

EVS:

- Stromrichter für Elektrofahrzeuge
- Hocheffiziente Konverter
- SiC & GaN Bauelemente
- Magnetische Bauelemente

e²n:

- Netzberechnungen und Netzsimulationen
- Planung und Betriebsführung elektrischer Netze
- Netzregelung und Netzwiederaufbau
- Leistungs- und Energie- management

AHT:

- Gel-Isolierstoffe für die Hochspannungstechnik
- Anlagenmonitoring und Lebensdauer von Komponenten
- Diagnoseverfahren für Smart-Grids und Fehlerprävention
- Zuverlässigkeitssicherung von Versorgungsnetzen

INES:

- Systemtheorie der Energiewende
- Schlüsselfunktionen zukünftiger Energiesysteme
- Systematische Untersuchung der Energiesystemtransformation
- Bewertung, Strukturierung und Simulation

ZWEIJAHRESBERICHT 2019/2020

IMPRESSUM

Herausgeber:
Universität Kassel/University of Kassel
Kompetenzzentrum für Dezentrale Elektrische
Energieversorgungstechnik (KDEE)
Centre of Competence for Distributed Electric Power Technology

Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Zacharias, Prof. Dr.-Ing. Martin Braun,
Prof. Dr.-Ing. Albert Claudi, Prof. Dr. rer. nat. Clemens Hoffmann

www.kdee.uni-kassel.de

Sekretariate:
EVS: Tel. +49 561 804 6344 (Frau Anja Clark-Carina)
E-Mail: sekretariat.evs@uni-kassel.de
www.uni-kassel.de/eecs/evs

e²n: Tel. +49 561 804 6201 (Frau Kristina Torno)
E-Mail: e2n@uni-kassel.de
www.uni-kassel.de/eecs/evs/e2n

AHT: Tel. +49 561 804 6420 (Frau Svitlana Dippel)
E-Mail: sdippel@uni-kassel.de
www.uni-kassel.de/eecs/iee-aht

INES: Tel. +49 561 804 6182 (Frau Annette Petrat)
E-Mail: annette.petrat@uni-kassel.de
www.uni-kassel.de/eecs/fachgebiete/integrierte-energiesysteme

Satz und Layout:
formkonfekt | konzept & gestaltung | Karen Marschinke | Kassel

Bilder:
Universität Kassel, iStockphoto



ZWEIJAHRESBERICHT 2019/2020



INHALTSANGABE

FORSCHUNGSAKTIVITÄTEN e²n		57	
Vorwort	4	Das Fachgebiet e ² n	58
Kompetenzzentrum für Dezentrale Elektrische Energiespeicherungstechnik (KDEE)	9	Einbindung verteilter Erzeugung beim Netzwiederaufbau	60
Würdigung von Prof. Dr.-Ing. Albert Claudi	14	SimBench	61
Forschungsverbund Fahrzeugsysteme (FAST)	15	RPC2	62
Forschungskooperationen 2019/2020	16	Netzregelung 2.0	63
ÖFFENTLICHKEITSARBEIT		19	
Auswirkungen der Pandemie auf die Lehre	20	Kopernikus ENSURE	64
10 Jahre KDEE	21	MEO	65
Projekt Elektroboot „eBoot“	22	SpIn-AI	66
F&E PROJEKTE		25	
Vorwort Forschungsaktivitäten	26	pandapower – Entwicklung von asymmetrischer Lastflussberechnung für das Open Source Tool	68
FORSCHUNGSAKTIVITÄTEN EVS		29	
Das Fachgebiet EVS	30	Schutztechnikmodellierung in pandapower	69
HELENE	32	pandapower – zur Berechnung elektrischer Netz	70
NR2-RPC	34	pandapipes – zur Berechnung v. Rohrnetzen u. Sektorenkopplung	72
MCIB	35	Ladeinfrastruktur 2.0	74
PVKraftwerke2025	36	Microgrid Labor	76
Alterung der Isolierstoffe	38	Hybrid Grid	79
F & E – Magnetisch steuerbare Drosseln	39	Multi-Resilienz	80
F & E – Steuerbare Magnetische Bauelemente	40	NSON II	81
Einflüsse von PV-Wechselrichtern auf das Netz	41	InterConnect	82
LCL-gefilterter netzgekoppelter Umrichter Nutzung	42	EU SysFlex	83
Messung v. Großsignalverlusten in magn. Bauelementen	44		
Aktive Vormagnetisierung weichmagnetischer Bauelemente	45		
Laborinfrastruktur: Charakterisierung von Komponenten	46		
Großsignal-Messstand für autom. Hysteresemessungen	47		
Laborinfrastruktur: Thermische Charakterisierung	48		
Automatisierte Kommutierungszelle	50		
Geräte- und Softwareentwicklung	52		
Praktikum „Automatisierte Kommutierungszelle“	54		
FORSCHUNGSAKTIVITÄTEN AHT		85	
Das Fachgebiet AHT	86		
Elektrische Festigkeit von Schichtisoliersystemen	88		
Smart Materials	90		
Methoden zur kennlinienbasierten Zustandsüberwachung von Metalloxid-Varistoren	91		
Laborausstattung	92		
FORSCHUNGSAKTIVITÄTEN INES		95	
Das Fachgebiet INES	96		
Forschungsschwerpunkt Energiesystem Stadt	98		
Ladeinfrastruktur 2.0	99		
Multi-Lidar-Messkampagnen	100		
LiDAR-basierte Messstrategien (LiMeS)	101		



ABGESCHLOSSENE PROMOTIONEN **103**

Daniel Duckwitz: Power System Inertia: Derivation of Requirements and Comparison of Inertia Emulation Methods for Converter-based Power Plants	104
Gustav Lammert: Modelling, Control and Stability Analysis of Photovoltaic Systems in Power System Dynamic Studies	105
Sebastian Wels: Zum Einfluss von Temperatur und Feuchtigkeit auf die elektrische Festigkeit von thermoplastischem Kunststoff, Silikongel und einem daraus resultierenden Schichtisoliersystem	106
Wolfram Kruschel: Untersuchungen zum Einsatz leistungselektronischer Spannungsregler in Niederspannungsverteilnetzen mit hohem Anteil dezentraler Erzeugungsanlagen	107
Olympio Cipriano da Silva Filho: A Family of High-Frequency Isolated Single-Phase AC-AC-Converters	108
Jan-Hendrik Menke: A Comprehensive Approach to Implement Monitoring and State Estimation in Distribution Grids with a Low Number of Measurements	109
Stefan Jörres: Methoden zur kennlinienbasierten Zustandsüberwachung von Metalloxid-Varistoren	110
Stefan Engel: SEMA – Social Energy Management	111
Chenjie Ma: A novel evaluation framework for energy losses in low voltage distribution grids	112
Markus Kraiczy: Reactive power grid adequacy studies for distribution grids with high distributed generation	113
Fabian Niedermeyer: Performance Assessment of Residential PV Battery Systems – Development and Application of Test Procedures and Key Performance Indicators	114
Douglas Pappis: Short Circuit Requirements of Power Converters Based Upon Wide-Bandgap Semiconductors	115
Sebastian Pfaffel: Unterstützung der Betriebsführung von Windenergieanlagen durch Zuverlässigkeit- und	

Performancebenchmarks mittels unternehmensübergreifender Erfahrungsdatenbanken	116
--	-----

Philipp Härtel: Offshore grids in low-carbon energy systems	117
--	-----

Florian Schäfer: Multi-Year Time-Series-Based Power System Planning with Hybrid Optimization and Supervised Learning Methods	118
---	-----

DOKUMENTATION **121**

Aktuelle Abschlussarbeiten 2019 + 2020 EVS	122
Aktuelle Abschlussarbeiten 2019 + 2020 e ² n	124
Aktuelle Abschlussarbeiten 2019 + 2020 AHT	126
Aktuelle Abschlussarbeiten 2019 + 2020 INES	128
Publikationen 2019 / 2020	130

MITAREITERINNEN UND MITARBEITER **139**

IMPRESSIONEN **147**

Freizeitaktivitäten, Gruppenfotos und Veranstaltungen	148
---	-----



VORWORT

Das Kompetenzzentrum für Dezentrale Elektrische Energieversorgungstechnik (KDEE) an der Universität Kassel wurde 2008 durch Ministerin Kühne-Hörmann (CDU) eingeweiht und im Januar 2009 als eigene Struktureinheit der Universität Kassel eingerichtet. Seit-her vollzog sich zunächst mit dem Fachgebiet Elektrische Energiever-sorgungssysteme (EVS) eine gemeinsame Entwicklung. Diese Ent-wicklung wurde mit der Berufung von Prof. Dr.-Ing. Martin Braun im Jahr 2012 durch das Fachgebiet „Energiemanagement und Betrieb elektrischer Netze“ (e²n) und 2015 mit Prof. Dr.-Ing. Albert Claudi (Fachgebiet Anlagen und Hochspannungstechnik, AHT) und Prof. Dr. rer. nat. Clemens Hoffmann (Fachgebiet Integrierte Energiesysteme, INES) ergänzt, um den Forschungsschwerpunkt Energiesystem-technik in Nordhessen zu stärken.

Die Themen „Nutzung erneuerbarer Energiequellen“ und „Schonung von Ressourcen durch Effizienzsteigerung“ sind aktueller denn je. Dekarbonisierung, Dezentralisierung und Digitalisierung sind trei-bende Kräfte in der Transformation der Energiesysteme.

Ursprünglich stand bei der Nutzung erneuerbarer Energiequellen die Bereitstellung von Wirkleistung mit höchster Effizienz im Fokus des Interesses. Viele systemtechnische Fragestellungen kommen jetzt hinzu. Aus Netzen, die durch große elektrische Maschinen dominiert wurden, werden Netze mit immer stärkerer Prägung durch leistungs-elektronische Energiewandler und volatile Energieflüsse. Je höher der Anteil volatiler Erzeuger an der installierten Gesamtleistung ist, desto stärker rücken auch Fragestellungen nach der Sicherung der Stabilität und Qualität der Netze in den Vordergrund. Hier sieht das KDEE zukunftssichernde Aufgabenfelder bei der Gestaltung des technischen Systems durch die Entwicklung von Stellgliedern, ge-eigneter Automatisierungstechnik und durch ein Regelwerk für die Interaktion der vernetzten energietechnischen Komponenten.

Der Zubau von dezentralen Elektroenergieerzeugern konnte bis ins Jahr 2010 wegen des noch relativ geringen Anteils bei flächiger Ver-teilung kaum wirkliche negative Auswirkungen haben. Durch die hohe Wachstumsrate beim Zubau dezentraler Energieeinspeiser hat sich diese Situation grundlegend geändert. Die häufig in der Öffent-lichkeit durchgeführte Betrachtung von kumulierten Werten führt hier im Einzelfall nicht zu sinnvollen Lösungen. Verbrauch und Ein-speisung von Energie in das elektrische Netz sind sowohl räumlich als auch zeitlich weitgehend unkorelliert. Gleichzeitig ist das Ver-bundnetz keine „kurze Kupferplatte“, sondern bildet ein „flächen-haf tes“ elastisches System mit einer horizontalen Ausdehnung von mehreren 1000 km. Es gibt zusätzlich auch eine „vertikale“ Ausdeh-nung durch die lokale hierarchische Ordnung der Übertragungs- und Verteilnetze in verschiedene Spannungsebenen mit jeweils eigener Netztopologie.

Weiterer Zubau setzt Systemkenntnis und Koordination voraus. Hier-für sieht sich das KDEE von der Seite der Grundlagenforschung über die Entwicklung neuer Prinziplösungen für Stellglieder und System-komponenten bis zu Fragen der Netzregelung, Qualitätssicherung und damit der technischen und wirtschaftlichen Optimierung der Auslegung und Regelung dezentraler Energiesysteme in der Verant-wortung.

Im Kontext der Digitalisierung spielen Open Source, Plattformen und künstliche Intelligenz eine wichtige Rolle, die auch am KDEE einen Schwerpunkt darstellen. Am KDEE wurde gemeinsam mit dem Fraunhofer IEE mit pandapower (www.pandapower.org) eine inzwischen weit verbreitete neue Open Source Plattform für Netzberech-nungen und Netzoptimierungen entwickelt und damit ein Grundstein für verschiedene Softwarelösungen zur Netzanalyse und Netzopti-mierung schaffen. Der zunehmend relevante Plattformgedanke wird auch durch die Co-Simulationsumgebung OpSim (www.opsim.net) für die Analyse der Wechselwirkung von Softwarekomponenten in komplexen Energiesystemen fortgeführt. Neben klassischen Metho-den der Optimierung werden auch Methoden der künstlichen Intelli-genz für zahlreiche Bereiche elektrischer Netze (z.B. Modellbildung, Analyse, Zustandsschätzung, Planung, Betriebsführung) weiterent-wickelt.



**Prof. Dr.-Ing. habil.
Peter Zacharias**



**Prof. Dr.-Ing.
Martin Braun**



**Prof. Dr.-Ing.
Albert Claudi**



**Prof. Dr. rer. nat.
Clemens Hoffmann**

Das Streben nach Energiewandlung mit höchster Effizienz zur Reduktion von CO₂-Emissionen und Kostensenkung überträgt sich aus dem Bereich der Erneuerbaren Energietechnik zunehmend auch in andere Bereiche. Neben der Wärmeversorgung durch Kraft-Wärme-Kopplung und Wärmepumpen ist ein weiteres wichtiges Beispiel dafür der Automobilbau – mit oder ohne elektrischen Antrieb. Vermiedene Verluste bedeuten vermiedene Aufwendungen für Kühlung, geringere Masse und größere Reichweiten. Um diese Entwicklung voranzubringen, wirken das KDEE und seine Fachgebiete auch gleichzeitig im Forschungsverbund Fahrzeugsysteme (FAST) der Universität Kassel mit. Auch in der Industrieartimation, der Beleuchtungstechnik und der Medizintechnik führen Energiesparungen zu Kostenvorteilen, so dass hier weitere „spin offs“ der bisherigen Forschungstätigkeiten zu erwarten sind.

Der deutlich erkennbare Trend, dass seit einigen Jahren immer mehr Interessenten für ein energietechnisches Studium zu verzeichnen sind, ist sehr erfreulich. Auch der Trend, einen merklich höheren Anteil als früher zum Master zu führen, ist an dieser Stelle hervorzuheben. Durch das KDEE werden eine Vielzahl klassischer und neuer energietechnischer Themen in Lehrveranstaltungen aufbereitet vermittelt, um den Nachwuchs für die systemtechnische Gestaltung der Energieversorgung der Zukunft zu sichern.

Es war daher eine weit vorausschauende Entscheidung des Landes Hessen durch das Hessische Ministerium für Wissenschaft und Kunst, gemeinsam mit der Universität Kassel, Wissenschaft und Forschung in diesen Bereichen durch Förderung und enge Kooperationsbeziehungen mit der Industrie auszubauen.

Das KDEE ist durch personelle Verknüpfung der Fachgebiete e²n und INES mit dem Fraunhofer IEE in einer engen Kooperation verbunden, so dass die Kompetenzen der führenden regionalen Forschungseinrichtungen im Themenfeld der dezentralen elektrischen Energieversorgung optimal aufeinander abgestimmt werden können, um mit dieser Standortstärke gemeinsam die Energiewende in Nordhessen, national und international voranzubringen.

Die Mitarbeiter und Studenten von KDEE fühlen sich der weiteren Stärkung der Zusammenarbeit der Universität Kassel mit anderen wissenschaftlichen Institutionen wie dem Fraunhofer IEE und Wirtschaftspartnern sowie der internationalen Sichtbarkeit ihrer Leistungsfähigkeit auf dem Gebiet nachhaltiger Energieversorgung verpflichtet und danken ihren Förderern und Kooperationspartnern auf das Herzlichste.

P. Zacharias M. Braun



FOREWORD

The Centre of Competence for Distributed Power Technology (KDEE) at the University of Kassel was inaugurated by minister Kühne-Hörmann (CDU) in 2008 and was established as a distinct structural unit of the University of Kassel in January 2009. Since then a mutual development in cooperation with the Department of Electrical Power Engineering (EVS) has taken place. This development was further expanded 2012 with the appointment of Prof. Dr.-Ing. Martin Braun as head of the Department of Energy-Management and Power System Operation (e^2n) and 2015 with Prof. Dr.-Ing. Claudi (Department of Systems and High Voltage Technology, AHT) and Prof. Dr. rer. nat. Clemens Hoffmann (Department of Integrated Energy Systems, INES) to strengthen the focus of power engineering research in northern Hesse.

Topics around the utilization of renewable energy sources and the conservation of resources through an increase in efficiency are more relevant than ever. Decarbonization, decentralization and digitization are decisive driving forces in the transformation of energy systems.

Originally, the provision of active power with high efficiency has been the primary objective of the utilization of renewable energy sources. Additionally, many system oriented questions are now coming up. Electric grids that used to be dominated by large electrical machines are being transformed into grids that are increasingly characterized by power electronic converters and volatile power sources. The higher the share of the total installed capacity of volatile power sources that is provided by these converters the more questions concerning the stability and quality of the networks are brought to the centre of attention. Within this context, the KDEE sees future fields of activity in the design of technology through the development of power converters, suitable automation technology and a set of rules for the interaction of interconnected distributed components in the power system.

Until the year 2010 the addition of distributed generation units could not have significant negative consequences due to the high level of robust grid structures. As a consequence of the high growth rates in the addition of decentralised energy suppliers this situation has changed fundamentally. The analysis of cumulative values, as is frequently done publically, does not provide meaningful results for individual cases. Consumption of energy from the electrical grid and injection of energy into the grid are frequently uncorrelated in location as well as in time. At the same time, the European synchronous grid is no "short copperplate", but forms an extensive elastic system with a "horizontal" expansion of multiples of 1000km. Additionally, a "vertical" dimension is added by the hierarchical structure of the underlying transmission and distribution systems of different voltage levels and network topologies. Further addition of decentralised energy providers requires knowledge of the system and coordination.

The KDEE feels responsible to address these issues by undertaking fundamental research ranging from the development of new principal solutions and equipment for power converters to questions concerning network control and quality assurance as well as the technical and economical optimization of the dimensioning and control of decentralised energy systems.

In the context of digitization, open source platforms and artificial intelligence play an important role, which is also a focus at KDEE. At KDEE, together with Fraunhofer IEE, pandapower has been developed (www.pandapower.org), a now widely used new open source platform for network calculation and optimization, thus laying the foundations for various software solutions for network analysis and network optimization. The increasingly relevant platform concept is also pursued with the co-simulation environment OpSim (www.opsim.net) for the analysis of the interaction of software components in complex energy systems. In addition to classical methods of optimization, methods of artificial intelligence for many areas of electrical networks (such as modeling, analysis, state estimation, planning, operation) are further developed.



**Prof. Dr.-Ing. habil.
Peter Zacharias**



**Prof. Dr.-Ing.
Martin Braun**



**Prof. Dr.-Ing.
Albert Claudi**



**Prof. Dr. rer. nat.
Clemens Hoffmann**

The pursuit of achieving energy conversion with high efficiency is increasingly being carried over from the field of renewable energy technology to other areas. Aside from the supply of heat by means of combined-heat-and-power and heat pumps the automotive industry – using electric drive systems or not – is another example. Reduced losses result in reduced expenditure for cooling, lower mass and increased operation ranges. To further this development the KDEE and its departments are actively involved in the research group Vehicle Systems (FAST) at the University of Kassel. In industry automation, lighting technology and medical technology energy savings also directly result in cost benefits.

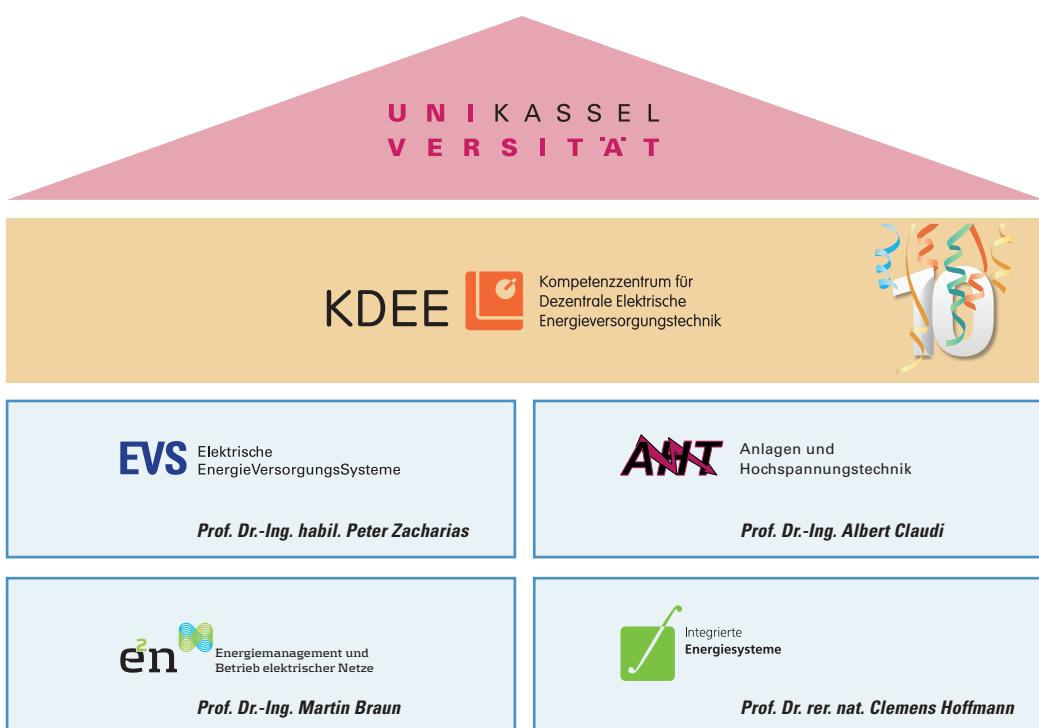
Therefore, the noticeable trend of increasing interest of students to study power engineering is promising. It is also to be noted at this occasion, that a higher proportion of students than previously continue in the Master program. By KDEE are addressed many classic and new power supply related themes in lectures. This will reduce the shortage of skilled professionals, but is far from a long-term fulfilment of demand.

