	09. März 2018
Christoph Hahn	Modellierung und Regelung selbstgeführter, höherstufiger Multiterminal-HGÜ-Systeme mit Gleichspannungszwischenkreis	Prof. Dr.-Ing. Matthias Luther, Prof. Dr.-Ing. Dirk Westermann (TU Ilmenau)	16. März 2018
Anatoli Semerow	Ein Beitrag zur Beschreibung elektromechanischer Ausgleichsvorgänge in elektrischen Energiesystemen und Ursachenidentifikation mittels Weitbereichsmessungen	Prof. Dr.-Ing. Matthias Luther, Prof. Dr.-Ing. habil. Lutz Hofmann (Universität Hannover)	27. Juli 2018
Stefan Henninger	Netzdienliche Integration regenerativer Energiequellen über stromrichtergekoppelte Einspeisenetze mit integrierten Energiespeichern	Prof. Dr.-Ing. J. Jäger, Prof. Dr.-Ing. W. Gawlik (TU Wien)	23. Mai 2019
Martin Biller	Schutzalgorithmen für dynamisch vermaschte Ringnetzstrukturen mit dezentraler Einspeisung	Prof. Dr.-Ing. J. Jäger, Prof. Dr.-Ing. M. Zdrallek (Universität Wuppertal)	28. September 2020
Robert Dimitrovski	Modular Framework for Eigenvalue Analysis of Subsynchronous Interactions in AC/DC Networks	Prof. Dr.-Ing. Matthias Luther, Prof. Dr.-Ing. Thomas Dürbaum	05. März 2021
Kishan Veerashekar	Bewertung der transienten Stabilität von vernetzten autonomen hybriden Mikronetzen	Prof. Dr.-Ing. Matthias Luther, Prof. Dr.-Ing. Thomas Dürbaum	03. Juni 2022
Michael Jaworski	Schutztechnische Verfahren zur Erhöhung der Systemsicherheit beim Netzwiederaufbau	Prof. Dr.-Ing. J. Jäger, Prof. Dr.-Ing. J. Hanson (TU Darmstadt)	30. September 2022
Janick Meyer	Protection Concept Optimization Regarding Dynamic Security and Dependability in Multivariate Power Systems	Prof. Dr.-Ing. J. Jäger, Prof. Dr.-Ing. C. Rehtanz (TU Dortmund)	06. Oktober 2023
Florian Mahr	Control and Protection of 100% Inverter-based Power Systems	Prof. Dr.-Ing. J. Jäger, Prof. Dr.-Ing. L. Fickert (TU Graz)	26. April 2024
Christian Scheibe	Co-Simulation elektrischer Energiesysteme mit kommerziellen Programmsystemen: Architektur, Methodik und Anwendungen	Prof. Dr.-Ing. Matthias Luther, Prof. Dr.-Ing. Thomas Dürbaum	26. Juni 2024
Johannis Porst	Betriebskonzepte für Batteriespeichersysteme in hochausgelasteten Übertragungsnetzen	Prof. Dr.-Ing. Matthias Luther, Prof. Dr.-Ing. Jutta Hanson (TU Darmstadt)	27. November 2024
Anaya Kuri	A Grid-Forming Control Concept from Power System Perspective	Prof. Dr.-Ing. Matthias Luther, Prof. Dr.-Ing. Dirk Westermann (TU Ilmenau)	07. Februar 2025

## 6.4 Gremien- und Verbandsarbeit

### Gremien FAU

Gremium (intern)	Funktion	Person
StuKo EEI	Vertreter der WMA	Braisch
StuKo EEI	Mitglied	Luther
Zugangskommission Master EEI	Leitung	Luther
Zugangskommission Master EEI	Vertreter der WMA	Riebesel
StuKo ET	Vertreter der WMA	Mehlmann
StuKo ET	Leitung	Jäger
Zugangskommission Master ET	Leitung	Jäger
Zugangskommission Master ET	Vertreter der WMA	Mehlmann
Wissenschaftliche Leitung des EnCN (ruht derzeit)	Leitung des Forschungsbereichs Elektrische Netze	Luther
Erweiterte wissenschaftliche Leitung des EnCN (ruht derzeit)	Stellvertretende Leitung des Forschungsbereichs Elektrische Netze	Mehlmann
Technische Fakultät (TechFak)	Prodekan, Mitglied des Fakultätsvorstands, Mitglied des Fakultätsrats	Luther
Technische Fakultät (TechFak)	Mitglied der Kollegialen Leitung der Zentralwerkstatt	Luther
Department EEI	Mitglied der Kollegialen Leitung, Departmentsprecher 2023 - 2025	Luther
Prüfungsausschuss (TechFak)	Vertretung EEI	Jäger