It was therefore a far sighted decision of the state of Hesse through the ministry of science and art, together with the University of Kassel, to expand science and research in these areas through sponsorship and close cooperation with industry.

The KDEE is in close collaboration with the Fraunhofer Institute for Energy Economics and Energy System Technology IEE through personal linkages with the department e2n and INES. This allows the competences of the leading regional research institutions in the topic area of decentralized electrical energy supply to be closely coordinated to use this regional strength to bring forward the transition to a sustainable energy supply in northern Hesse, Germany and beyond.

Staff and students of KDEE are committed to further strengthen the cooperation of the University with other academic institutions such as the Fraunhofer IEE as well as companies and to internationally visualize their performance and their industrial and scientific environment in the field of sustainable energy technology and would like to thank their sponsors and partners most sincerely.

P. Zacharias M. Braun



Unter dem Dach der Universität Kassel und des Kompetenzzentrums für Dezentrale Elektrische Energieversorgungstechnik (KDEE) befinden sich die vier Fachgebiete EVS, e²n, AHT und INES



KDEE



Kompetenzzentrum für
Dezentrale Elektrische
Energieversorgungstechnik

Ansprechpartner

PROF. DR.-ING. HABIL. PETER ZACHARIAS, PROF. DR.-ING. MARTIN BRAUN

Titel

KOMPETENZZENTRUM FÜR DEZENTRALE ELEKTRISCHE ENERGIEVERSORGUNGSTECHNIK (KDEE)

EVS



Lehre und Forschung im **Fachgebiet Elektrische EnergieVersorgungsSysteme (EVS)**

unter der Leitung von Prof. Zacharias sind ausgerichtet auf Anlagen und Systeme zur elektrischen Energieversorgung sowie auf die Entwicklung leistungselektronischer Bauelemente und Baugruppen für solche Systeme. Sie umfassen

dabei die Entwicklung von Techniken zur Nutzung erneuerbarer Energiequellen (z.B. Sonne, Kleinwasserkraft, Biogas und Wind) sowie leistungselektronische Wandler in mobilen Anwendungsbereichen.

Das Fachgebiet EVS beschäftigt sich mit geräteorientierter Energiesystemtechnik für die Nutzung erneuerbarer Energien mit besonderem Schwerpunkt bei der Stromrichtertechnik in Hybridsystemen, im Verteilnetz und bei dezentraler Energiewandlung sowie in mobilen Energieversorgungssystemen.

Forschungsthemen

- Strukturelle Untersuchungen zu Versorgungssystemen und zur Energiewandlung
- Entwicklung von Einheiten zur Energieaufbereitung und deren Integration in Versorgungsnetze
- Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Regelung, Leistungsaufbereitung, Netzbildung und zum Energiemanagement elektrischer Energieversorgungs- und Energiespeichersysteme
- Untersuchungen und Simulationen zum stationären und dynamischen Komponenten- und Anlagenverhalten,
- Entwicklung von Wandlersystemen – speziell von Stromrichtereinheiten – sowie grundlegende Arbeiten zur Modularisierung und Auslegung von gesamten Versorgungsanlagen kleiner Leistung

Teaching and research activities in the department EVS under the direction of Prof. Zacharias are focused on subsystems and systems for electrical power supply and on development of power electronic components and devices for such systems. These include especially the development of methods to use renewable energy sources (e.g. solar energy, small-hydro power, biogas and wind) and power electronic converters for mobile applications.

The department EVS is engaged in the development of device-oriented energy system technologies for the use of renewable energy sources with special focus on power converter technology in hybrid systems, in power systems and in decentralized energy conversion in mobile power systems.

Main emphasis

- *Structural investigations about power supply and energy conversion systems*
- *Development of systems for energy conditioning and their integration in the supply grid*
- *Theoretical and experimental investigations of control, power conditioning, grid simulation and energy management from electrical supply and storage systems*
- *Investigation and simulation of stationary and dynamic behaviour of components and facilities*
- *Development of power converters as well as basic sizing and modularization of low-power supply systems*



Das **Fachgebiet Energiemanagement und Betrieb elektrischer Netze (e²n)** unter der Leitung von Prof. Braun vertritt in Forschung und Lehre die Analyse sowie die technisch und wirtschaftlich optimierte Auslegung, Regelung und Betriebsführung des zukünftigen dezentralen Energieversorgungssystems (SmartGrid) mit hohem Anteil erneuerbarer Energien.

Das Fachgebiet e²n entwickelt Modelle und Simulationswerkzeuge zur Analyse und Beschreibung des Systems in allen Zeitskalen und Systemebenen sowie Werkzeuge zur multikriteriellen Optimierung der Auslegung, Regelung und Betriebsführung (inkl. Methoden der Komplexitätsreduktion).

Forschungsthemen

- Regelung und Auslegung von Erzeugern, Verbrauchern, Speichern und Netzbetriebsmitteln zur Bereitstellung von Energie- und Netzdienstleistungen
- Verfahren für Energiemanagement und Netzbetrieb / Automatisierungslösungen in dezentralen Versorgungsstrukturen mit verschiedenen Aggregations- und Anreizkonzepten
- Verfahren für automatisierte Netzplanung / optimiertes Systemdesign
- Lösungen für robustes Systemverhalten im Fehlerfall und für den Netzwiederaufbau

The department Energy Management and Power System Operation (e²n) under the coordination of Prof. Braun focuses in teaching and research on the technically and economically optimized design and control of the future decentralized energy supply system (Smart Grid) with a high percentage of renewable energies.

The department e²n develops models and simulation tools for the analysis and description of systems at different time scales and system levels, as well as tools for multi-objective optimization, design, control and management (including methods for reduction of complexity).

Main emphasis

- *Control and design of generation, consumer, storage and grid facilities for the provision of energy and ancillary services*
- *Approaches for energy management and grid operation / automation solutions in decentralized supply structures with different concepts such as aggregation and incentive-based concepts*
- *Concepts for automated grid planning / optimal system design*
- *Solutions for robust system response in case of failure and for grid restoration*

AHT



Die Hochspannungstechnik ist eine Schlüsseltechnologie der Energietechnik. Hohe elektrische Feldstärken treten in Medien der Übertragungs- und Verteilnetze auf, zumeist in den klassischen Systemen wie Transformatoren, Leitungen und Schaltgeräten. Aber zu ähnlich hohen und zum Teil höheren Feldstärken kommt es auch in Leistungshalbleitern und leistungselektronischen Baugruppen wie zum Beispiel in IGBTs. Erneuerbare Energiequellen wie Wind- und PV-Anlagen werden aufgrund der höheren Leistungen mit immer höheren Spannungen betrieben. Nicht zuletzt stellt die Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) eine Alternative zur Drehstromübertragung dar, die neue Herausforderungen an Isolierstoffe und deren Zuverlässigkeit stellt.

Das **Fachgebiet Anlagen- und Hochspannungstechnik (AHT)** ist mit rund 20 Mitarbeitern, Doktoranden und Lehrbeauftragten anwendungsorientiert ausgerichtet und verfügt über eine ausgezeichnete experimentelle Ausstattung. Zwei Hochspannungslabore stehen für die Lehre und Forschung zur Verfügung. Alle Forschungsprojekte finden in enger Kooperation mit Industrieunternehmen statt unter Einbezug der Abschlussarbeiten von Studierenden.

Prof. Claudi leitet das Fachgebiet AHT seit dem Jahr 2000. In der Lehre unterstützen einige externe Dozenten das Fachgebiet seit vielen Jahren. Die Vorlesung „Blitz und Überspannungsschutz“ von Herrn Dr. Finis, Phönix Contact, erfreut sich ebenso großer Beliebtheit wie die Lehrveranstaltung „Lichttechnik“, die von Frau Dr. Vandahl, Herrn Gielsdorf und Herrn Winter durchgeführt werden.

The department of Power Systems and High Voltage Technology examines themes of the broad field of high-voltage transmission under the direction of Prof. Albert Claudi. In addition to the calculation and design of transmission systems, insulation materials are tested for their withstand capability. Gels have some promising properties compared to conventional insulating materials, which make them interesting for use in medium and high voltage engineering. Since 2001 the department has been working within this field of interest. The research work was accompanied by application projects, which were carried out in cooperation with various industrial companies.

The monitoring of plants and electrical networks is also an important part of the changing network structure on the way to the Smart Grids of the future. It pursues different objectives of reducing maintenance and repair, increasing reliability, better utilization of networks and increasing the service life of components. In contrast to pure measuring systems, monitoring systems are capable of evaluating the state of a system or a network and, if necessary, initiating appropriate actions automatically.



Das **Fachgebiet Integrierte Energiesysteme (INES)** erforscht unter der Leitung von Prof. Dr. rer. nat. Clemens Hoffmann die Transformation von heutigen Energieversorgungssystemen auf drei wesentlichen Themenfeldern, nämlich der Energiewirtschaft und Entscheidungsunterstützung, der Kommunikation und Koordination sowie der Windenergie.

Die am Fachgebiet INES entwickelten Modelle und Werkzeuge greifen dabei auf Optimierungsmethoden, Simulationsmethoden und Analyseverfahren für Mess- und Wettermodelldaten zurück.

Forschungsthemen

- Nutzung von Resultaten optimierender Energiesystemmodelle in interaktiven Entscheidungssituationen
- Quantitative Analyse von Energiesystemtransformationen mit Methoden der allgemeinen Systemtheorie
- Design und simulative Erprobung von Marktmechanismen im Zusammenspiel zwischen dezentralen Energiemanagementanlagen, Prognosewerkzeugen der Netzbetreiber und Energiemärkten
- Beiträge zum Entwurf einer umfassenden IKT-Architektur des Energiesystems
- Windenergiemeteorologie und Potenzial der Windenergie
- Modellierung der Auswirkungen politischer Entscheidungen auf den Windenergieausbau

The department of Integrated Energy Systems (INES), under the direction of Prof. Dr. rer. nat. Clemens Hoffmann, explores the transition of current energy systems with three research foci: energy economics and decision support, coordination and communication, as well as wind energy.

Developed tools and models incorporate optimisation, simulation, and analytical methods for measurements and weather data.

Research topics:

- *Application of results of optimising energy system models in interactive decision making*
- *Quantitative analysis of energy system transformations by methods of common system theory*
- *Design and simulative exploration of market processes in the interplay of decentral energy management gateways, prognosis services of grid operators and energy markets*
- *Contributions for an overarching ICT architecture of the future energy system*
- *Wind energy meteorology and analysis of wind energy potentials*
- *Impact modelling of political decisions regarding wind energy extension*

Titel

**PENSIONIERUNG VON
PROFESSOR DR.-ING. ALBERT CLAUDI**

title

**THE RETIREMENT OF
PROFESSOR DR.-ING. ALBERT CLAUDI**

Prof. Dr.-Ing. Albert Claudi

Von 2000 bis 2020 war Professor Albert Claudi Leiter des Fachgebiets Anlagen- und Hochspannungstechnik (AHT) im Fachbereich Elektrotechnik/Informatik (FB16). In dieser Zeit war er mit seinem Fachgebiet an zahlreichen Projekten beteiligt und initiierte diese. Unter seiner Leitung wurde die Hochspannungstechnik auch labormäßig mit einer breiten Basis an der Universität Kassel eingerichtet. Seine Forschungsschwerpunkte in dieser Zeit waren z.B. Verhalten von Isolationssystemen aus Basis von Silikon-Gelen unter dem Einfluss sehr hoher Feldstärken, Prüfumgebung für Überspannungsableitern in Photovoltaikanlagen, Überspannungsableiter im Niederspannungs- und Mittelspannungsnetz, sowie Monitoring von Hochspannungsleitern mit Multikoptern.

Professor Claudi ging im April 2020 in Pension verfolgt aber weiterhin in der neu gegründeten Firma „CRW engineering“ zum Teil gemeinsam mit dem KDEE aktuelle wissenschaftliche Fragestellungen der Isoliertechnik.

Professor Albert Claudi was head of the Department of Power Apparatus and High Voltage Engineering (AHT) in the Department of Electrical Engineering/Computer Science (FB16) from 2000 to 2020. He was involved in and initiated many projects during this time. Under his leadership, high-voltage technology was also established on a laboratory basis with a broad base at the University of Kassel. His main research topics during this time were e.g. behavior of insulation systems with silicone gel under the influence of very high field strengths, test environment for surge arresters in photovoltaic systems, surge arresters in the low and medium voltage grid as well as monitoring of high voltage overhead lines with multicopters.

Professor Claudi retired in April 2020 and continues to pursue current scientific issues in insulation technology in the new founded company "CRW engineering" partly together with KDEE.

Ansprechpartner

PROF. DR.-ING. HABIL. PETER ZACHARIAS

Titel

**DIE FACHGEBIETE DES KDEE SIND EBENFALLS
MITGLIEDER DES FORSCHUNGSVERBUNDS
FAHRZEUGSYSTEME (FAST)**

Der Fahrzeugbau ist eine in Deutschland etablierte Schlüsselindustrie, deren Bestand und Wachstum entscheidend bestimmt wird durch die Entwicklung von Technologien zur Funktionsverbesserung durch mechatronische Systeme, alternative Antriebstechniken sowie Konzepte zur Verbrauchsoptimierung und zur Einsparung von Primärenergie, Emissionen sowie Reibungsverlusten.

Ein Schlüssel zum vertieften Verständnis der komplexen mechanischen, elektronischen und fluidmechanischen Prozessabläufe sowie zur Verkürzung der Entwicklungsabläufe sind rechnergestützte und experimentelle Simulationstechniken für virtuelle Fahrzeug- und Motormodelle.

Durch Bündelung der an der Universität Kassel vorhandenen Kompetenzen in den Bereichen Motormechanik und Fahrzeug-Elektrik/Elektronik wollen die beteiligten Institute Methoden und Verfahren des System Engineering zur industriellen Praxisreife entwickeln und bis zur industriellen Einführung begleiten. Wichtige Aspekte sind dabei auch effiziente elektrische und thermische Fahrzeugkomponenten, Weiterentwicklung von Energiemanagementsystemen sowie die Integration von Elektrofahrzeugen in das Stromversorgungssystem.

In einer Ringvorlesung „Komponenten und Systeme in konventionellen und elektrischen Fahrzeugen“ stellen Fachgebiete aus den Fachbereichen 15 und 16 der Universität Kassel die unterschiedlichen Disziplinen im Automobil vor. Die Fachvorträge erläutern das komplexe Zusammenspiel der elektrischen und mechanischen Komponenten im Fahrzeug und stellen die daraus entstehenden Herausforderungen und Lösungsansätze dar. Die Ringvorlesung richtet sich an Studenten der Fachrichtungen Elektrotechnik, Mechatronik und Maschinenbau. Sie ist aber auch für andere Studenten und Gastshörer geeignet, die sich für ein umfassendes, technisches Hintergrundwissen im Automobilbereich interessieren.



<http://fast.uni-kassel.de/>

title

**ALL DEPARTMENTS OF KDEE ARE ALSO
MEMBER OF THE RESEARCH ASSOCIATION FOR
VEHICLE SYSTEMS (FAST)**



Vehicle manufacturing is an established key industry in Germany, whose stability and growth depends on the development of technologies to improve the functionality using mechatronic systems as well as the development of alternative drive technologies and concepts to optimize consumption, to save primary energy and to reduce emissions and minimize friction losses.

Computer based and experimental simulation techniques for virtual vehicle and engine models are a key to a deep understanding of complex mechanical, electronic and fluid dynamic processes and to shorten the development process. Important aspects are also efficient electrical and thermal vehicle components, further development of energy management systems and the integration of electric vehicles into the power supply system.

By combining the existent competences in the areas of engine mechanics and vehicle electrics/electronics at the University of Kassel the involved institutes want to develop methods and processes in systems engineering to industrial maturity and accompany the initial application of these in industry.

In a lecture series entitled "Components and Systems in conventional and electrical vehicles" the departments of the faculties of mechanical and electrical engineering and computer science (faculties 15/16) at the University of Kassel present the different disciplines in vehicle manufacturing. The lectures explain the complex interaction of electrical and mechanical components in a vehicle and illustrate the resulting challenges as well as possible solutions. The lecture series is aimed at students of the disciplines of electrical, mechatronic and mechanical engineering. However, it is also suitable for students and other guest audiences interested in comprehensive technical background knowledge of vehicle manufacturing.

Ansprechpartner

PROF. DR.-ING. HABIL. PETER ZACHARIAS, PROF. DR.-ING. MARTIN BRAUN

Titel

FORSCHUNGSKOOPERATIONEN

title

RESEARCH COOPERATIONS

Das KDEE entwickelt gemeinsam mit anderen Instituten und Fachgebieten aus der Universität Kassel heraus zusammen mit dem Fraunhofer Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik (IIE) gerätetechnische Lösungen für die NetzinTEGRATION von Erneuerbaren Energiequellen. Dies wird auch durch eine personelle Verknüpfung erreicht. So ist Prof. Dr. rer. nat. Hoffmann gleichzeitig Direktor des Fraunhofer Instituts IEE in Kassel, während Prof. Dr. Martin Braun Abteilungsleiter Betrieb Verteilungsnetze am Fraunhofer IEE ist.

Mit dem regionalen Netzwerk „deENet – Energie mit System“ (www.deenet.org) wird in enger Kooperation für den Transfer wissenschaftlich-technischer Ergebnisse aus der Universität in die Region gesorgt. Die bereits bestehenden langjährigen Kooperationen mit der SMA Solar Technology AG, Städtische Werke Kassel, Schneider Electric, EAM, AREVA, POLYMA im Bereich der dezentralen Versorgungssysteme sowie der Infineon AG werden ausgeweitet und auf weitere Partner erweitert.

Zielstellung ist es dabei, den Schwerpunkt der Energietechnik bei der Wertschöpfung in der Region weiter deutlich auszubauen, um so dieses regionale Profil bildende Element zu stärken. Die entstehenden Schutzrechte werden über die UniKasselTransfer GmbH vermarktet.

Im Bereich der elektrischen energietechnischen Aufgabenstellungen in mobilen Anwendungen für die Bordversorgung und die Traktion wird die Zusammenarbeit mit Volkswagen AG in Baunatal in Verbindung mit dem Forschungsverbund Fahrzeugsysteme (FAST) weiter ausgebaut. In Verbindung von Forschung und Lehre werden auch in Kooperation mit den Unternehmen besonders befähigte Mitarbeiter dieser Unternehmen zur Promotion geführt und Themen aus diesen Unternehmen innerhalb von EVS und KDEE zur Promotion angeboten.

Together with the Fraunhofer Institute for Energy Economics and Energy System Technology (IIE), the KDEE develops together with other institutes and departments of the University of Kassel device-related solutions for the grid integration of renewable energy sources. This is also achieved by a personal link. For example, Prof. Dr. rer. Nat. Hoffmann is acting also as director of the Fraunhofer Institute IEE in Kassel, while Prof. Dr. Martin Braun is Head of the Division of Distribution Networks at Fraunhofer IEE.

The KDEE, together with the EVS from the University of Kassel along with the Fraunhofer Institute for Energy Economics and Energy System Technology (IIE), will develop in cooperation device-related solutions for the grid integration of renewable energy sources. By means of close cooperation with the regional network deENet (www.deenet.org), the transfer of scientific-technical results from the university to the region will be ensured

The purpose of these cooperations is to develop the core areas of energy technology thus boosting the region of Kassel.

In the branch of electrical energy technology for mobile applications, the activities related to on-board power systems and traction will be further expanded in cooperation with Volkswagen AG in Baunatal and the Research Association for Vehicle Systems (FAST) inside the University of Kassel.

Connecting research and teaching activities, specialized and talented employees of those companies have the possibility to develop their PhD work inside KDEE and EVS.



Kompetenznetzwerk Dezentrale Energietechnologien e. V.
gegründet 2003 in Kassel
Network of Competence on Decentralized Energy Technology e. V. founded in 2003 in Kassel



Forschungsverbund Fahrzeugsysteme (FAST)

Die Förderung von Wissenschaft und Forschung ist Ziel der Stiftung Kleinkauf mit Sitz in Kassel. Dabei steht insbesondere die Erforschung und der Einsatz erneuerbarer Energien sowie die Energieeffizienz im Fokus. Das KDEE dankt der Kleinkauf-Wissenschaftsstiftung für seine Unterstützung bei der Entwicklung langfristiger Themen der Grundlagenforschung.

The promotion of science and research is the goal of the Kleinkauf Foundation, based in Kassel. In particular, research and the use of renewable energies as well as energy efficiency are the focus. The KDEE is thankful to the Kleinkauf Foundation for supporting developments of long term fundamental research themes.

Nationale und Internationale Kooperation

Eine Präsenz in den folgenden Organisationen ist bereits vorhanden:

- European Academy of Wind Energy (EAWE)
- European Centre of Power Electronics (ECPE)
- European Power Electronic and Drives Association (EPE)
- Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)
- Verband Deutscher Ingenieure (VDI)
- Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik (VDE) bzw. der Energietechnischen Gesellschaft (ETG)
- Conseil International des Grands Réseaux Électriques (Internationaler Rat für große elektrische Netze, CIGRÉ)
- Congrès international des réseaux électriques de distribution (Internationale Konferenz für Stromverteilung, CIRED)

National and international cooperations

The association with the following organizations is already working:

- European Academy of Wind Energy (EAWE)
- European Centre of Power Electronics (ECPE)
- European Power Electronic and Drives Association (EPE)
- Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)
- Verband Deutscher Ingenieure (VDI)
- Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik (VDE) bzw. der Energietechnischen Gesellschaft (ETG)
- Conseil International des Grands Réseaux Électriques (International Council on Large Electric Systems, CIGRÉ)
- Congrès international des réseaux électriques de distribution (International Conference on Electricity Distribution, CIRED)



Es bestehen umfangreiche Kooperationen mit verschiedenen nationalen Universitäten (unter anderem RWTH Aachen, TU Dortmund, TU Dresden, FAU Erlangen), Netzbetreibern (z.B. DREWAG, ENSO, Hansewerk, Mitnetz, Westnetz, Netze-BW, ENM, Städtische Werke Kassel, 50Hertz, Tennet, Amprion, TransnetBW) und Anlagenherstellern (z.B. SMA, Enercon).

There are extensive cooperations with various national universities (e.g. RWTH Aachen, TU Dortmund, TU Dresden, FAU Erlangen), network operators (e.g. DREWAG, ENSO, Hansewerk, Mitnetz, Westnetz, Netze-BW, ENM, Städtische Werke Kassel, 50Hertz, Tennet, Amprion, TransnetBW) and equipment manufacturers (e.g. SMA, Enercon).



Eröffnung des KEE im Jahr 2009

ÖFFENTLICHKEITSARBEIT



Ansprechpartner

DR.-ING. CHRISTIAN NÖDING (EVS)

Titel

AUSWIRKUNGEN DER PANDEMIE AUF DIE LEHRE

title

PANDEMIC IMPACT ON TEACHING



Umbau der Fachgebiete-Bibliothek zum Videostudio
Reconstruction of the library specialized as videostudio

Am 11. März 2020 wurde Covid-19 offiziell zur Pandemie erklärt. Elf Tage später, am 22. März 2020, einigten sich Bund und Länder auf eine umfassende „Beschränkung sozialer Kontakte“ mit direkten Auswirkungen auf das am 01. April 2020 beginnende Sommersemester. Am Fachgebiet EVS wurde kurzfristig Audio- und Videotechnik aufgerüstet, um die nun praktizierte digitale Lehre bestmöglich auch ohne Präsenz der Studierenden zu ermöglichen.

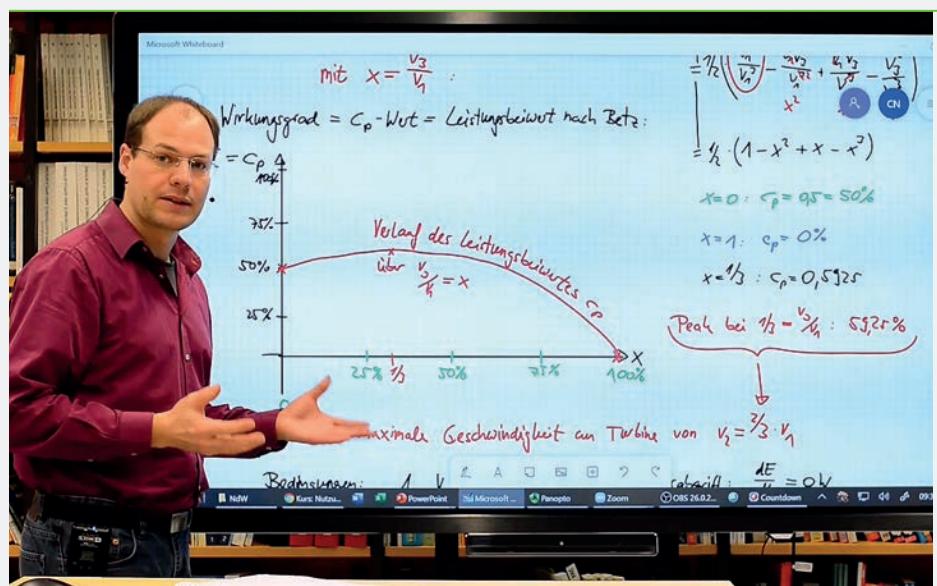
Zunächst wurden im ersten Halbjahr Videos produziert, die über eigene Server des Fachgebietes liefen, welche dann von den Studierenden als Video-on-Demand (VoD) abgerufen werden konnten. Im Verlauf des Sommersemesters 2020 standen seitens der Universität schließlich die Videoplattform „Panopto“, sowie Videokonferenzlösungen wie „WebEx“ und „Zoom“ zur Verfügung mit denen ein direkter Kontakt mit den Studierenden in hoher Videoqualität und – noch viel wichtiger – in Echtzeit möglich wurde.

Inzwischen werden die Lehrveranstaltungen wieder zu festen Zeiten als Livestream mit direkter Kommunikation mit den Studierenden angeboten, sowie im Nachgang für einen gewissen Zeitraum als VoD. Die Qualität der Lehre konnte somit so nah wie möglich an das Niveau der Präsenzlehre gehoben werden. Dennoch freuen wir uns auf eine baldmögliche Rückkehr in den Hörsaal.

On March 11th, 2020, Covid-19 was officially declared a pandemic. Eleven days later, on March 22nd, 2020, the federal and state governments agreed on a comprehensive “restriction of social contacts” with immediate influence on the summer semester beginning on April 1st, 2020. At the EVS department, audio and video technology was upgraded at short notice to enable the digital teaching that is now being practiced in the best way possible even without the presence of students.

Initially on the department's own servers, videos were produced in the first half of the year, which the students could access as video-on-demand (VoD). During the summer semester 2020, the university finally had a video platform “Panopto”, as well as video conferencing solutions such as “WebEx” and “Zoom” with which direct contact with the students is possible in high quality and – most important – in real time.

In the meantime, lectures are again offered on fixed times as a live stream with direct communication with the students, as well as afterwards for a certain period of time as VoD. Thus the quality of teaching could be raised almost to the level of classroom teaching. Nevertheless, we are looking forward to returning to the lecture hall as soon as possible.



Screenshot einer Live-Videositzung mit interaktivem Whiteboard im Hintergrund
Screenshot of a live-session with interactive whiteboard

Ansprechpartner

PROF. DR.-ING. HABIL. PETER ZACHARIAS (EVS)

Titel

10 JAHRE KDEE

Eröffnung des KDEE im Jahr 2009

Am 25. Juni 2009 wurde das „Kompetenzzentrum für Dezentrale Elektrische Energieversorgungstechnik“ kurz KDEE durch die damalige hessische Staatsministerin Eva Kühne-Hörmann, Hessisches Ministerium für Wissenschaft und Kunst (HMWK), Prof. Dr. Dieter Postlep, Präsident der Universität Kassel, Prof. Dr.-Ing. Josef Börcsök, Dekan des Fachbereichs Elektrotechnik/Informatik gemeinsam mit dem Leiter des KDEE Prof. Dr.-Ing. Peter Zacharias eröffnet.

Die Universität Kassel und das von 1988 bis 2009 bestehende ISET e.V. (Institut für Solare Energieversorgungstechnik, bis 2018 Fraunhofer IWES, heute Fraunhofer IEE) haben wesentlich dazu beigetragen, dass sich in der Region Nordhessen die dezentralen Energieversorgungssysteme sowohl als wissenschaftliche Schwerpunkte als auch in der industriellen Umsetzung etabliert haben. Gestartet mit dem Fachgebiet „Elektrische Energieversorgungssysteme“ (EVS) konnten in den vergangenen Jahren so auch die Fachgebiete „Energiemanagement und Betrieb elektrischer Netze“ (e²n), das Fachgebiet „Anlagen- und Hochspannungstechnik“ (AHT), sowie das Fachgebiet „Integrierte Energiesysteme“ (INES) für das Kompetenzzentrum gewonnen werden.

Die Gründung des KDEE folgte dem Bedarf nach einem Konzentrationspunkt zur Entwicklung innovativer Lösungen erneuerbarer Energiesysteme sowie deren Überführung in industrielle Anwendungen. Seit 2009 steht das KDEE als verlässlicher Partner mit seinen vier angegliederten Fachgebieten den nordhessischen und überregionalen Firmen, sowie den Projektträgern der Bundesministerien zur Seite. Zahlreiche industriell und öffentlich geförderte Projekte sowohl aus dem Grundlagen- als auch dem anwendungsnahen Bereich konnten so in den vergangenen Jahren gewonnen und erfolgreich zum Abschluss gebracht werden.

Der Ihnen vorliegende Zwei-Jahres-Bericht zeigt nun bereits zum achten Mal die vielseitigen Projekte der angegliederten Fachgebiete EVS, e²n, AHT und INES. Auf unserer Website <https://www.kdee.uni-kassel.de> können Sie zudem die vergangenen Jahresberichte als PDF einsehen.

title

10 years of KDEE

Eva Kühne-Hörmann, 2009



On June 25, 2009 the "Center of Competence for Decentralized Electrical Power Supply Technology" for short KDEE was established by the then Hessian Minister of State Eva Kühne-Hörmann, Hessian Ministry of Science and Art (HMWK), Prof. Dr. Dieter Postlep, President of the University of Kassel, Prof. Dr.-Ing. Josef Börcsök, Dean of the Department of Electrical Engineering / Computer Science together with the head of the KDEE Prof. Dr.-Ing. Peter Zacharias opened.

The University of Kassel and the ISET e.V. (Institute for Solar Energy Supply Technology, until 2018 Fraunhofer IWES, today Fraunhofer IEE), which existed from 1988 to 2009, have made a significant contribution to ensuring that decentralized energy supply systems in the North Hesse region are both scientific and industrial Have established implementation. Starting with the "Electrical Energy Supply Systems" (EVS) specialist field, the "Energy Management and Power System Operation" (e²n), "Plant and High Voltage Technology" (AHT) and "Integrated Energy Systems" specialist (INES) for the competence center.

The founding of the KDEE followed the need for a focus point for the development of innovative solutions for renewable energy systems and their transfer to industrial applications. Since 2009, the KDEE has been a reliable partner with its four affiliated specialist areas for North Hessian and national companies, as well as the project sponsors of the federal ministries. Numerous industrially and publicly funded projects from both the basic and application-related areas have been won over the past few years and brought to a successful conclusion.

For the eighth time, the two-year report presented to you shows the diverse projects in the affiliated subject areas EVS, e²n, AHT and INES. On our website <https://www.kdee.uni-kassel.de> you can also view the past annual reports as PDF.

Ansprechpartner

GABRIELA FREITAS, BERHARD SIANO, UNIVERSITÄT KASSEL, (KDEE/EVS)

title

PROJEKT ELEKTROBOOT „EBOOT“

title

PROJECT ELECTRIC BOAT „EBOOT“



Boot: Rapsody Yachts Heeg, NL, Baujahr 2009; L: 10,65 m; B: 2,55 m; T: 0,65m

Mit Verbrennungsmotoren betriebene Boote haben durch ihre Emissionen besonders negativen Einfluss auf Umwelt und Klima. Da Boote sehr langlebig sind, war es Ziel des Gemeinschaftsprojekts „eBoot“ zwischen dem Fraunhofer Institut IEE (Projektleitung) und der Universität Kassel KDEE/EVS (Prof. Dr. Peter Zacharias) sowie Prof. Dr. Werner Kleinkauf (Projektförderer) zur Demonstration ein Boot (s. Bilder, Rapsody R29) einer häufig vorkommenden Bootsklasse auf elektrischen Antrieb umzurüsten. Am Projekt wirkte unterstützend das Büro Yachtconsulting Michael Meister mit.

Aufgabe des KDEE/EVS war es, die Kommunikation zwischen den einzelnen Komponenten des Antriebs- und Steuerungssystems zu entwerfen und aufzubauen.

Durch besonderen Kontakt des Fraunhofer-Instituts zum VW-Werk in Kassel konnte anstatt des Dieselmotors der Firma Volvo Penta für das Projekt der neu entwickelte, in Serie produzierte E-Motor der voll elektrischen Modelle „ID.3“ und „ID.4“ (70 kW Dauerleistung) eingesetzt werden.

Auf dem Boot galt es folgende Haupt-Komponenten miteinander zu verbinden: Photovoltaik-Anlage (880 Wp), Speicherbatterie (30 kWh), Elektro-Antrieb, Bordnetz und Bootsteuerung. Dazu wurde neben einer 12 V-DC-Schiene (Standartausstattung im Boot) auch eine 320 V-Schiene (Batterie, E-Antrieb) aufgebaut. Die gesamte Steuerung wurde mit Hilfe einer Siemens SPS realisiert.

Boats powered by combustion engines have a particularly negative impact on the environment and climate due to their emissions. Since boats are very durable, the aim of the joint project "eBoot" between the Fraunhofer Institute IEE (project management) and the University of Kassel KDEE / EVS (Prof. Dr. Peter Zacharias) and Prof. Dr. Werner Kleinkauf (project sponsor) to convert a boat (see pictures, Rapsody R29) of a frequently occurring boat class to an electric drive for a demonstration. The office of Yachtconsulting Michael Meister was supporting the project.

The task of the KDEE / EVS was to design and build up communication between the individual components of the drive and control system.

Through special contact between the Fraunhofer Institute and the VW plant in Kassel achieved that instead of the diesel engine from Volvo Penta, the newly developed, mass-produced electric motor of the fully electric models "ID.3" and "ID.4" (70 kW continuous power) could be used for the project.

The following main components had to be connected on the boat: photovoltaic system (880 Wp), storage battery (30 kWh), electric drive, on-board network and boat control. In addition to a 12 V DC rail (standard equipment in the boat), a 320 V rail (battery, electric drive) was also installed. The entire control was implemented with the help of a Siemens PLC.



Entwicklungsteam (v.l.n.r): Roland Garber (Fraunhofer IEE), Gabriela Freitas (EVS), Werner Kleinkauf (Auftraggeber), Michael Meister (Bootsbaumeister / Yachtconsultant), Bernhard Siano (EVS)



Inbetriebnahme der Boardsysteme des Bootes durch Gabriela Freitas. Hier mit Professor Zacharias bei der feierlichen Übergabe des Bootes.

Durch die Integration eines bidirektionalen Wandlers (DC/DC 12V/320V; 1,8kW) ist ein Energiefluss zwischen den beiden DC-Schienen möglich.

Es bot sich an, die Instrumentierung auf dem eBoot durch ein modernes Touch-Display zu erweitern. Das Display übernimmt die Interaktion mit dem Benutzer als auch die Darstellung der erfassten Messwerte, Geschwindigkeit, aktueller Verbrauch aus den Akkus, Zustand der Systeme und Überwachung der Temperaturen im Kühlkreislauf des E-Antriebs. Eine besondere Herausforderung während der Umsetzung waren die knappen Platz-Verhältnisse in der „Rapsody R29“.

Im August 2020 war es dann so weit und die Rapsody konnte ihre Fahrtauglichkeit und Leistungen auf der Fulda unter Beweis stellen.

Folgende Leistungen wurden erreicht:

Maximale Geschwindigkeit auf dem Wasser flussaufwärts 15 Knoten ($\approx 28 \text{ km/h}$) Fahrdauer max. bis 10 % Restladung in den Akkus bei durchschnittlich 5 Knoten, (9,15 km/h) betrug 3 Stunden 10 Minuten. Dabei wurde eine Distanz von ca. 33 km zurückgelegt.

Ausblick:

Diesen Frühling/Sommer ist eine Erweiterung um eine Brennstoffzelle vorgesehen. Des Weiteren wird die Umrüstung des Gashebels in Verbindung mit der Gangschaltung (Vor- bzw. Rückwärtsfahrt) von der Bowdenzug-Steuerung auf eine elektronische Steuerung realisiert.

Für die Durchführung der Arbeiten waren verantwortlich: Roland Gaber, Fraunhofer IEE / Michael Meister, Yachtconsulting / Gabriela Freitas und Bernhard Siano, Uni Kassel KDEE/EVS.

The integration of a bidirectional converter (DC/DC 12V/320V; 1.8kW) enables energy to flow between the two DC rails.

It made sense to expand the instrumentation on the eBoot with a modern touch display. The display takes over the interaction with the user as well as the representation of the recorded measured values, speed, current consumption from the batteries, status of the systems and monitoring of the temperatures in the cooling circuit of the electric drive. The limited space available in the "Rapsody R29" posed a particular challenge during the implementation.

In August 2020 the time had come and the Rapsody was able to demonstrate its driving ability and performance on the Fulda.

The following characteristics could be achieved:

Maximum speed on the water upstream 15 knots ($\approx 28 \text{ km/h}$) Driving time max. Up to 10% residual charge in the batteries at an average of 5 knots, (9.15 km/h) was 3 hours 10 minutes. A distance of about 33 km was covered.

Outlook:

An extension to include a fuel cell is planned for this spring/summer. Furthermore, the conversion of the throttle lever in connection with the gear shift (forwards or backwards) from the Bowden cable control to an electronic control is implemented.



F&E PROJEKTE KDEE



Ansprechpartner

PROF. DR.-ING. HABIL. PETER ZACHARIAS



**Prof. Dr.-Ing. habil.
Peter Zacharias (EVS)**



**Prof. Dr.-Ing.
Martin Braun (e²n)**



**Prof. Dr.-Ing.
Albert Claudi (AHT)**



**Prof. Dr. rer. nat.
Clemens Hoffmann (INES)**

VORWORT FORSCHUNGSAKTIVITÄTEN

Die Entwicklung in der Energietechnik ist gekennzeichnet durch eine stetig zunehmende Vernetzung. Das heißt, Systemkomponenten unterschiedlichster Zweckbestimmung und Leistungsgröße werden zusammengeführt und erweitern die Basis zur Nutzung erschließbarer Energieressourcen. Diese haben jedoch unterschiedliche Eigenschaften von der Verteilung in der Fläche bis zur jahreszeitlichen Verfügbarkeit und kurzfristigen Volatilität. Die Weiterentwicklung von Standards für die Wechselwirkungen der Systemkomponenten, die Integration von Informations- und Kommunikationstechniken sowie von energietechnischen Komponenten zur Steuerung der Energieflüsse und Netzstabilisierung gehören zurzeit zu den wichtigsten Aufgabenstellungen in diesem Bereich.

Neben der Photovoltaik und der Nutzung von Biomasse hat die Windenergie im Bereich der erneuerbaren Energien für die Elektrizitätsversorgung die größte Bedeutung erlangt. Die zu erwartende große Steigerung des regenerativen Energieanteils in den nächsten Jahrzehnten, der überwiegend über Umrichter in das Netz eingespeist wird, bringt neue Herausforderungen an das Netz und die Vorsorger mit sich.

Energiebereitstellung über leistungselektronische Konverter hat sich in den letzten 20 Jahren von einer Anwender- zu einer Leittechnologie entwickelt. Schlüssel-Technologien sind insbesondere die Generator- und Umrichtertechnik sowie die netzverträgliche Gestaltung der Komponenten und Gesamtsysteme.

FOREWORD RESEARCH ACTIVITIES

The development in electrical engineering is characterised by an ever increasing interconnectedness. This means that system components of different purpose and performance are combined and extend the base for the use of accessible energy resources. However, these have different characteristics ranging from the distribution across space to the availability over the year and the short-term volatility. The further development of standards for the interactions of the system components, the integration of information and communication technologies as well as of energy-technical components for the control of the energy flows and network stabilization are currently one of the most important tasks in this area.

In addition to photovoltaics and the use of biomass, wind energy is currently amongst the most importants tasks in this area. The expected large increase in the regenerative energy share over the coming decades, which is mainly fed into the grid via converters, brings new challenges to the grid and the suppliers.

Power supply over power electronics converters has evolved over the last 20 years from a user technology to a control technology. Key technologies are, in particular, the generators and inverters as well as the network-compatible design of the components and overall systems.



Im Rahmen von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben zum Beispiel zur

- hocheffizienten Bereitstellung von Wirk- und Blindleistung für das Netz,
- Dezentralen Spannungsregelung und Power Quality Management,
- Hocheffizienten Energiewandler für elektrische Maschinen und andere Anwendungen,
- Veränderung der Kurzschlussleistung und Beeinflussung der Netzstabilität,
- Bereitstellung geregelter Kurzschlussleistung durch doppelt gespeiste Asynchrongeneratoren,
- Entwicklung eines magnetisch gelagerten Ringgenerators für 10 MW-Windkraftanlagen,
- Offshore-Netzintegration,
- Entwicklung neuer robuster Stellglieder für den Leistungsfluss in elektrischen Netzen

werden durch Dissertationen, Diplom-, Master- und Bachelor-Arbeiten zukunftsweisende Methoden erarbeitet, um dem Wandel in der elektrischen Energieversorgung gerecht zu werden.