### Nationale und Internationale Gremien und Verbände

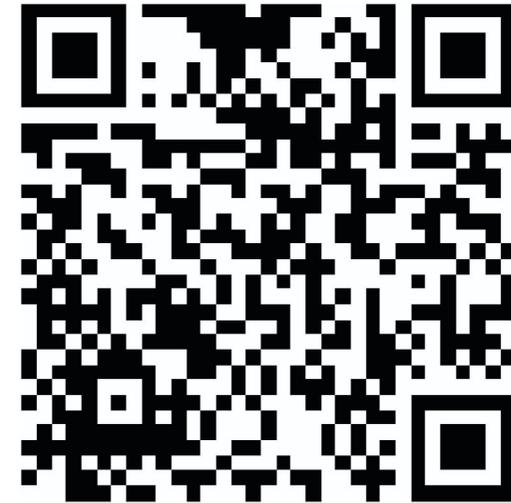
Gremium	Funktion	Person
CIGRE	WG A3.13 Changing network conditions and system requirements	Jäger
CIGRE	WG A3.16 Impacts of Fault Current Limiting Devices on Protection System	Jäger
CIGRE	WG A3.22 Technical Requirements for Substation Equipment exceeding 800 kV AC	Jäger
IEEE PES Chapter Germany	Mitglied des Vorstands	Luther
CIGRE	Mitglied des Deutschen Komitees	Luther
VDE FNN	Vertreter in der Mitgliederversammlung, Mitglied des Lenkungskreis Systemfragen und Netzcodes (SyNe)	Luther
VDE/ETG	Mitglied im Fachbereich V2 „Übertragung und Verteilung elektrischer Energie“	Luther
VDE/ETG	Mitglied im Fachausschuss „Netzregelung und Systemführung“	Luther
VDE Bayern	Vertrauensdozent	Luther
VDE Bayern	Energiesysteme der Zukunft	Jäger, WMA
BMWK	Roadmap Systemstabilität	Raab, Mehlmann
VDE/ETG	Arbeitsgruppe: Digitale Zwillinge in elektrischen Energiesystemen	Wagner, Mehlmann
VDE/ETG	Taskforce- KI in der Netzleittechnik	Kordowich, Conrad

Gremium	Funktion	Person
CIGRE	C4.64: Application of Real-Time Digital Simulation in Power Systems	Mehlmann
DKE	DKE UK471, IEC TC38- Normung Strom- und Spannungswandler	Braisch
DKE	DKE UK121.2 - Normung Mechanische und thermische Kurzschlussfestigkeit	Braisch
CIGRE	WG B5.43 Coordination of protection and automation for future networks	Jäger
CIGRE	WG B5.47 Network protection performance audits	Jäger

## 7 Literatur

### 7.1 Vorträge und Publikationen

Alle unsere Veröffentlichungen werden im CRIS-System der FAU erfasst und sind dort aktuell abrufbar. Daher verzichten wir an dieser Stelle auf eine separate Auflistung und verweisen auf unsere Website:



[www.ees.tf.fau.de/forschung/vortraegeundpublikationen/](http://www.ees.tf.fau.de/forschung/vortraegeundpublikationen/)