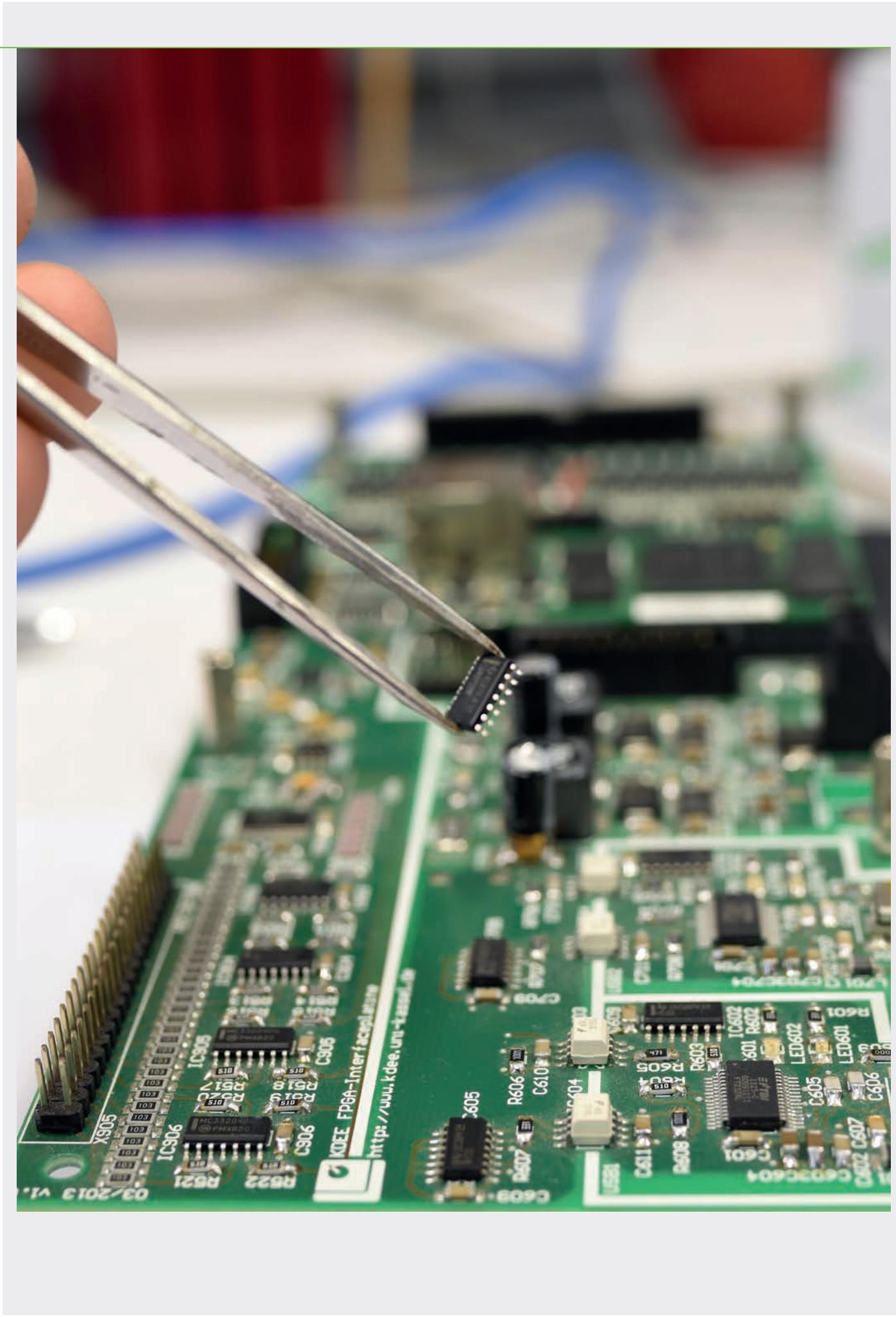
Leistungselektronische Einrichtungen sind die flexibelsten und die schnellsten Stellglieder für das Energiemanagement in derzeitigen und zukünftigen elektrischen Energienetzen. Ihre Konstruktion und Regelung erfordert spezielles Know-how, das am KDEE langfristig konzentriert und weiter entwickelt wird. Die Entwicklungsimpulse kommen sowohl aus der effizienten Nutzung der traditionellen Energieträger als auch aus den besonderen Anforderungen der neuen regenerativen Energieträger. Neue Energiewandlungskonzepte gestatten, diese auch allgemein zu nutzen. Die bereitgestellte „Rohenergie“ der Wandler genügt in der Regel nicht den standardisierten Nutzungsbedingungen in der Versorgung in stationären und mobilen Anwendungen. Leistungselektronische Wandler gestatten eine Aufbereitung dieser Rohenergie für den Endverbraucher mit höchsten Umwandlungsgraden. Sie ermöglicht die Integration verschiedenster Energiequellen und Speicher in ein Gesamtsystem.

Within the framework of research and development projects,

- *Highly efficient provision of active and reactive power for the grid,*
- *Decentralized voltage regulation and power quality management,*
- *Highly efficient energy converters for electrical machines and other applications,*
- *Change of short-circuit power and influence of grid stability,*
- *Provision of controlled short-circuit power by double-fed asynchronous generators,*
- *Development of a magnetically stored ring generator for 10 MW wind power plants,*
- *Offshore network integration,*
- *new robust actuators for the power flow in electrical networks*

will be developed in the frame of PhDs and student research projects to meet the changing requirements of electrical energy supply.

Power electronics devices are the most flexible and the fastest actuators for energy management in current and future electrical power grids. Their design and control requires special know-how, which is concentrated and developed at the KDEE in the long term. The development impulses come from the efficient use of the traditional energy carriers as well as from the special requirements of the renewable energy sources. New energy conversion concepts also allow them to be used in general. The “raw energy” provided by converters generally does not meet the standardized conditions of use in stationary and mobile applications. Power electronics converters allow a processing of this raw energy for the end user with highest efficiency. It enables the integration of a wide range of energy sources and storages within an overall system.



EVS

Elektrische
EnergieVersorgungsSysteme

Ansprechpartner

PROF. DR.-ING. HABIL. PETER ZACHARIAS

Titel

**DAS FACHGEBIET ELEKTRISCHE ENERGIE-
VERSORGUNGSSYSTEME (EVS)**

title

**DEPARTMENT OF ELECTRIC POWER SUPPLY
SYSTEMS (EVS)**

EVS

Elektrische EnergieVersorgungsSysteme

Lehre und Forschung im Fachgebiet sind ausgerichtet auf Anlagen und Systeme zur elektrischen Energieversorgung sowie auf die Entwicklung leistungselektronischer Bauelemente und Baugruppen für solche Systeme. Sie umfassen dabei die Entwicklung von Techniken zur Nutzung erneuerbarer Energiequellen (z. B. Sonne, Kleinwasserkraft, Biogas und Wind) sowie leistungselektronische Wandler in mobilen Anwendungsbereichen.

Prof. Zacharias ist verantwortlicher Leiter des Fachgebietes EVS. Dr.-Ing. Alejandro Aganza Torres unterstützt die wissenschaftlichen Mitarbeiter bei der Forschung an neuen magnetischen Bauelementen und fördert den wissenschaftlichen Gerätebau am EVS. Dr.-Ing. Christian Nöding lehrt als akademischer Rat im Bereich der Brennstoffzellen- und Windkrafttechnik. Er koordiniert zudem im operativen Geschäft organisatorisch und inhaltlich die Forschungsaufträge des Fachgebietes.

Seit vielen Jahren sind zudem die beiden externen Wissenschaftler Prof. Dr.-Ing. Harald Bradke, Leiter des Competence Centers Energiepolitik und Energiesysteme beim Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) und Prof. Dr.-Ing. Mike Meinhardt, Leiter des Wissensmanagements der SMA Solar Technology AG eine wertvolle Ergänzung in der Lehre.

Teaching and research activities in the department are focused on plants and systems for the electrical power supply as well as the development of electronic components and subsystems for such systems. These include the development of techniques for the use of renewable energy sources (e.g. sun, small hydropower, biogas and wind) as well as power electronic converters in mobile application areas.

Prof. Zacharias is responsible for the department of EVS. Dr.-Ing. Alejandro Aganza Torres is researching in the field of new magnetic components and is supporting the construction of scientific equipment. Dr.-Ing. Christian Nöding teaches as an academic advisor in the field of fuel cells and wind power technologies. In addition, he coordinates the organisation and content of the research assignments of the department in the operative business.

For many years, two external scientists are a valuable addition to our teaching team: Prof. Dr.-Ing. Harald Bradke, head of the Competence Center energy policy and energy systems at the Fraunhofer Institute for System and Innovation research (ISI), and Prof. Dr.-Ing. Mike Meinhardt, head of knowledge management at SMA Solar Technology AG.



Prof. Dr.-Ing. habil.
Peter Zacharias



Dr.-Ing.
Christian Nöding



Dr.-Ing. Alejandro
Aganza Torres



Prof. Dr.-Ing.
Harald Bradke



Prof. Dr.-Ing.
Mike Meinhhardt

Das Fachgebiet bietet folgende Lehrveranstaltungen an:
The following courses are offered by the department:

- | | |
|--|---|
| ▪ Leistungselektronik für regenerative und dezentrale Energiesysteme | Prof. Dr.-Ing. Mike Meinhhardt, SMA Solar Technology AG |
| ▪ Simulation regenerativer Energieversorgungssysteme | Prof. Dr.-Ing. Mike Meinhhardt, SMA Solar Technology AG |
| ▪ Energiewirtschaftliche Aspekte der Energietechnik I & II | Prof. Dr.-Ing. Harald Bradke, FhG-ISI Karlsruhe |
| ▪ Elektrische Systeme in der Formula Student | Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Zacharias |
| ▪ Leistungselektronik | Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Zacharias |
| ▪ Praktikum Leistungselektronik / Energietechnisches Praktikum I und II | Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Zacharias |
| ▪ Grundlagen der Energietechnik | Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Zacharias |
| ▪ Magnetische Bauelemente | Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Zacharias |
| ▪ Grundlagen der Elektro- und Messtechnik | Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Zacharias |
| ▪ Brennstoffzellentechnik in der Energieversorgung | Dr.-Ing. Christian Nöding |
| ▪ Regelung und Netzintegration von Windkraftanlagen | Dr.-Ing. Christian Nöding |
| ▪ Seminar Netzintegration dezentraler Einspeisesysteme | Dr.-Ing. Christian Nöding |
| ▪ Nutzung der Windenergie | Dr.-Ing. Christian Nöding |

Ansprechpartner

EDUARDO FACANHA DE OLIVEIRA, M.ENG.; SEBASTIAN SPRUNCK, M.SC.; JONAS PFEIFFER, M.SC. (EVS)

Titel

**HOCHEFFIZIENTE, LANGLEBIGE UND
KOMPAKTE LEISTUNGSELEKTRONIK AUF
GaN-BASIS FÜR DIE ELEKTROMOBILITÄT DER
ZUKUNFT (HELENE)**

title

**HIGH-EFFICIENT, DURABLE AND COMPACT
GaN-BASED POWER ELECTRONICS FOR
FUTURE ELECTROMOBILITY**



Finaler Demonstrator des
bidirekionalen DC/DC-Wandlers
*Functional prototype of the Final
prototype of the bidirectional
DC/DC-Converter*

Von Januar 2017 bis März 2020 beteiligte sich das KDEE an einem Forschungsprojekt des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) zur Untersuchung des Einsatzes von Galliumnitrid-Halbleitern in Fahrzeugsystemen. Das Fachgebiet EVS hatte dabei die Aufgabe, unter der Verwendung von GaN-Halbleiterschaltern einen galvanisch isolierten, bidirekionalen DC/DC-Wandler zwischen Hochvolt-Batterie (400 V) und Niedervolt-Batterie (48 V) mit einer Nennleistung von 4 kW zu entwickeln, der den aktuellen Stand der Technik in Effizienz und Leistungsdichte übertrifft. Die Forschungsschwerpunkte des EVS lagen dabei vor allem in der Charakterisierung neuartiger GaN-Bauelemente und der Entwicklung effizienter Kühlungsstrategien, um so eine Miniaturisierung der Halbleiter-Schaltzelle anzustreben. Darüber hinaus wurden Strategien zur Volumen- bzw. Gewichtsreduktion von magnetischen Bauelementen untersucht.

From January 2017 to March 2020 the KDEE participated in a research project funded by the German Federal Ministry of Education and Research that intends to investigate a possible application of gallium nitride semiconductors in automotive systems. The department EVS was assigned the task to develop a galvanically isolated bidirectional DC/DC Converter with a nominal power of 4 kW by using GaN-semiconductor devices. It was dedicated to transfer power between the high voltage battery (400 V) and the low voltage battery (48 V) of a passenger car and has to exceed the current state of the art regarding efficiency and power density. The research focus of the EVS was on the level of components, especially the characterization of novel GaN devices and the development of innovative, efficient cooling strategies, so as to strive for miniaturization of the semiconductor switching cell. In addition, strategies for volume and weight reduction of magnetic components were investigated.



Seitenansicht des finalen Prototyps
Side view of the final prototype

Im Verlauf des Projekts wurde ein funktionsfähiger Demonstrator entwickelt, aufgebaut und getestet, der die zu Beginn festgelegten Forschungsziele erfüllt und teilweise sogar übertrifft. Weitere Optimierungspotentiale in Bezug auf eine weitere Volumenverringerung und Effizienzsteigerung wurden aufgezeigt.

Auf Basis des Projekts wurden elf wissenschaftliche Publikationen veröffentlicht und 18 Projekt-, Bachelor- oder Masterarbeiten durchgeführt. Zudem stellt das Projekt die Grundlage für drei Dissertationen dar. Der detaillierte Abschlussbericht des Teilvorhabens ist über die Technische Informationsbibliothek (TIB) unter dem Förderkennzeichen 16EM00234 bzw. der DOI 10.2314/KXP:173688543X online als PDF abrufbar.

In the project a functioning prototype was developed, built and tested. It met and, in some cases, exceeded the defined research objectives. Further optimization potentials regarding volume reduction and efficiency enhancement were pointed out.

Based on the project, eleven academic/scientific papers were published and 18 project, bachelor or master theses were supervised. Furthermore, three doctoral theses are based on the project. A detailed project-report is available via the "Technische Informationsbibliothek" (TIB) under the project funding number 16EM00234 or the DOI 10.2314/KXP:173688543X.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Bundesministerium für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 16EM00234

Ansprechpartner

DIPL.-ING. FLORIAN FENSKE: MARC FASSHAUER, M.SC. (EVS)

Titel

NEUARTIGE ROBUSTE STELLGLIEDER ZUM BLINDELEISTUNGSMANAGEMENT IN VERTEILNETZEN (NR2-RPC)

Das Ziel des Gesamtvorhabens lag in der Entwicklung von neuartigen robusten Stellgliedern für den Einsatz zum Blindeleistungsmanagement in Verteilnetzen, um hierdurch die Aufnahmefähigkeit der Energienetze zu steigern. Ausgangspunkt stellte die Identifizierung von magnetischen Wirkkonzepten zur variablen Bereitstellung von Blindeleistung im Verteilnetz, unter den normativen Anforderungen im öffentlichen Versorgungsnetz, dar.

Für diesen Zweck wurden magnetisch steuerbare Wirkprinzipien und ihre Eignung als Stellglied in einem passiven Filterkreis zur Verbesserung der Spannungsqualität, sowohl in der Theorie als auch anhand von aufgebauten Funktionsmustern im Labor, eingehend untersucht. Es zeigte sich, dass neben dem klassischen Ansatz eines Transduktors (MCR-Konzept), das VAG-Konzept zur Steuerung der Induktivität in Frage kommt. Weiterhin wurde dargestellt, wie das VAG-Konzept in die Standardbauform einer 3-phasigen Drossel zu integrieren ist, ohne hierbei das Bauvolumen zu vergrößern.

Durch den aufgebauten Demonstrator konnte die Verstellung der Impedanz des Saugkreises durch die magnetischen Stellglieder erfolgreich nachgewiesen werden. Die Untersuchungen ergaben, dass hierbei das MCR-Konzept die größten Vorteile hinsichtlich der Effizienz aufweist. Die Skalierbarkeit des Transduktors, im Vergleich zum VAG-Konzept, wirkt sich positiv auf die Dimensionierung eines Stromstellers zur Bereitstellung des Steuerstroms aus. Das Gesamtziel konnte mit der Realisierung eines magnetisch steuerbaren Stellglieds zur Kompensation von Grund- und Verzerrungsblindeleistung erreicht werden.

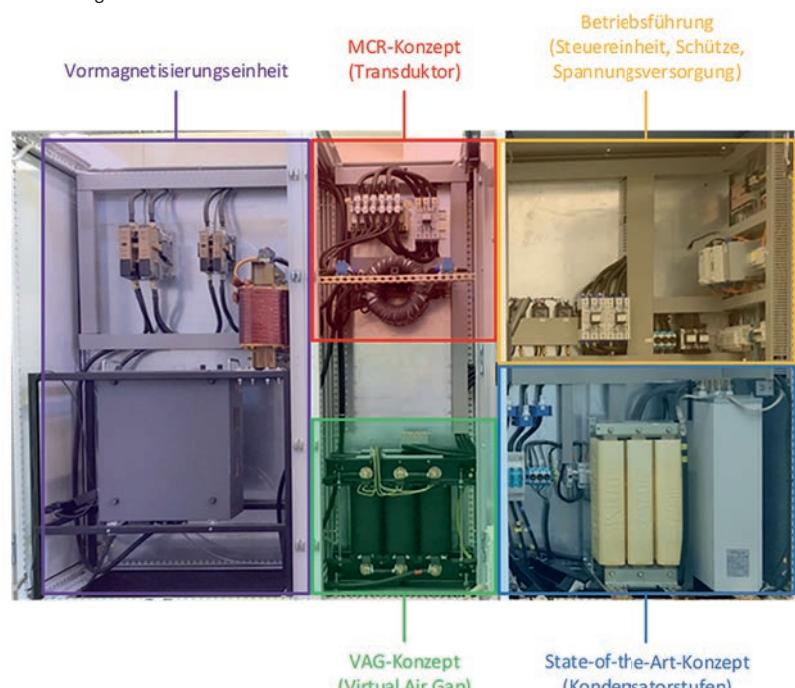
title

NOVEL ROBUST REGULATORS FOR THE REACTIVE POWER CONTROL IN DISTRIBUTION NETWORKS (NR2-RPC)

The aim of the project was to develop new types of novel robust regulators for use in reactive power management in distribution grids in order to increase the capacity of the power grid. The starting point was the identification of magnetic concepts for the variable provision of reactive power in the distribution grid under the normative requirements of the public supply grid.

For this purpose, these principles of operation and their suitability as regulators in a passive filter circuit for improving the voltage quality were investigated in detail in theory as well as based on constructed functional samples in the laboratory. It was demonstrated that in addition to the classical approach of a magnetic amplifier (MCR concept), the VAG concept can be used to control the inductance. Furthermore, it was shown how the VAG concept can be integrated into the standard design of a 3-phase choke without increasing the construction volume.

The demonstrator setup was used to prove that the impedance of the suction circuit can be adjusted by the magnetic regulators. The investigations showed that the MCR concept has the greatest advantages in terms of efficiency. The scalability of the transductor compared to the VAG concept has a positive effect on the dimensioning of a current controller to provide the control current. The total goal could be achieved with the realization of a magnetically controllable regulator for the compensation of fundamental and distortion reactive power.



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Gefördert durch: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 0324106A

Ansprechpartner
XIAO YU, M.SC. (EVS)

Titel

**KMUI-MODULARE LEISTUNGSELEKTRONIK
ZUM BATTERIEMANAGEMENT AUF DER
EBENE EINZELNER ZELLEN (MCIB)**

Ein Energiesystem mit fluktuierenden Energiequellen braucht leistungsfähige und kostengünstige Energiespeicher, die selbst möglichst geringe negative Umweltauswirkungen haben. Verschiedene Industriezweige in Deutschland bzw. Europa stehen in den nächsten Jahren vor enormen Herausforderungen. Die Forderung nach besserem Klimaschutz lässt sich in vielen Bereichen nur im Lösungsraum „All Electric“ erfüllen. In der Folge werden leistungsfähige Batteriespeicher als Teil dieser Lösungen in verschiedenen Anwendungen benötigt.

Im Projekt MCIB sollen leistungselektronische Topologien für kostengünstigere und leistungsfähigere Batteriespeichersysteme erforscht und entwickelt werden, die dazu beitragen, die Risiken (hinsichtlich der Qualität und Lebensdauer der Batteriezellen) zu verringern und die Chancen (nutzbarer Herstellerpool von Batteriezellen = Käufermarkt) der skizzierten Entwicklungen zu nutzen.

Die zentrale Aufgabe im Projekt MCIB liegt in der Erforschung der Skalierbarkeit des gewählten Technologiekonzeptes. Ein weiteres Ziel ist es, die technischen Grundlagen für ein modulares, einfach montierbares elektromechanisches Konzept der Batteriepacks zu legen. Die Untersuchung soll mit der Zielapplikation eines einphasigen, AC-gekoppelten Batteriespeichersystems erfolgen. Der im Rahmen von MCIB vorgeschlagene Lösungsansatz sieht vor, jede Zellebene mit vier Leistungshalbleitern (siehe Abbildung) und einem eigenen Controller auszurüsten.

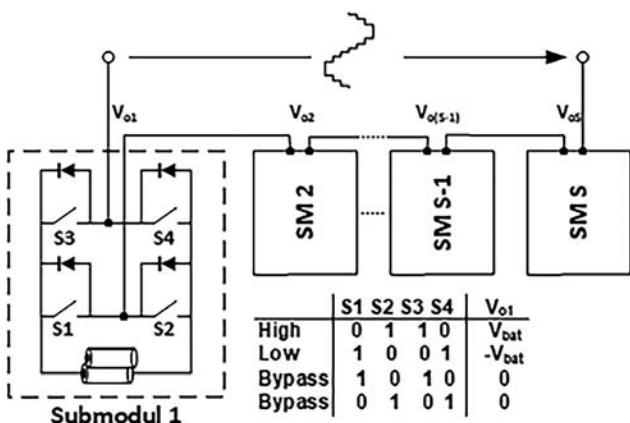
title
MODULAR POWER ELECTRONICS FOR BATTERY MANAGEMENT AT THE CELL LEVEL

An energy system with fluctuating energy sources needs high-performance and inexpensive energy storage devices that have the lowest possible negative environmental impacts. Various branches of industry in Germany and Europe will face enormous challenges in the next few years. In many areas, the demand for better climate protection can only be met by means of "All Electrification". As a result, high-performance battery storage systems are required as part of these solutions in various applications.

In the MCIB project, power electronic topologies for more cost-effective and more powerful battery storage systems will be researched and developed, which help to reduce the risks (regarding the quality and service life of the battery cells) and to use the opportunities (usable manufacturer pool of battery cells = buyers' market) of the developments outlined above.

The central task in the MCIB project is the research of the scalability of the technology concept. Another goal is to lay the technical foundations for a modular, easy-to-assemble electromechanical concept for the battery packs. The investigation is to be carried out with the target application of a battery storage system coupled with single-phase AC. In the proposed approach, each cell level is equipped with four power semiconductors (see figure) and its own controller.

The KDEE/EVS is responsible for comparing different topologies, semiconductor investigations of different Mosfets, driver concept, measurement and overvoltage protection for the whole system.



Das KDEE/EVS ist für Vergleich verschiedener Topologien, Halbleiteruntersuchungen unterschiedlicher Mosfets, Treiberkonzept, Messtechnik und Überspannungsschutz des Gesamtsystems verantwortlich. | *Influence of Winding Material on Field Distribution*

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Bundesministerium für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 16ME0143

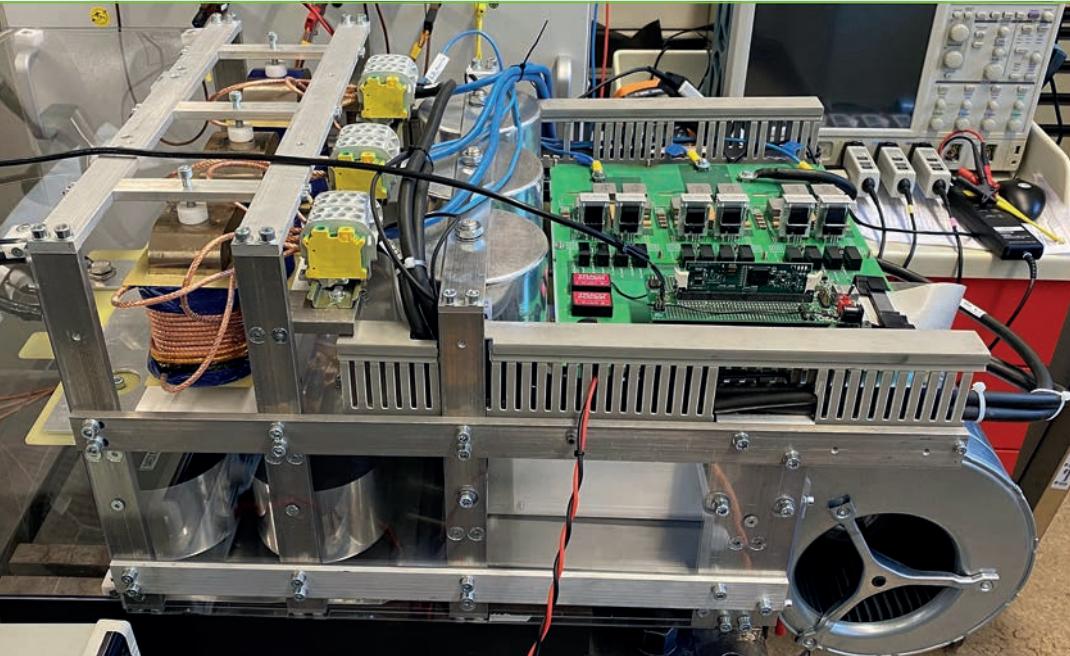
Ansprechpartner

DIPL.-ING MANUEL MÜNCH; MAHMOUD SAEIDI, M.SC.; RAOUL MITZE, M.SC. (EVS)

Titel

**PVKRAFTWERKE2025: INNOVATIONEN FÜR
DIE NÄCHSTE GENERATION PV-KRAFTWERKE**

**INNOVATION FOR THE NEXT GENERATION
OF PV-POWER PLANTS**



Technologiedemonstrator
Technology demonstrator

Neue Bauelemente, Systemlösungen und Wechselrichter für kostengünstige und netzdienliche Stromversorgung

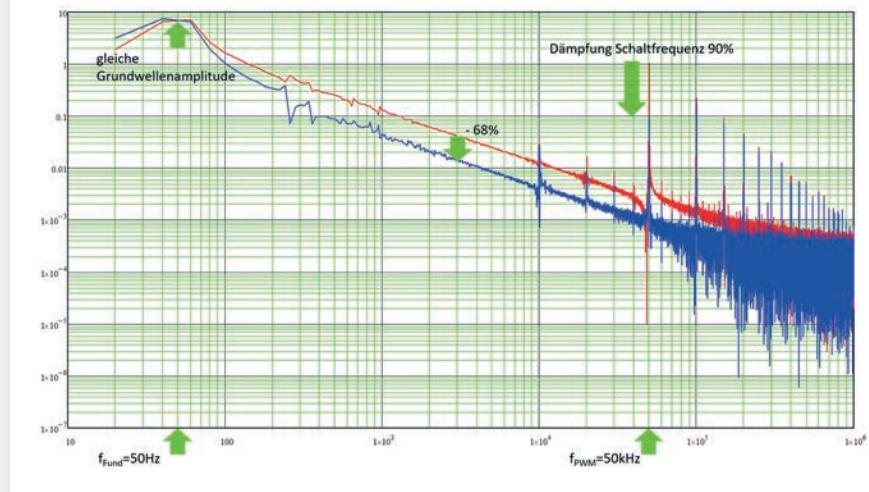
Zwischen Dezember 2017 und März 2021 forschte das EVS im Rahmen des Bundesprojekts „PV-Kraftwerk2025“ an einer neuen Generation von PV-Großanlagen, mit dem Ziel die Versorgungssicherheit und Systemstabilität dieser Kraftwerke zu verbessern. Die System- und Netzbetriebskosten sollten sich dabei trotz einer höheren Netzintegration nicht erhöhen. Hierzu wurde eine Kostensenkung bei Komponenten der Systemtechnik, speziell beim Wechselrichter, angestrebt. Ein Ansatz war zunächst der Einsatz innovativer Halbleitertechnik auf Basis von Silizium-Carbid (SiC) des Kooperationspartners Infineon Technologies AG.

Am EVS wurde zur Validierung der Voruntersuchungen ein Technologiedemonstrator unter Verwendung des im Projekt entwickelten 2 kV-SiC-MOSFETs von Infineon aufgebaut. Der dreiphasige Wechselrichter der 100 kW-Klasse wurde zudem mit einer neu entwickelten

New Components, system solutions and inverter for cost effective and grid convenient power supply

Between December 2017 and March 2021, the EVS researched a new generation of large-scale PV systems as part of the federal project "PV-Kraftwerk2025" with the aim of improving the security of supply and system stability of these power plants. The system and network operating costs should not increase despite greater network integration. To this end, the aim was to reduce costs for system technology components, especially for the inverters. One approach was initially the use of innovative semiconductor technology based on silicon carbide (SiC) from the cooperation partner Infineon Technologies AG.

To validate the preliminary investigations, a technology demonstrator was set up at the EVS using Infineon's new 2 kV SiC MOSFETs developed in the project. The three-phase inverter of the 100 kW class was also equipped with a newly developed additional



Spektrum für B6-Phasenstrom (rot) und kompensiertem Laststrom (blau) bei

ohmscher Last $R = 12,66\Omega$ und aktiver Betriebsführung ($t_{\text{tot}} = 1,3\mu\text{s}$)

Spectrum of B6-Phase current (red) and compensated Loadcurrent (blue) at

ohmic load $R=12.66\Omega$ and active control ($t_{\text{dead}}=1.3\mu\text{s}$)

Zusatzfunktion zur aktiven Reduzierung des Stromrippels und des THDs ausgestattet. Dies soll auch in zukünftigen Anwendungen eine erhebliche Größenreduzierung der magnetischen Komponenten erlauben. Abbildung 2 zeigt den Vergleich des Phasenstroms bei herkömmlichen Betrieb (rot) und mit aktivierter Kompensationsschaltung (blau) im Frequenzspektrum.

Mit dem bei SMA entwickelten und aufgebauten DC/DC-Wandler der 100kW-Klasse konnte ein Gesamtkonzept für zukünftige PV-Kraftwerke erarbeitet und das Projekt zusammen mit den Konsortialpartnern schließlich erfolgreich zum Abschluss gebracht werden.

function for the active reduction of the current ripple and the THD. This should also allow a considerable size reduction of the magnetic components in future applications. Figure 2 shows the comparison of the phase current with conventional operation (red) and with activated compensation circuit (blue) in the frequency spectrum.

With the DC/DC converter of the 100kW class developed and built by SMA, an overall concept for future PV power plants was developed and the project was finally brought to a successful conclusion together with the consortium partners.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Gefördert durch: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 0324211C

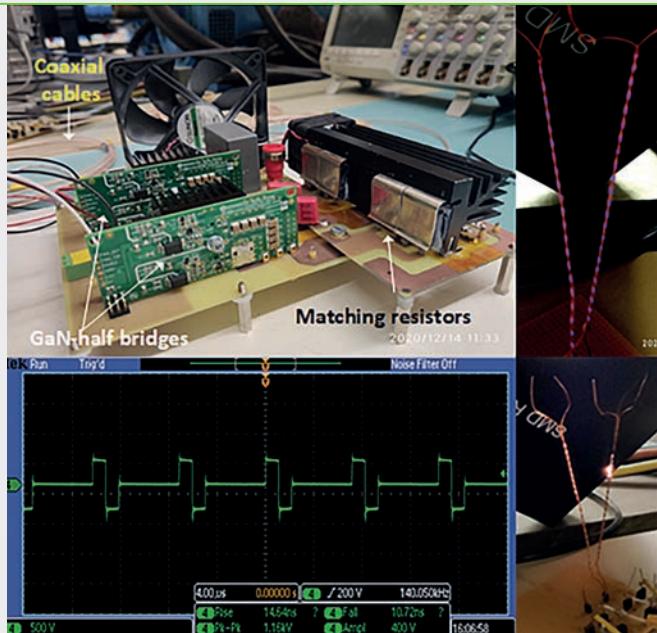
Ansprechpartner
XIAO YU, M. SC. (EVS)

Titel

ALTERUNG DER ISOLIERSTOFFE UNTER WIEDERHOLTER STOSSSPANNUNGSBELASTUNG MIT HOHEM DV/DT

title

AGING OF ISOLATION-MATERIALS UNDER REPETITIVE IMPULSE VOLTAGE STRESS WITH HIGH DV/DT.



Neue Halbleitertechnologien wie z.B. schnelle GaN-HEMTs können bei Schaltvorgängen hohe Spannungssteilheiten (dv/dt) durchaus von 250 V/ns erzeugen. Dies führt zu einer signifikant höheren Belastung vor allem von Isolationsmaterialien im Vergleich zu etablierten Si-Halbleitern. Durch hohe Wiederholungsraten (hohe Schaltfrequenzen) kann dies die Isolationsmaterialien schädigen, zu Teilentladungen und schlussendlich Durchschlägen führen. Im Rahmen eines ECPE-Projektes wurde am EVS ein Testgenerator zur Überprüfung verschiedener Isolierstoffe entwickelt, um die Langzeitstabilität relevanter Isolationsmaterialien unter realen Geometrien und Umweltbedingungen zu untersuchen. Mittels beschleunigter Lebensdauertests sollen somit verschiedene Materialien getestet und analysiert werden.

Das entwickelte Testgerät auf Basis eines Vollbrückenwechselrichters mit GaN-Halbleitern verwendet ausgangsseitig einen Leitungstransformator, der sich aufgrund seiner hohen Bandbreite und hohen dv/dt -Eigenschaften hervorragend für diese Aufgabe eignet. Eine geschickte Kombination aus Magnesium-Zink-, bzw. Nickel-Zink-Ferriten mit Koaxialkabeln erlaubt Ausgangssignale mit einem hohen Spannungsniveau, einer hohen Spannungssteilheit und einer hohen Wiederholungsrate. Es konnten schließlich typische Korona-Entladungen und elektrische Ausfälle an den zu untersuchenden Isolierstoffen beobachtet werden (siehe Bilder).

Oben links: Entwickelter Testgenerator; unten links: gemessene Ausgangsimpulse ($Pk-Pk$: 1.16 kV \times 2, Abfallzeit: 10 ns, Wiederholrate: 140 kHz, Eingangsspannung: 400 V); oben rechts: Corona-Entladung um die verdrillten Paare als die belasteten Prüflinge; unten rechts: Durchschlag

Top left: Developed test generator; bottom left: measured output pulses ($Pk-Pk$: 1.16 kV \times 2, fall time: 10 ns, repetitive rate: 140 kHz, input voltage: 400 V); top right: Corona discharge around the stressed twisted pairs; bottom right: electrical breakdown

New semiconductor technologies such as fast GaN-HEMTs can generate high voltage slopes (dv/dt) of 250 V/ns during switching processes. This leads to a significantly higher load, especially on insulation materials, compared to established Si semiconductors. Due to high repetition rates (high switching frequencies), this can damage the insulation materials, lead to partial discharges and breakdowns. As part of an ECPE project, a test generator was developed at the EVS to check various insulation materials in order to examine the long-term stability of relevant insulation materials under real geometries and environmental conditions. Various materials are to be tested and analyzed by means of accelerated service life tests.

The test device developed on the basis of a full-bridge inverter with GaN semiconductors uses a cable-transformer on the output side, which is ideally suited for this task due to its high bandwidth and high dv/dt properties. An advantageous combination of magnesium-zinc and nickel-zinc ferrites with coaxial cables allows output signals with a high voltage level, a high voltage gradient and a high repetition rate. Finally, typical corona discharges and electrical failures were observed in the insulating materials to be examined (see pictures).

Projektpartner: CRW Engineering UG, Fraunhofer Institute for Microstructure of Materials and Systems IMWS

Gefördert durch: European Center for Power Electronics ECPE 2020/PP03

Ansprechpartner

DIPL.-ING. FLORIAN FENSKE (EVS)

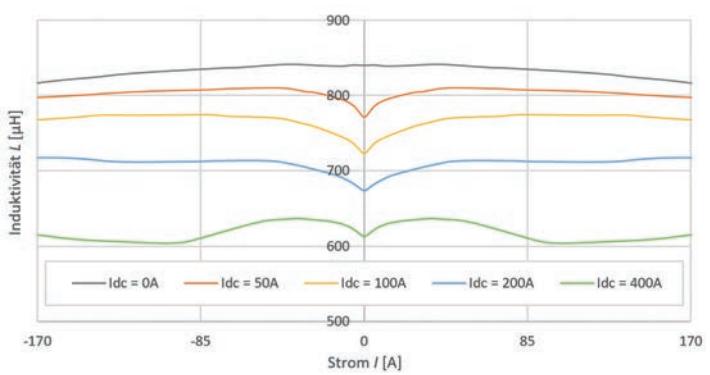
Titel

FORSCHUNG UND ENTWICKLUNG – AUSLEGUNG UND UNTERSUCHUNG VON MAGNETISCH STEUERBAREN DROSSELN

Drosseln stellen ein robustes und zuverlässiges Bauteil dar, wobei diese in der Impedanz nicht zu variieren sind. Eine Variation, ohne mechanische Zusatzkomponenten, ist jedoch wünschenswert, da hierdurch eine bessere Adaption in der Anwendung zu erreichen wäre. Als Anwendungen sind beispielsweise Sinusfilter, Blindleistungskompensationsanlagen oder Speicherdrosseln anzuführen.

Für variable Drosseln wird das ferromagnetische Kernmaterial genutzt, welches das magnetische Feld führt und einen Sättigungseffekt aufweist bei welchem sich das Material annähernd wie Luft verhält. Die Sättigung des Kernmaterials wird durch die Einprägung eines weiteren Feldes mit einem Steuerstrom erreicht (Vormagnetisierung), wobei eine Absenkung der Impedanz erfolgt und der Effekt eines „virtuellen Luftspalts“ entsteht.

Eine Auslegung dieser steuerbaren Drosseln erfolgt unter Berücksichtigung der Geometrie sowie der Materialeigenschaften des Blechpaket und den elektrischen Parametern. Hierbei ist es möglich, eine Standardbauform einer 3-phägen Drossel in der Impedanz abzusenken, ohne das Bauvolumen einer Standarddrossel zu vergrößern. Dazu werden die Haltebolzen zur Implementierung einer Vormagnetisierung genutzt, welche das Blechpaket mechanisch fixieren.



Induktivitätskennlinie einer steuerbaren Drossel vs. Steuerstrom

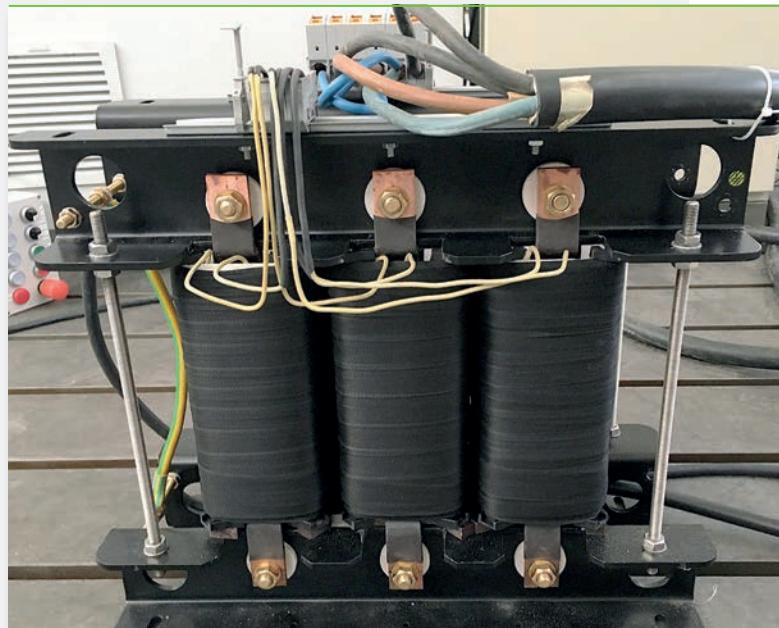
Inductance characteristic of a controllable choke vs. control current

Gefördert durch:

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

title

RESEARCH AND DEVELOPMENT – DESIGN AND INVESTIGATION OF MAGNETICALLY CONTROLLABLE CHOKES



Steuerbare Drossel eines Sinusfilter mit 120 A
Controllable choke of a sinus filter with 120 A

Chokes are a robust and reliable component, whereby the impedance cannot be varied. However, a variation without additional mechanical components is desirable, because this would lead to a better adaptation in the application. Applications for example are sinusoidal filters, power factor correction systems or storage chokes.

For variable chokes, the ferromagnetic core material is used, which conducts the magnetic field and exhibits a saturation effect in which the material behaves approximately like air. The saturation of the core material is achieved by impressing another field with a control current (premagnetization), resulting in a reduction of the impedance and creating the effect of a "virtual air gap".

A design of these controllable chokes is made under consideration of the geometry as well as the material properties of the laminated package and the electrical parameters. Here it is possible to lower the impedance of a standard 3-phase choke without increasing the construction volume of a standard choke. For this purpose, the retaining bolts are used to implement a bias magnetization, which mechanically fixes the laminated core.

Gefördert durch: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 0324106A

Ansprechpartner

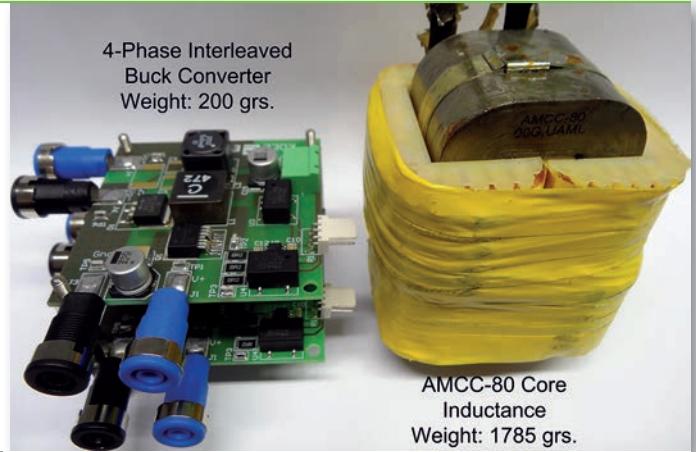
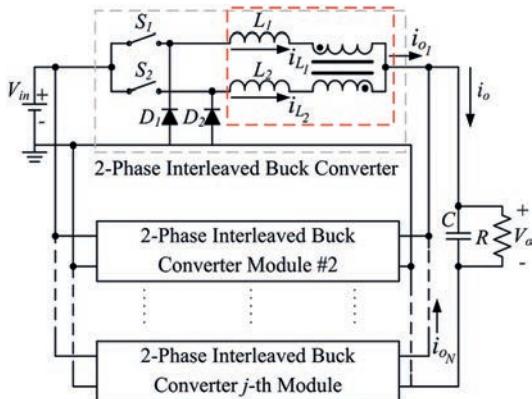
DR.-ING. ALEJANDRO AGANZA TORRES (EVS)

Titel

MAGNETISCH GEKOPPELTER INTERLEAVED ARBEITENDER KONVERTER FÜR ANWENDUNGEN IN STEUERBAREN MAGNETISCHEN BAUELEMENTEN

title

MAGNETICALLY-COUPLED INTERLEAVED CONVERTER FOR APPLICATIONS IN CONTROLLABLE MAGNETIC DEVICES



Modular magnetically-coupled Interleaved Buck Converter for Controllable Magnetic Devices Applications and comparison with a series inductance.

Modularer, magnetisch gekoppelter, interleaved arbeitender Abwärtswandler für steuerbare magnetische Bauelemente und Vergleich mit einer Serieninduktivität.

Steuerbare magnetische Bauelemente, die durch aktive DC-Vormagnetisierung der Magnetkerne realisiert werden, wurden und werden am KDEE für verschiedene Anwendungen entwickelt. Diese reichen von Energiewandlern bis zur Oberwellenkompensation in Hochleistungssystemen. Unabhängig von der Anwendung wird ein "idealer" Gleichstrom zur Vormagnetisierung des Kerns benötigt, was in der Regel durch eine Reihenschaltung einer Spannungsquelle mit sehr großer Induktivität erreicht wird. Diese Lösung weist mehrere Nachteile auf, da ihr Volumen und Gewicht für die Integration kompakter Lösungen beträchtlich sind; außerdem ist angesichts des Wertes der Reiheninduktivität das dynamische Verhalten der Stromquelle sowie ihre Modularität begrenzt.

Die Entwicklung modularer, magnetisch gekoppelter, interleaved arbeitender Tiefsetzsteller ermöglicht eine kompakte Gleichstromquelle, die als aktive Gleichstrom-Vormagnetisierungseinheit für steuerbare magnetische Bauelemente verwendet werden kann. Dadurch kann beträchtliche Volumen- und Gewichtsreduzierung mit schnellerem dynamischen Verhalten und der zusätzlichen Modularität und Flexibilität erreicht werden.