## 7.2 Lehrbücher des Lehrstuhl

Autoren	Titel	Verlag	Anmerkungen
Hosemann, G.; Boeck, W.	Grundlagen der elektrischen Energietechnik	Springer-Verlag 1991, Berlin	Erste Auflage 1979; zweite, verbesserte Auflage 1983; dritte Auflage 1988; vierte, überarbeitete Auflage 1991
Hosemann, G. (Hrsg.)	Elektrische Energietechnik 3: Netze (Hütte-Taschenbücher der Technik)	Springer-Verlag Berlin, Heidelberg New York 1988	
Müller, L.	Handbuch der Elektrizitätswirtschaft – Technische, wirtschaftliche und rechtliche Grundlagen, 2. Auflage	Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York	Erste Auflage 1998; zweite Auflage 2001
Herold, G.	Elektrische Energieversorgung I – Drehstromsysteme, Leistungen, Wirtschaftlichkeit	J. Schlembach Fachverlag	Erste Auflage 2002; zweite, verbesserte Auflage 2005; dritte, überarbeitete Auflage 2011
Herold, G.	Elektrische Energieversorgung II – Parameter el. Stromkr., Leitungen, Transformatoren	J. Schlembach Fachverlag	Erste Auflage 2001; zweite, überarbeitete und stark erweiterte Auflage 2008 & 2010
Herold, G.	Elektrische Energieversorgung III – Drehfeldmaschinen, Sternpunktbehandlung, Kurzschlußströme	J. Schlembach Fachverlag	Erste Auflage 2002; zweite, überarbeitete und stark erweiterte Auflage 2008
Herold, G.	Elektrische Energieversorgung IV – Ein- und Ausschaltvorgänge, Überspannungen, Grundprinzipien des Selektivschutzes	J. Schlembach Fachverlag 2003	
Herold, G.	Elektrische Energieversorgung V – Stromrichter in Drehstromnetzen	J. Schlembach Fachverlag 2009	
Herold, G.	Elektrische Energieversorgung – Eine kleine Einführung	J. Schlembach Fachverlag 2013	
Mager, D.; Herold, G.; Harde, H.; Vahrenholt, F.; Rohmus, D.; Riedle, K.	Energie und Klima – ein Blick in die Zukunft	Erlanger Forschungen, Reihe B Naturwissenschaften und Medizin, Band 30	
Herold, G.	Koordinatentransformationen für Dreiphasensysteme & Grundlagen ihrer Anwendung	Veröffentlichung im ResearchGate zum Download, 2015	

<b>Autoren</b>	<b>Titel</b>	<b>Verlag</b>	<b>Anmerkungen</b>
Jäger, J.; Romeis, C.; Petrossian, E.	Duale Netzplanung - Leitfaden zum netzkompatiblen Anschluss von dezentralen Energieeinspeiseanlagen	Springer Vieweg Verlag, Wiesbaden 2016	
Marenbach, R.; Jäger, J.; Nelles, D.	Elektrische Energietechnik - Grundlagen, Energieversorgung, Antriebe und Leistungselektronik	Springer Vieweg Verlag, Wiesbaden 2020	
Mahr, F.; Henninger, S.; Biller, M.; Jäger, J.	Elektrische Energiesysteme - Wissensvernetzung Stromrichter, Netz und Netzschutz	Springer Vieweg Verlag, Wiesbaden 2021	

### 7.3 Patentanmeldungen und Patente

<b>Erfinder</b>	<b>Nummer</b>	<b>Titel</b>
Jäger, J.; Hosemann, G.	DE 43 23 290 A1 01.1995	Anordnung mit einem Schrägtransformator
Jäger, J.; Hosemann, G.	DE 43 43 929 A1 06.1995	Verfahren zur Inbetriebnahme und Außerbetriebnahme eines Zusatztransformators
Herold, G.; Jäger, J.; Ammon, J.	DE 195 32 177 C1 01.1997	Steuerverfahren und Vorrichtung für einen stromrichtergesteuerten, stromeinprägenden Schrägtransformator
Keil, T.; Jäger, J.	E07191 02.2004	Optimierte Überstromzeitschutzstaffelung mit frei definierten Strom-Zeit-Kennlinien
Keil, T.; Jäger, J.	DE 10 2011 006979.8	Verfahren zum Schutz eines elektrischen Stromversorgungsnetzes
Hahn, C.; Luther, M.; Müller, S.; Neubert, R.; Semerow, A.; Uder, M.; Weindl, C.; Wendler, T.	2013E17713 DE	A novel Synthetical Test Circuit for High Power Semiconductor Devices used in Line Commutated Converters
Hahn, C.; Luther, M.; Müller, S.; Neubert, R.; Semerow, A.; Uder, M.; Weindl, C.; Wendler, T.	2013E17715 DE	A High Current Transformer in Connection with VSC Modules and Automatic Voltage-Time Area Compensation in a High Current Circuit of a Synthetical Test Circuit
Hahn, C.; Luther, M.; Müller, S.; Neubert, R.; Semerow, A.; Uder, M.; Weindl, C.; Wendler, T.	2013E17718 DE	A novel Test Circuit for Multilevel VSC HVDC Power Modules
Jäger, J.; Ramold, M.; Romeis Ch.	DE 10 2014 201 595.2	Verfahren zur Kurzunterbrechung und Schutzgerät