Controllable magnetic devices realized through active DC pre-magnetization of the magnetic cores have and are being developed at the KDEE for several applications, from power converters to harmonic compensation in high-power systems. Regardless of the application, an "ideal" DC current is required to pre-magnetize the core, which is usually achieved by a series connection of a voltage source with a very large inductance. This solution presents several drawbacks as its volume and weight are considerable for the integration of compact solutions; also, given the value of the series inductance, the dynamic response of the current source is limited as well as its modularity.

The development of modular magnetically-coupled interleaved Buck converters enables a compact DC source which can be used as an active DC pre-magnetization unit for controllable magnetic devices, achieving a considerable reduction in volume and weight with faster dynamic response and the added modularity and flexibility.

Ansprechpartner

KHANH-HUNG NGUYEN, M.SC. (EVS)

Titel

UNTERSUCHUNG DER EINFLÜSSE VON PV-WECHSELRICHTERN AUF DAS NETZ UNTER ASYMMETRISCHEN BEDINGUNGEN

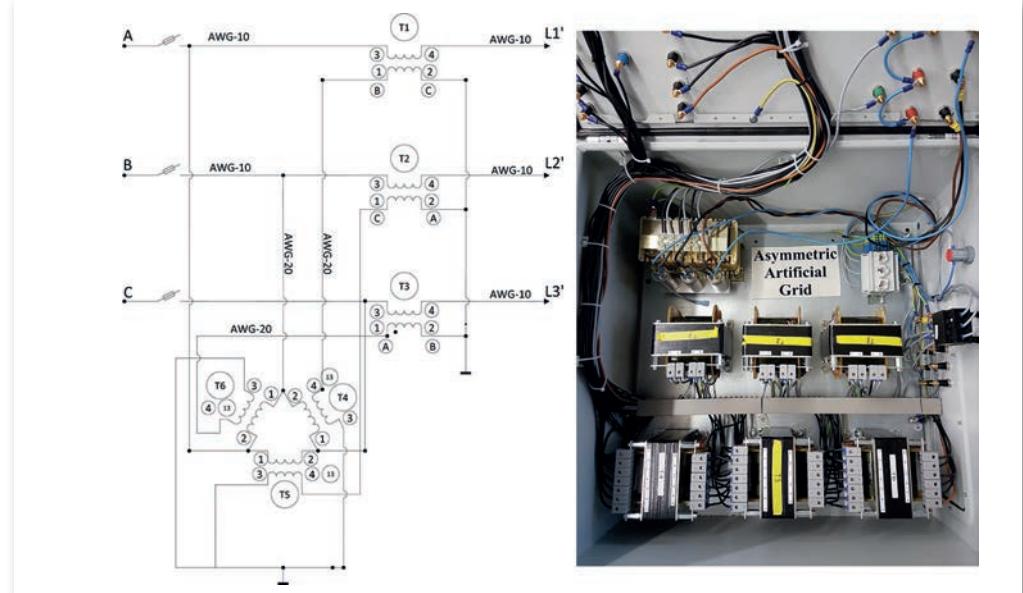
Ein unsymmetrisches Dreiphasennetz kann negative Auswirkung auf daran angeschlossene Geräte mit sich ziehen und Verluste und Erwärmung erhöhen. Dies kann bereits durch ungleiche Spannungsverteilung der einzelnen Phasen oder asymmetrische Lasten hervorgerufen werden. Ein bei PV-Anlagen üblicher Spannungs-Zwischenkreis-Umrichter bildet bei unsymmetrischer AC-Spannung ohne weitere Vorkehrungen zudem üblicherweise eine Schwingung auf der eingangsseitigen Gleichspannung mit dem Doppelten der Netzfrequenz aus. Diese Spannungsschwankungen können auf der Ausgangsseite des Wechselrichters wiederum nicht-charakteristische Oberschwingungsströme dritter Ordnung hervorrufen.

Aufgrund der verursachten Welligkeiten auf der Gleichspannung können insbesondere bei PV-Anlagen mit Hochsetzsteller somit ebenfalls Oberwellen auf der moduseitigen Spannung auftreten, was sich negativ auf die dem PV-Feld entnommene Leistung auswirken kann. Sofern der Maximum-Power-Point-Tracker hier nicht ausreichend robust ausgelegt ist, führt dies unweigerlich zu Verringerungen der Leistung. Zudem wird die Wirkung der Netzsynchronisation im Falle eines netzgebundenen Wechselrichters stark durch die asymmetrische Spannung beeinträchtigt.

Eine neuartige Regelstrategie zur Minderung der 3. Harmonischen der Ausgangsströme sowie zur Entfernung der beschriebenen Welligkeiten aus der Zwischenkreisspannung wurde im Rahmen dieses Projektes untersucht. Der verfolgte Ansatz nutzt dabei eine geschickte Kombination aus Stator- und Rotorkoordinatensystem, um die Wirkung speziell bei nachfolgenden Betriebsfällen zu untersuchen: unsymmetrische lineare Lasten, nichtlineare Lasten und unsymmetrische Netzanschlüsse unter Verwendung einer asymmetrischen Netznachbildung (siehe Bild). Darüber hinaus wird der entwickelte Regler auch mit anderen, nichtlinearen Regleransätzen verglichen, um dynamische Antworten des Regelungssystems zu untersuchen.

title

IMPACT OF PV INVERTERS TO GRID UNDER ASYMMETRIC CONDITION



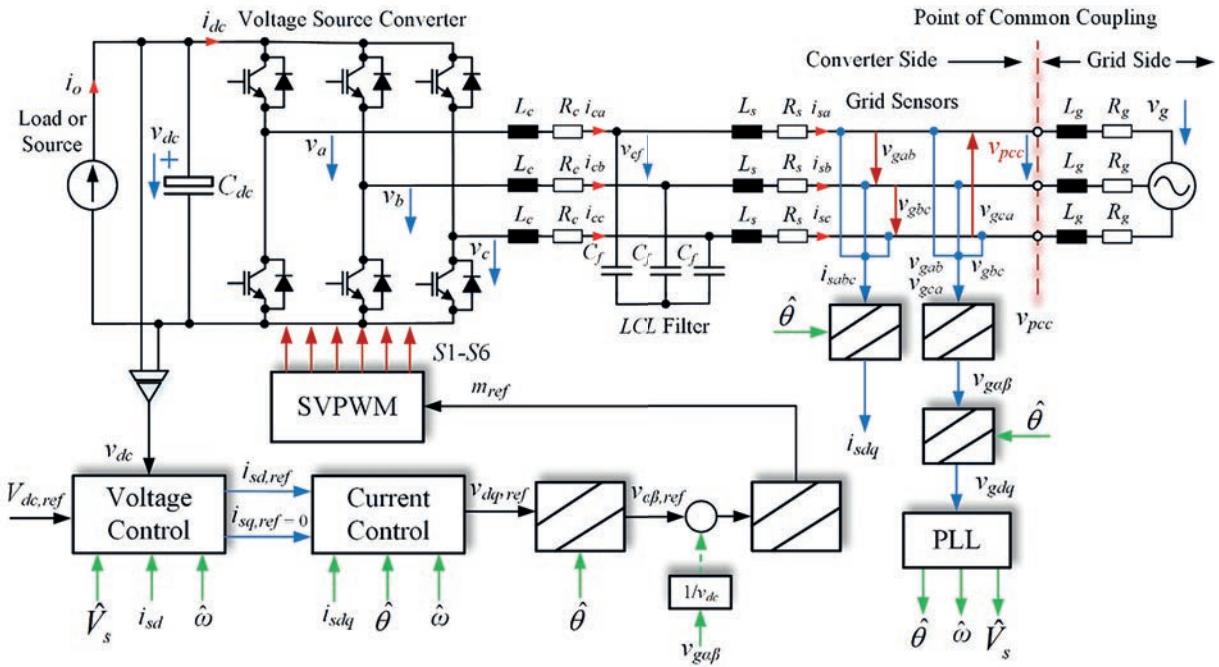
Dreiphasiger Aufbau einer Netznachbildung
Three-phase Asymmetric Artificial Grid box

Unbalanced conditions (voltages in the three-phase grid or asymmetric three-phase loads) can lead to critically adverse impacts on equipment and on the power system, namely more losses and heating effects, less stable. The behavior on the DC-side of a VSC subject to unbalanced voltage exposed that a voltage oscillation with frequency equivalent to 2ω (ω being the grid frequency) comes out on this DC voltage. The VSC DC-side voltage fluctuation generates non-characteristic third-order harmonic current on its AC-side. Especially, in PV system, as a result of voltage ripples on the DC-link voltage on the output of the boost converter, the boost converter input voltage may contain harmonics too. In this case, the extracted power from the PV will contain ripple which brings about power loss due to inaccurate MPP operation unless the MPPT controller is well designed. Besides, phase-locked loop (PLL) performance is severely affected by asymmetric voltage in case of grid-tied inverter.

A new advanced control strategy to mitigate the 3rd oscillation in the output currents, as well as to remove 2ω ripples from the DC-link voltage is proposed. This control approach is designed based on the stationary frame, the rotary frame as well to appraise the achievement in the following situations: Unbalanced Linear Loads, Non-Linear Loads, and Dissymmetric Grid connection using Asymmetric Artificial Grid box. In addition, this controller is also evaluated against the non-linear controller to demonstrate the dynamic responses of the system.

LCL-GEFILTERTER NETZGEKOPPELTER UMRICHTER UNTER SCHWACHEN NETZBEDINGUNGEN

LCL-FILTERED GRID-CONNECTED CONVERTER UNDER WEAK GRID CONDITIONS



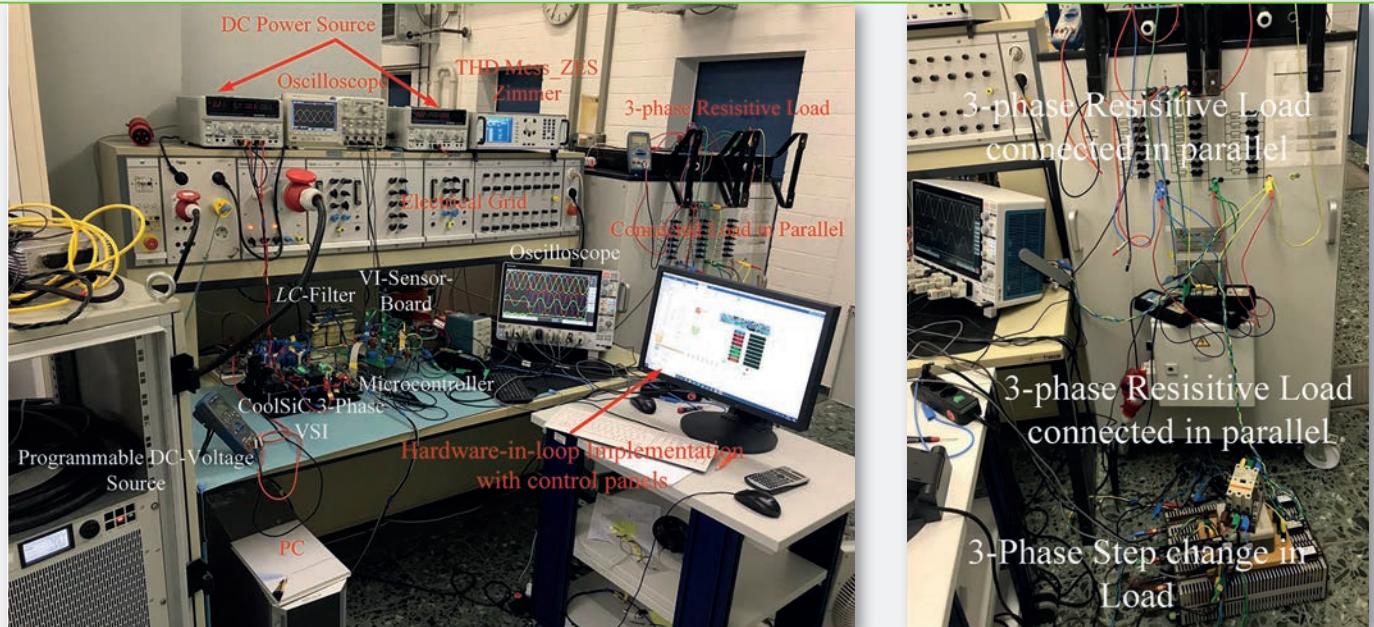
Netzgekoppelte Umrichter in dezentralen Energieerzeugungssystemen müssen unter stark gestörter Spannung mit einem großen Frequenzbereich arbeiten, um Wirk-/Blindleistungsfähigkeiten für Nebendienstleistungen und Leistungsregelung bereitzustellen. Die Netznormen wurden erlassen, um sicherzustellen, dass der vom spannungsgeführten Wandler (VSC) eingespeiste Strom in einem bestimmten Frequenzbereich nur geringe Oberschwingungen enthält. Der eingespeiste Oberschwingungsstrom wird durch die Totzeit in jedem Schenkel des VSC und die Spannungsoberschwingung am Verknüpfungspunkt (PCC) verursacht.

Die vorgeschlagene Regelung für den dreiphasigen netzgekoppelten VSC mit einem LCL-Filter ist die äußere Regelschleife der Zwischenkreisspannungsregelung, die einen Bezugstrom für die innere Stromregelschleife erzeugt. Ein gemischter generalisierter Integrator-Phasenregelkreis zweiter und dritter Ordnung (MSTOGI-PLL) wird zur Eliminierung des DC-Offsets, zur Frequenzanpassung und zur schnelleren Synchronisierung der VSC mit dem Netz implementiert. In der Zwischenkreisspannung ist ein schneller und präziser Regler zur Ermittlung der DC-Ripplspannung implementiert, der die Rippelkomponente in der gemessenen Busspannung aufheben kann. Diese Regelung ergibt sich aus der Erhöhung der Regelbandbreite und der Verringerung des THDs.

Systemkonfiguration und Regelungsstruktur eines dreiphasigen netzgekoppelten Umrichters mit einem LCL-Filter
System configuration and control structure of a three-phase grid-connected converter with an LCL-filter

Grid-connected converters in distributed generation systems must operate under highly distorted voltage with a wide range of frequency to provide active/reactive power capabilities for ancillary services and power control. The grid standards have been imposed to ensure that the injected current by the voltage source converter (VSC) contains low harmonics under a specific frequency range. The injected harmonic current is caused by the dead time in each leg of the VSC and the voltage harmonic at the point of the common coupling (PCC).

The proposed control for the three-phase grid-connected VSC with an LCL filter is the outer loop control of DC-link voltage control, which generates a reference current for the inner current control loop. A mixed second- and third-order generalized integrator phase-locked-loop (MSTOGI-PLL) is implemented for DC offset elimination, frequency adaptability and faster synchronizing of the VSC to the grid. A fast and accurate controller is implemented in the DC-link voltage to estimate the DC ripple voltage, which can cancel the



Die vorgeschlagene Netzstromregelung ist die digitale Implementierung von proportional-integralen Mehrfachresonanzreglern (PI-MR) im synchronen und stationären Bezugsrahmen, diskretisiert mit dem Vorwärts- und Rückwärts-Euler-Verfahren. Der PI-MR mildert die durch die gestörten Netzspannungen verursachten Stromober schwingungen und erreicht bei der Grundfrequenz einen stationären Fehler von Null.

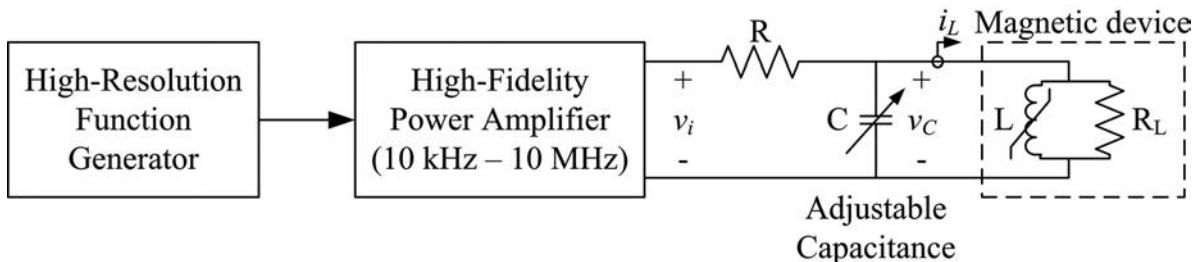
Die Oberschwingungsregler der Ordnungen 5, 7, 11 und 13 werden zum Grundschwingungsregler im synchronen und stationären Be zugssystem addiert, um die Oberschwingungen zu kompensieren. Darüber hinaus wird eine praktische Implementierung des Proportional-Mehrfach-Resonanz-Reglers (PMR) sorgfältig entworfen und bis zu den Oberschwingungsreglern der 13. Ordnung diskretisiert, wobei Tustin mit vorgewickelter Frequenz-DFII-Transponierung verwendet wird. Der PI-MR wird mit dem PMR-Regler verglichen, um die Netz stromober schwingungen und das dynamische Verhalten zu kompen sieren. Der PMR-Regler kann auch in einem Inselsystem (VSI) mit einer stark nichtlinearen angeschlossenen Last implementiert wer den, um die Oberschwingungen der Ausgangsspannung mit schnel lem Einschwingverhalten zu verringern.

ripple component in the measured bus voltage. This control results in increasing the control bandwidth and decreasing the THD.

The proposed grid current feedback control is the digital implementation of proportional-integral multiple-resonant regulators (PI-MR) in the synchronous and the stationary reference frames. PI-MR is discretized using the forward and backward Euler method. The PI-MR mitigates the current harmonics caused by the distorted grid voltages and achieves zero steady-state error at the fundamental frequency. The harmonic regulators of the orders 5th, 7th, 11th, and 13th are added to the fundamental regulator in synchronous and stationary reference frames to compensate for the harmonics. Moreover, a practical implementation of the proportional multiple resonant (PMR) controller is carefully designed and discretized up to 13th order harmonic regulators using Tustin with pre-wrapped frequency DFII transpose. The PI-MR is compared with the PMR controller to compensate for the grid current harmonics and dynamic performance. The PMR controller can also be implemented in a stand-alone system with a highly non-linear connected load to mitigate the output voltage harmonics with fast transient performance.

MESSUNG VON GROSSSIGNALVERLUSTEN IN MAGNETISCHEN BAUELEMENTEN UNTER VERWENDUNG ELEKTRISCHER PARAMETER

LARGE-SIGNAL LOSSES MEASUREMENT IN MAGNETIC DEVICES USING ELECTRIC PARA- METERS



Schematische Darstellung der Messung von Großsignalverlusten unter Verwendung elektrischer Parameter.

Large-signal losses measurement schematic diagram using electric parameters.

Die Messung von Großsignalverlusten in Magnetkernen kann schwierig sein, da die von den Herstellern angegebenen Parameter für jedes magnetische Material nicht vollständig offengelegt sind oder für kleinvolumige Ringkerne mit Kleinsignalanregung durchgeführt werden. Eine übliche Großsignalverlustmessmethode für magnetische Bauelemente wird mit einem Kalorimeter durchgeführt, bei dem die gesamte Verlustwärme des magnetischen Bauelements in einer speziell isolierten Kammer gemessen wird; diese Methode erfordert jedoch hochspezialisierte Hardware und hat lange Einschwingzeiten für jeden Messpunkt zur Folge, da das thermische Verhalten eines magnetischen Bauelements langsam und volumenabhängig ist und für jeden Messpunkt bis zu Stunden dauert.

Eine Alternative zur kalorimetrischen Lösung besteht darin, die Messung elektrischer Parameter zur Charakterisierung der Verluste eines magnetischen Bauelements zu verwenden, wie sie durch eine Induktivität parallel zu einem Widerstand dargestellt werden kann, wobei der zugehörige äquivalente Parallelwiderstand alle Verluste der magnetischen Komponente zusammenfasst, d.h. Kern- und Wicklungsverluste.

Durch Einstellung der Resonanz des LC-Kreises wird die vom Verstärker gelieferte Leistung mit den Verlusten im magnetischen Bauelement in Beziehung gesetzt. Auf diese Weise können große Signalverlustmessungen besonders schnell durchgeführt werden, indem konventionelle elektrische Parameter wie Spannung und Strom verwendet werden, darüber hinaus bringt diese Messmethode mehr Flexibilität zur Bewertung eines Bereichs von Betriebsfrequenzen ohne lange Einschwingzeiten, wie sie bei der kalorimetrischen Methode üblich sind.

Large-signal loss measurement in magnetic cores can be complex to characterize, as the given parameters from manufacturers for each magnetic material are not fully disclosed or are performed for small-volume toroidal cores with small-signal excitation. A usual large-signal loss measuring method for magnetic devices is performed with a calorimeter, where the total dissipated heat from the magnetic device is measured in a specially isolated chamber; however, this method requires highly specialized hardware and has long settling times for each measuring point, as thermal behavior of a magnetic component is slow and volume-dependent, taking up to hours for each one.

An alternative to the calorimetric solution is to use the measurement of electrical parameters to characterize the losses of a magnetic device, as it can be represented by an inductor in parallel with a resistor, where the associated equivalent parallel resistor lumps all the losses of the magnetic component, this is core and winding losses.

By adjusting the resonance of the LC circuit, the power supplied by the amplifier is associated to the losses in the magnetic device. In this way, large-signal loss measurement can be made in a faster way by employing conventional electric parameters such as voltage and current, with added flexibility to evaluate a range of operating frequencies and without the extended settling times of the calorimetric measuring method.

Ansprechpartner

PIERRE KÜSTER, M.SC.; JONAS PFEIFFER, M.SC. (EVS)

Titel

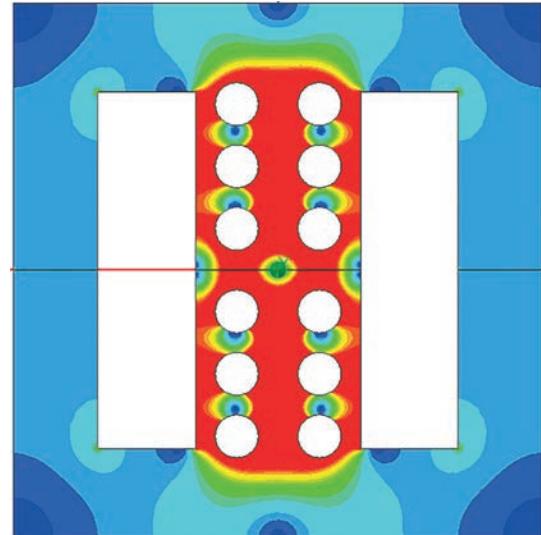
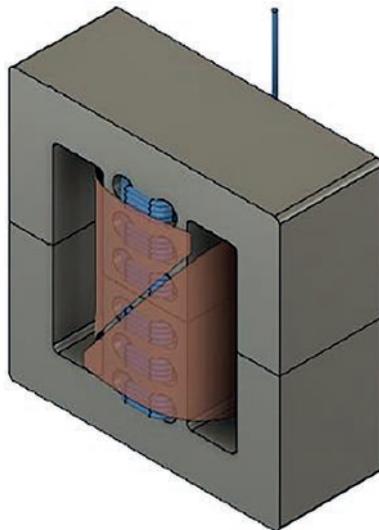
AKTIVE VORMAGNETISIERUNG VON WEICH-MAGNETISCHEN BAUELEMENTEN

title

ACTIVE PRE-MAGNETIZATION OF SOFT MAGNETIC COMPONENTS

Die Optimierung leistungselektronischer Systeme hat im Zuge der Energiewende einen hohen Stellenwert und stellt ein Fokus aktueller weltweiter Forschung dar. Dabei wird, neben der Optimierung und Weiterentwicklung der Leistungshalbleiterschalter, die Verbesserung der magnetischen Bauelemente vorangetrieben.

Bei der aktiven Vormagnetisierung handelt es sich um einen Verbesserungsansatz, durch den magnetische Bauelemente steuerbar werden und somit an den aktuellen Arbeitspunkt des leistungselektronischen Systems angepasst werden können. Die daraus resultierenden Vorteile können sich durch eine Volumen- bzw. Gewichtsreduktion des magnetischen Bauelements und/oder einer erhöhten Effizienz des Gesamtsystems auswirken. Innovativ ist dabei vor allem, dass im Vergleich zu derzeitigen Optimierungen, die Anpassung variabel ist und somit an viele unterschiedliche Betriebspunkte erfolgen kann. Wichtige Bestandteile der Forschung sind vor allem Simulationsprogramme, wie FEMM oder ANSYS Maxwell sowie Impedanz-Analyser und eigens entwickelte Messstände.

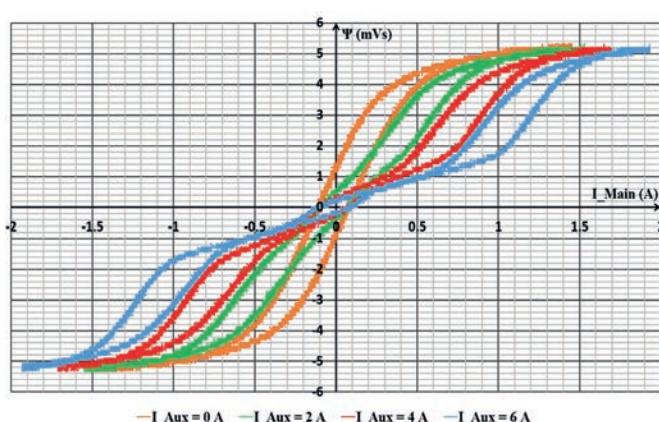


Kernaufbau für eine gemischte Vormagnetisierung (linke Seite) / Simulation der Flussdichte im Prüfling (rechte Seite)

Core structure for mixed biasing (right side) / Simulation of flux density in the device under test

The optimization of power electronic systems is of great importance during the energy turnaround and is a focus of current worldwide research. In addition to the optimization and further development of power semiconductor switches, the improvement of magnetic components is being driven forward.

Active pre-magnetization is an improvement approach that makes magnetic components controllable and thus adaptable to the current operating point of the power electronic system. The resulting advantages can take the form of a reduction in the volume or weight of the magnetic component and/or increased efficiency of the overall system. The main innovation here is that, compared to current optimizations, the adjustment is variable and can therefore be made to many different operating points. Important components of the research are above all simulation programs, such as FEMM or ANSYS Maxwell, as well as impedance analyzers and specially developed measuring systems.



Ergebnis einer Hysteresemessung

Result of a hysteresis measurement

Ansprechpartner

DR.-ING. CHRISTIAN NÖDING (EVS)

Titel

LABORINFRASTRUKTUR:**CHARAKTERISIERUNG VON KOMPONENTEN**

title

**LABORATORY EQUIPMENT: ELECTRICAL
CHARACTERISATION OF COMPONENTS**

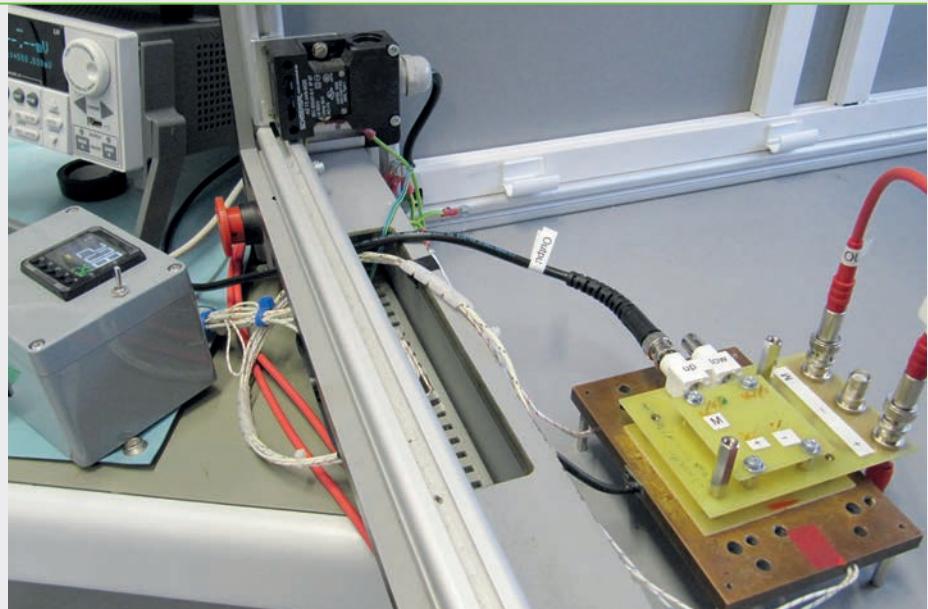
Für die Entwicklung von leistungselektronischen Schaltungen ist die Kenntnis der Bauteilcharakteristik einzelner Bauelemente von großer Bedeutung. Dem Fachgebiet EVS steht für die Charakterisierung der Bauelemente ein breites Spektrum an Messgeräten zur Verfügung, die wir Ihnen in Form von Dienstleistungsaufträgen anbieten möchten.

Aktive Bauelemente

Mit einer eigens entwickelten **Schaltzelle** können die Durchlass- und Schaltverluste von Halbleiterschaltern und Modulen gemessen werden. Eine Automatisierung des Messaufbaus ermöglicht eine komfortable Akquirierung von Verlustdaten in Abhängigkeit von Strom, Spannung, Temperatur, Gate-Spannung und -Widerstand. Zur Ermittlung der statischen Parameter der Halbleiterbauelemente stehen außerdem ein zweikanaliges **Source-Meter** sowie ein dazu passender HV-Konstanter zur Verfügung. Hiermit lassen sich beispielsweise die Sperrcharakteristik, die Gate-Charakteristik sowie die Vorwärtscharakteristik der Bauteile präzise messen.

Passive Bauelemente

Für passive Bauelemente ist neben der Verlustleistung auch das Impedanzverhalten von Interesse. Dafür sind am Fachgebiet **Impedanz-Analyser**, **LCR-Meter** und **Network-Analyser** vorhanden. Damit werden insbesondere die Frequenzabhängigen Impedanzen von Spulen und Kondensatoren untersucht sowie die Dämpfung von EMV Filtern unter Kleinsignal-Bedingungen. Für eine Belastung der Komponenten unter Großsignal-Bedingungen stehen drei leistungsstarke **Linearverstärker** zur Verfügung. Diese werden zur elektrischen Belastung von passiven Bauteilen unter last- oder lastähnlichen Bedingungen verwendet, um z. B. Ersatzschaltbildparameter, Verluste oder Temperaturansteige der Bauelemente zu bestimmen.



Halbleiter-Charakterisierung in einer Schaltzelle
Semiconductor characterisation in a switching cell

The knowledge of the behaviour and characteristic of electric components is significant for the design of power electronic converters. The department EVS features a wide spectrum of measurement equipment for the electrical characterisation of electric components.

Active components

*Conduction and switching loss of semiconductor devices and modules are measured using a **switching cell**. The automatization of the measurement setup enables a comfortable acquirement of power loss data dependent on current, voltage, temperature, gate-voltage and resistance. The evaluation of the static semiconductor parameters is performed by means of a two channel **source-meter** and an appropriate high voltage source. The source meter enables precise measurement of blocking, gate and forward characteristic of the semiconductor under test.*

Passive components

*For passive components power loss evaluation and impedance measurement is of importance. The department possess **impedance analysers**, **LCR meters** and **network analysers**. These devices enable the measurement of frequency dependent impedance values of inductors and capacitors as well as the attenuation of EMI filter circuits under small signal conditions. Component tests under load conditions are possible as well. At least three **linear amplifiers** enable the investigation of passive components under load conditions. E.g. evaluation of equivalent circuit parameters, power loss or temperature rise is possible.*

Ansprechpartner

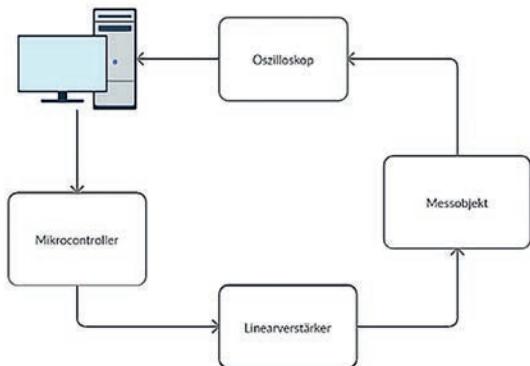
PIERRE KÜSTER, M.SC.; JONAS PFEIFFER, M.SC.; CATHARINA SCHMIEDEKNECHT, B.SC. (EVS)

Titel

GROSSSIGNAL-MESSSTAND FÜR AUTOMATISIERTE HYSTERESEMESSUNGEN

title

LARGE SIGNAL MEASUREMENT SETUP FOR AUTOMATED HYSTERESIS MEASUREMENTS

Prinzipschaltbild des Aufbaus | **Principal setup**

Neben den Leistungshalbleitern kommt auch den magnetischen Komponenten in einem leistungselektronischen System eine immer größer werdende Bedeutung zu. Diese sind in der Regel die größten und auch schwersten Systeme eines Gesamtsystems und bieten damit Optimierungspotential. Damit eine bestmögliche Optimierung erzielt wird, ist das Verhalten der Bauteile hinsichtlich eines spezifizierten Arbeitspunktes von elementarer Bedeutung. Aufgrund der Nichtlinearität der magnetischen Materialien und den Abhängigkeiten von einer Vielzahl an Faktoren ist dies jedoch nur schwer zu beschreiben. Geeignete Messsysteme sind demnach von immanenter Bedeutung für die Erforschung dieser Bauteile.

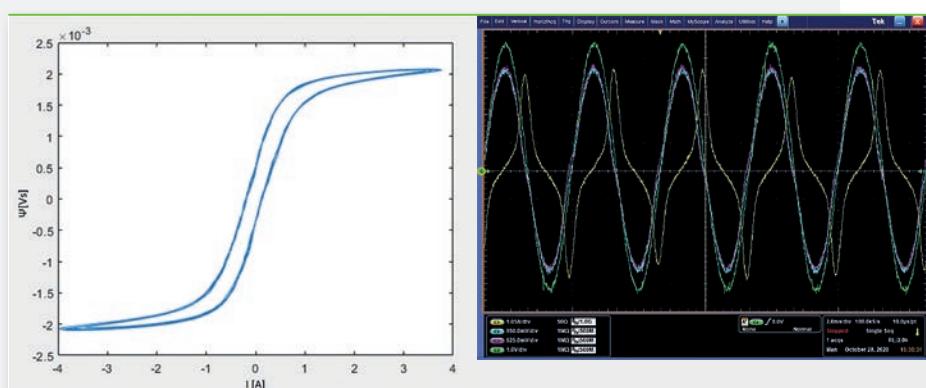
Im Fachgebiet EVS wird daher ein automatisierter Messstand zur Aufnahme von Hysteresekurven und den damit verbundenen Magnetisierungs-Kennlinien entwickelt. Der Kern des Versuchsstands ist ein Mikrocontroller (C2000 des Herstellers Texas Instruments), Linearverstärker, Oszilloskop und ein entsprechender Code zur Steuerung sowie Auswertung der Daten. Die Ansteuerung des Controllers und das Verarbeiten der Daten des Oszilloskops erfolgt mittels der Software MATLAB. Unter Hinzunahme einer konstanten Gleichspannungsquelle kann zusätzlich ein Arbeitspunkt des Prüflings eingestellt werden.

Der beschriebene Versuchsaufbau ermöglicht es, insbesondere Ferritkerndrosseln im kleinen Leistungsbereich bei verschiedenen Spannungsformen, Arbeitspunkten und Aussteuerungen zu untersuchen. Vor allem können damit Forschungen an vormagnetisierbaren Drosseln gezielt und zeitersparend durchgeführt werden.

In a power electronic system, the magnetic components become increasingly important in addition to the power semiconductors. These are usually the largest and often the bulkiest components of an overall system and thus offer potential for optimization. To achieve the best possible optimization, the behavior of the components in a specified operating point is of elementary importance. However, this is difficult to describe due to the nonlinearity of magnetic materials and the dependencies on many factors. Suitable measurement systems are therefore of immanent importance for the research of these components.

In the department EVS, therefore, an automated measuring system is being developed for recording hysteresis curves and the associated magnetization characteristics. The major components of this system are a microcontroller (C2000 by Texas Instruments), linear amplifier, oscilloscope and a corresponding code for controlling and evaluating the data. The microcontroller is controlled and the data from the oscilloscope is processed by using MATLAB software. With the addition of a constant DC voltage source, an operating point of the DUT (Device Under Test) can also be set.

The experimental setup makes it possible to investigate ferrite core chokes in a low power range at various voltage forms and operating points. Above all, research on premagnetizable chokes can be carried out in a targeted and time-saving manner.



Erzeugte Hysteresekurve (links) /
Gemessener Strom- und Spannungsverlauf (rechts)
Generated hysteresis (left side) /
Measured current and voltage (right side)

Ansprechpartner

DR.-ING. CHRISTIAN NÖDING (EVS)

Titel

LABORINFRASTRUKTUR: THERMISCHE CHARAKTERISIERUNG VON KOMPONENTEN

title

LABORATORY EQUIPMENT: THERMAL CHARACTERISATION OF COMPONENTS

Das Fachgebiet EVS verfügt über eine umfangreiche Laborausstattung, welche eine detaillierte thermische Charakterisierung von elektrischen Komponenten, Schaltgruppen und ganzen Schaltungen ermöglicht.

The department EVS possesses a comprehensive spectrum of laboratory equipment for detailed thermal characterisation of electronic components, modules and circuits.



Module mit eingebetteten SiC JFETs im Klimaschrank zur Durchführung von H3TRB Test

Modules with embedded SiC JFETs placed in test chamber for H3TRB test

Ein **hochdynamisches Thermographie-System** ermöglicht die Messung von Temperaturverteilungen mit hoher zeitlicher Auflösung. Hiermit lassen sich sowohl lokale Temperaturmaxima auf Platinen, Bauteilen oder ganzen Schaltungen ermitteln als auch die zeitliche Veränderung von Temperaturen darstellen um Wechselbelastungen zu quantifizieren. Die Identifizierung von lokalen Temperaturmaxima von Bauelementen ermöglicht z. B. die Entwicklung gezielter Verbesserungen bei der Kühlung oder Benchmarks verschiedener Komponenten, da die Messungen direkt unter Anwendungsbedingungen durchgeführt werden können.

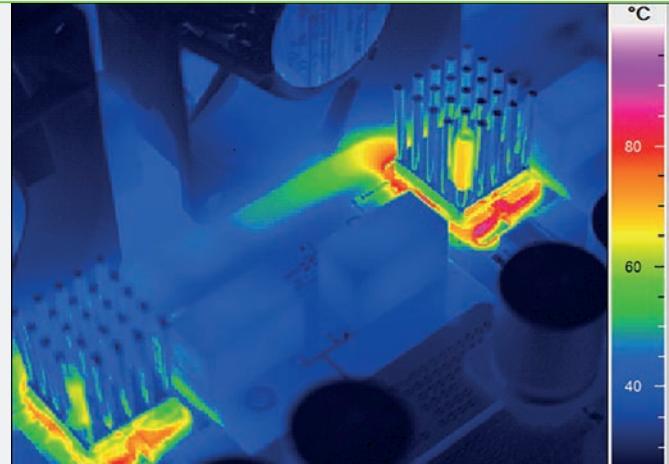
Zur Untersuchung von thermischen Zyklen oder Langzeitbelastungen steht ein moderner **Klimaschrank** zur Verfügung. Einzelne Bauelemente oder ganze Schaltgruppen können hierin auf Ihr Verhalten bei besonderen klimatischen Gegebenheiten wie z.B. hoher oder niedriger Umgebungstemperaturen (-40 bis 180°C) oder hoher Luftfeuchtigkeit untersucht werden. Die hohe Temperaturänderungsgeschwindigkeit des Systems (20 K/min) ermöglicht außerdem Temperaturwechseltests durchzuführen. Somit können nicht nur Bauteile auf Ihre Eigenschaften bei bestimmten Klimabedingungen untersucht werden, sondern auch Untersuchungen bezüglich der Degradation

*A highly **dynamic thermographic system** enables the measurement of temperature distribution with high chronological resolution. This enables the measurement of local hot spot temperatures on PCB's, components or complete circuits. The time variant temperature changes can be displayed as well. This allows evaluation of variation in stress of components. The identification of local temperature maxima allows the improvement of cooling methods of components. The operation of the components under application conditions enables benchmarking of different components and technologies.*

*The investigation of thermal cycles or long-term load can be performed by means of a **climate cabinet**. Components or circuits can be investigated under specified climatic properties like high or low ambient temperatures (-40 to +180°C) or high humidity. The possibility of high temperature changes (20 K/min) enables temperature cycling tests. Beside the investigation of components under specified climatic conditions, further investigations regarding degradation caused by temperature cycling, humidity (e.g. H3TRB test) or high temperatures are possible as well. The evaluation of such experiments enables conclusions regarding*

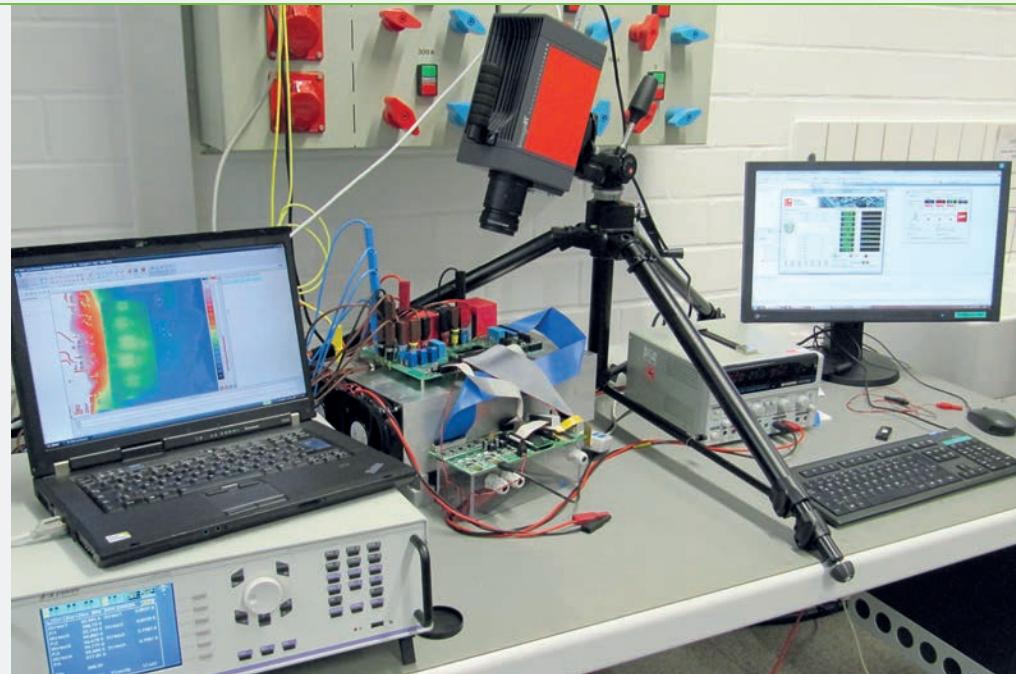
dation durch Temperaturwechsel, Feuchte (z. B. H3TRB Test) oder hohe Temperaturen durchgeführt werden. Dadurch können z. B. Rückschlüsse auf den Einsatz der Bauelemente in rauen Umgebungsbedingungen oder auf deren zu erwartende Lebensdauer gezogen werden.