<b>Erfinder</b>	<b>Nummer</b>	<b>Titel</b>
Petrossian, E.; Romeis, C.; Jäger, J.	DE 10 2014 206 191.1	Verfahren zum Herstellen eines Netzplanes für ein Stromnetz und duales Stromnetz
Jäger, J.; Henninger, S.; Schröder, M.; Rubenbauer, H.	EP2014070545, 2014P16810WE	Smart Power Plant – Methode zur nachhaltigen und netzkompatiblen Integration von regenerativen Energieumwandlungsanlagen
Vogelsang, J.; Jäger, J.; Kereit, M.	DE 10 2015 202493.8	Adaptiver Lastausschnitt – Ein Verfahren zur Anpassung des Lastausschnittes an bestehende Netzverhältnisse
Petrossian, E.; Romeis, C.; Jäger, J.	DE10 2015 209 494.4	Stromanschlusseinrichtung zum Anschluss eines Gebäudes an eine zentrale Stromversorgungseinrichtung
Petrossian, E.; Romeis, C.; Jäger, J.	DE10 2015 209 497.6	Anordnung zum Speichern von Strom zur Versorgung eines Gebäudes
Petrossian, E.; Romeis, C.; Jäger, J.	DE10 2015 209 508.8	Verfahren zur ständigen Versorgung einer Gruppe von Gebäuden mit Strom
Biller, M.; Jäger, J.	DE10 2018 113 627.7, PCT/EP/2018/054923	Verfahren zur Bestimmung eines Fehlerortes in einem elektrischen Netz mit Ringstruktur unter Berücksichtigung von Einspeisungen im Gegensystem
Jaworski, M.; Jäger, J.	DE10 2019 120 400.3	Verfahren zum Erkennen eines Inrushereignisses, Computerprogramm und Trennvorrichtung
Gaube, S.; Kirkman, R.; Jaworski, M.; Klumpp, P.; Strauss, M.; Jäger, J.; Nöth, E.	EP 20212660.3 – 1202 / PCT WO 2022/122441 A1	Schutzeinrichtung und Verfahren zum Überwachen eines elektrischen Energieversorgungsnetzes
Schindler, J.; Jäger, J.	DE 10 2020 129 189.2	Verfahren und Vorrichtung zum lokalen Distanzschutz in einem elektrischen Netz sowie Computerprogramm
Kordowich, G.; Jäger, J.	DE 10 2023 124 957.6	Computerimplementiertes Verfahren zur Ermittlung von Modellparametern, Vorrichtung zur Datenverarbeitung Computerprogrammprodukt und Simulationsverfahren



[www.ees.tf.fau.de](http://www.ees.tf.fau.de)

Herausgeber:  
Friedrich-Alexander-Universität  
Erlangen-Nürnberg  
Lehrstuhl für Elektrische Energiesysteme  
Prof. Dr.-Ing. Matthias Luther  
Cauerstraße 4, Haus 1  
91058 Erlangen

Umsetzung: Timon Conrad, M.Eng.  
Design: FAU Brand Office  
Foto Umschlag außen:  
Data Visualisierung. Informationsfluss generiert mit KI von shokokoart;  
Adobe Stock