Weiterhin steht dem Fachgebiet ein **Kalorimeter** zur Verlustleistungsbestimmung von elektrischen Komponenten und Schaltungen zur Verfügung. Hier kann die Verlustleistung unter realitätsnahen Betriebsbedingungen bestimmt werden. Kalorimetrische (wärmemengenbasierte) Verlustleistungsbestimmungen sind vor allem bei Bauelementen und Schaltungen sinnvoll, welche sehr hohe Wirkungsgrade (>99%), also minimale Verluste, aufweisen. Rein elektrische Messungen bieten hier in der Regel nicht die erforderliche Genauigkeit.



Thermografisches Bild einer leistungselektronischen Platine im Betrieb
Thermographic image of power electronic circuit board in operation

operation behaviour of the components under rough environments or expected lifetimes.



Durchführung thermographischer Messungen an einem Laboraufbau
Realisation of thermographic measurements on a laboratory set up

Furthermore, the department possesses a **calorimetric measurement setup** for power loss evaluation of electric components and circuits under realistic application conditions. In comparison to electric measurements, calorimetric (heat quantity based) measurement methods can enable improved accuracy if components or circuits with very high efficiency values (>99%), thus minimum power loss, are under investigation.

Ansprechpartner

DR.-ING. CHRISTIAN NÖDING (EVS)

Titel

AUTOMATISIERTE KOMMUTIERUNGSZELLE

title

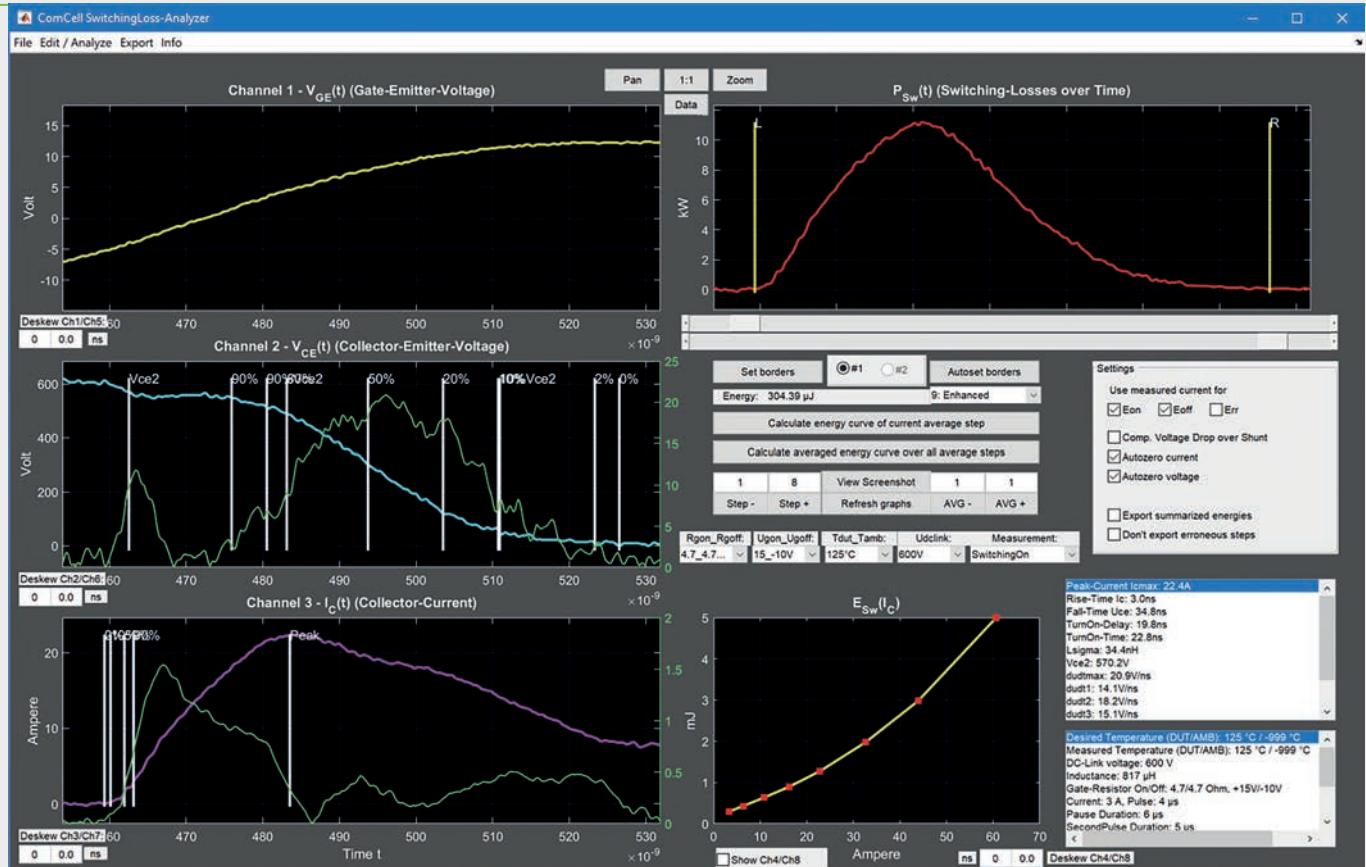
**AUTOMATED COMMUTATION CELL /
TOPBENCH**

Bild 1: Hauptbildschirm der ComCell-Auswertungssoftware

Figure 1: Mainscreen of ComCell-Analyzer-Software

Seit 2011 wird am Fachgebiet EVS ein Messgerät zur automatisierten Erfassung und Auswertung von Halbleiterverlusten stetig weiterentwickelt. Zwar liefern die Hersteller stets ein Datenblatt zu IGBTs, MOSFETs und Dioden, jedoch enthalten diese Datenblätter gemittelte Werte, die als Worst-Case zum Ende der Lebensdauer zu betrachten sind. Individuelle Designs erfordern hier eigene Untersuchungen hinsichtlich der Schalt- und Durchlassverluste.

Aufgrund der Vielzahl an Freiheitsgraden beim Betrieb eines Halbleitereschalters erfordert eine umfassende Kennlinienaufzeichnung zahlreiche Parameteränderungen. Hierfür wurde am Fachgebiet eine Automatisierungssoftware entwickelt, die neben der Zwischenkreisspannung, der Temperatur und des Bauteilstroms auch in der Lage ist die Gatespannung automatisiert nachzuführen. Die über ein Oszilloskop ermittelten Schaltenergien werden wahlweise auf Basis der IEC60747-9 oder alternative Definitionen ausgewertet. Zusätzlichfunktionen wie z.B. Autozero-Funktionen für Strom und Spannung, du/dt- und di/dt-Erfassung, Parallel- und Serienschaltungsumunterstützung von Bauteilen und Zeiterfassung von Signalverläufen erleichtern dabei die Analyse von neuen Halbleitern erheblich (Bild 1).

Since 2011, the EVS department has been continuously developing a measuring device for the automated recording and evaluation of semiconductor losses. Although the manufacturers always provide a datasheet for IGBTs, MOSFETs and diodes, these datasheets contain averaged values that are to be regarded as the worst case at the end of the lifetime. Individual designs require their own investigations regarding switching and transmission losses.

Due to the large number of degrees of freedom when operating a semiconductor switch, a comprehensive recording of characteristics requires numerous parameter changes. For this purpose, the department developed an automation software that, in addition to the intermediate circuit voltage, the temperature and the component current, is also able to automatically control the gate voltage. The switching energies recorded by an oscilloscope are evaluated based on IEC60747-9 or alternative definitions. Additional functions such as auto-zero functions for current and voltage, dv/dt and di/dt detection, parallel and series connection and time recording of signal curves make the analysis of semiconductors very easy (Fig. 1).

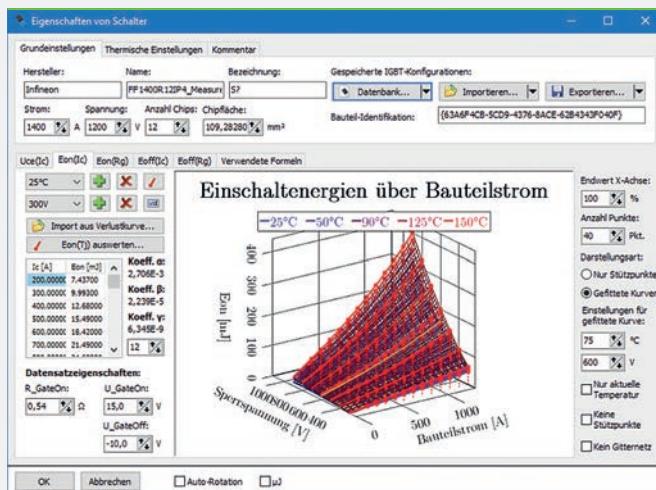


Bild 3: Berechnungsergebnisse für einen kompletten Wechselrichter mit interaktiver Analysefunktion
Figure 3: Calculation results for a complete inverter system with interactive analyzer

Nach Erfassung der Rohdaten erlaubt die Software neben einer Sichtprüfung der Daten einen komfortablen Export der Ergebnisse z.B. als interaktive Excel-Tabelle, als offene XML-Datei oder in Plexim PLECS (leistungselektronische Simulationssoftware) zur weiteren Nutzung in Simulationen.

Software „TopBench“ als OpenSource veröffentlicht

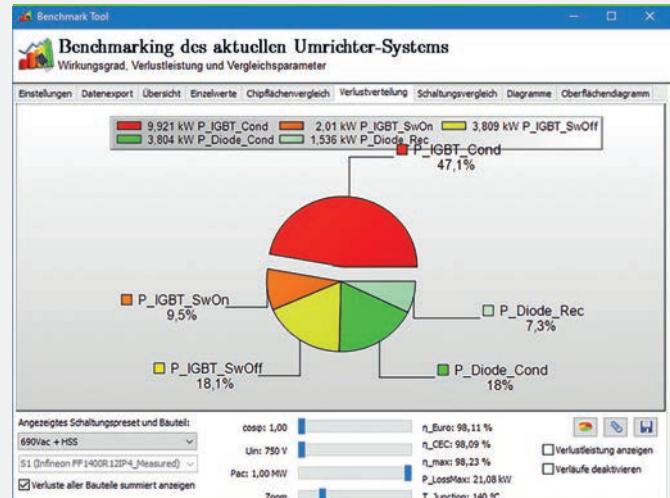
Im Jahr 2020 wurde die Software „TopBench“ als OpenSource veröffentlicht, die im Rahmen der Promotion von Dr. Christian Nöding entwickelt wurde (Bild 2). Die Software ermöglicht dabei einen einfachen Vergleich unterschiedlicher Halbleiterschalter oder ganzer Schaltungstopologien bei unterschiedlichen Betriebsparametern (u.a. Ein-/Ausgangsspannungen, Schaltfrequenzen und Temperaturen). Anders als bei herkömmlichen Simulationen mittels PLECS, LTspice oder Simplorer müssen dabei keine Einschwingvorgänge beachtet werden, da die Verluste auf Basis des hinterlegten Stromverlaufs errechnet werden. Bei den typischen Stromrichtern (Hoch-/Tiefsetzsteller und 2-Level- oder Multilevel-Wechselrichter) liefert die Software dabei hervorragende Ergebnisse. Nach Abschluss der Berechnungen (typischerweise 10 bis 20 Sekunden) können die Verlustdaten via Schieberegler für einzelne Betriebspunkte direkt abgelesen werden (Bild 3) oder als umfangreiche DatenTabellen exportiert werden. Neben Wirkungsgradverläufen sind auch Temperaturen an den Bauteilen abgebildet.

Bei Interesse kann die Software über nachfolgenden Link heruntergeladen werden:

<https://www.uni-kassel.de/go/topbench>

Bild 2: Beispiel einer mit ComCell vermessenen Halbleiter-Verlustkurve in TopBench

Figure 2: Example of a losses-curve displayed in TopBench and measured by ComCell



After recording the raw data, the software allows a visual check of the data and a comfortable export of the results e.g. as an interactive Excel table, as an open XML file or in Plexim PLECS (power electronic simulation software) for further use in simulations.

“TopBench“ software published as OpenSource

In 2020 the software "TopBench" was published as OpenSource, which was developed by Dr. Christian Nöding as part of his PhD (Fig. 2). The software allows a simple comparison of different semiconductor switches or entire circuit topologies with different operating parameters (including input/output voltages, switching frequencies and temperatures). In contrast to conventional simulations like PLECS, LTspice or Simplorer, no transient processes must be considered, as the losses are calculated on the base of the device current curve. In the case of typical converters (step-up/step-down converters and 2-level or multi-level inverters), the software delivers excellent results. After the calculations have been completed (typically 10 to 20 seconds), the loss data can be read off directly for individual operating points via slide controls (Fig. 3) or exported as extensive data tables. In addition to efficiency curves, temperatures on the components are also shown.

If you are interested, the software can be downloaded from the following link:

<https://www.uni-kassel.de/go/topbench>

In zahlreichen Bundes- und Dienstleistungsprojekten hat das Fachgebiet EVS seine Expertise im Bereich der Entwicklung spezialisierter Soft- und Hardwarelösungen ausgebaut. In den vergangenen Jahren entstanden auf diese Weise individuelle Lösungen für projektspezifische Aufgaben, die auch für den Ausbau der Dienstleistungsangebote genutzt wurden. Nachfolgend möchten wir Ihnen einen Auszug der dabei entstandenen Lösungen aufzeigen. Bei Interesse stehen wir Ihnen gerne zur Verfügung.

Hardwareentwicklung

Zur Ansteuerung von Si-, SiC- und GaN-Halbleitern entwickelte das EVS zahlreiche individuelle Gatetreiber-Lösungen, die auch als Plug-And-Play-Lösungen in Form von universellen Gatetreibern verfügbar sind.

Die Regelung von Strömen jenseits der für IGBTs üblichen 16kHz wurde auf Basis eines Altera Cyclone III FPGAs eine universelle FPGA-Platine entwwickelt, die auch zur Umsetzung einer diskreten „Time Sliding-Mode“-Regelung eines mehrphasigen BLDC-Motors verwendet wurde.



Bild 1: Entwicklung und Aufbau von Spezialgeräten mit Computerschnittstelle

Figure 1: Development and construction of special equipment with computer-interfaces

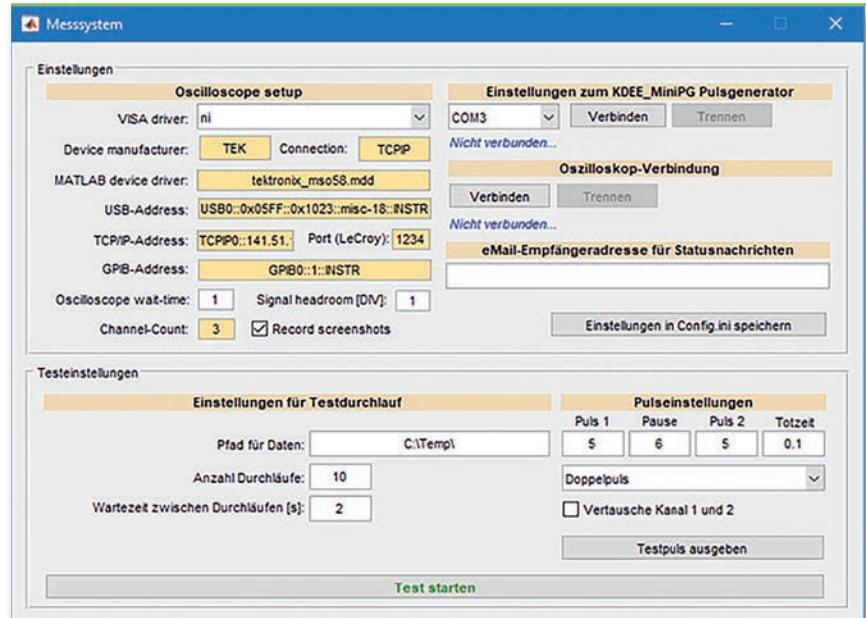


Bild 2: Individuell zugeschnittene PC-Software für Spezial-Messaufgaben
Figure 2: Individually designed computer-software for special measurement-tasks

The EVS department has expanded its expertise in the development of specialized software and hardware solutions in numerous federal and service projects. In this way, individual solutions for project-specific tasks have emerged in recent years, which have also been used to expand the range of services. In the following we would like to show you an extract of the resulting solutions. We are at your disposal if you are interested.

Hardware-development

To control Si, SiC and GaN semiconductors, EVS has developed numerous individual gate driver solutions, which are also available as plug-and-play solutions in the form of universal gate drivers.

The regulation of currents beyond the 16kHz usual for IGBTs was developed based on an Altera Cyclone III FPGA, a universal FPGA board, which was also used to implement a discrete "Time Sliding Mode" control of a multi-phase BLDC motor.

The department also offers the development of smaller hardware components with a computer connection via USB or Ethernet (see Figure 1). The devices offer functional protection against potential differences of up to 1,500V and can therefore also be used in harsher test environments.

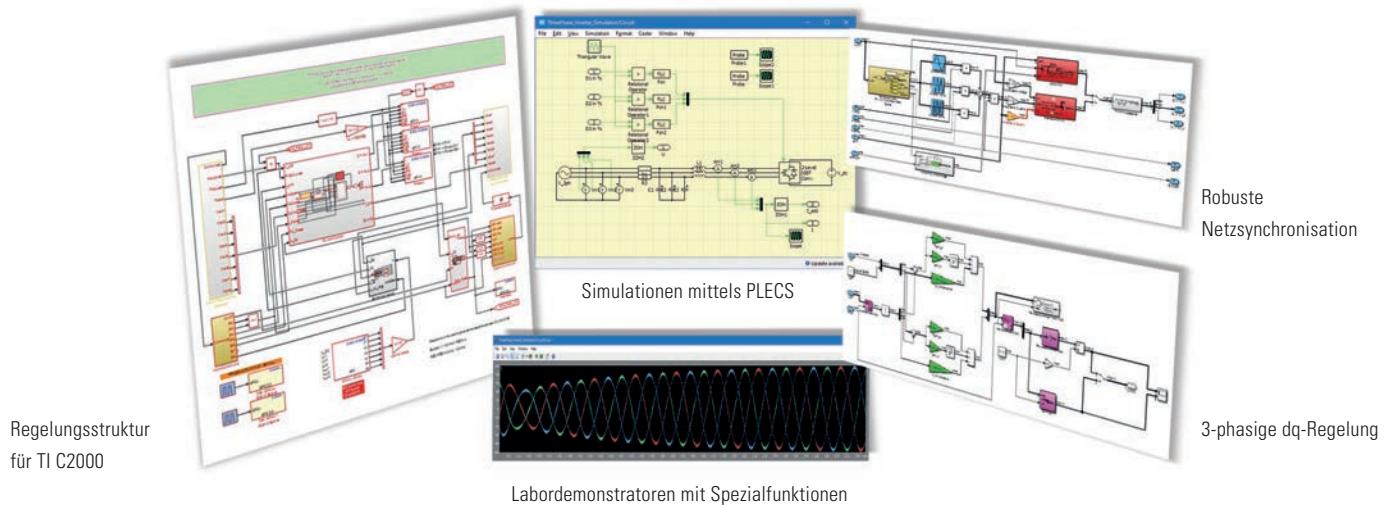


Bild 3: Entwicklung von Stromrichter-Regelungen mit individuellen Spezialfunktionen
Figure 3: Development of converter-controls with individual functionality

Das Fachgebiet bietet als Dienstleistung zudem die Entwicklung von kleineren Hardwarekomponenten mit Computeranbindung über USB oder Ethernet an (siehe Bild 1). Die Geräte bieten dabei einen funktionalen Schutz gegenüber Potentialunterschieden bis 1.500V und können somit auch in rauheren Testumgebungen eingesetzt werden.

Softwareentwicklung

Bild 2 zeigt exemplarisch eine vom EVS entwickelte Spezialsoftware für individuelle Messaufgaben. Dabei kann nahezu beliebig Messequipment miteinander verbunden und automatisiert betrieben werden. Neben Spannungsquellen, Temperaturregelungen, Pulsgeneratoren, Oszilloskopen und Datenloggern bieten wir die Möglichkeit auch eigene Hardware per USB, RS485, RS232 oder Ethernet in die Testumgebung zu integrieren. Dabei können Messpläne entweder über eine eigene GUI vorbereitet und abgerufen, oder über externe Steuerprogramme vorgegeben werden.

Steuer- und Regelungsentwicklung

Kommerziell verfügbare Wechselrichter entsprechen zwar den geltenden Vorschriften, können aber dadurch üblicherweise nicht zum Testen von besonderen Schaltverfahren verwendet werden. Am EVS steht ein Baukasten verschiedener Wechselrichter-Regelungen (dq-Regelung, VI-Regler, Repetitive-Control, etc.) mit unterschiedlichen Variationen an Netzsynchronisationen (z.B. PLL mit multivariablen Filtern) zur Verfügung, um individuelle Untersuchungen durchzuführen. Dabei werden als Hardware typischerweise Mikrocontroller des Typs TI C2000 F283xx eingesetzt, die neben üblichen Kommunikationschnittstellen (RS232, I2C, SPI, CAN) auch hochauflösende PWM-Kanäle mit zeitlichen Auflösungen bis zu 150ps erlauben.



Bild 4: Universelle FPGA-Platine mit Multi-Kanal ADC und PWM
Figure 4: Universal FPGA-hardware with multi-channel ADC and PWM

Software-development

Figure 2 shows an example of special software developed by EVS for individual measurement tasks. Almost any measuring equipment can be connected and operated automatically. In addition to voltage sources, temperature controls, pulse generators, oscilloscopes and data loggers, we also offer the option of integrating your own hardware into the test environment via USB, RS485, RS232 or Ethernet. Measurement plans can either be prepared and called up using a separate GUI or specified using external control programs.

Controller-development

Commercially available inverters comply with the applicable regulations, but usually cannot be used to test special switching processes. The EVS has a set of different inverter controls (dq control, VI control, repetitive control, etc.) with different variations of grid synchronization (e.g. PLL with multivariable filters) to carry out individual investigations. Typically, we are using TI C2000 F283xx microcontrollers which, in addition to the usual communication interfaces (RS232, I2C, SPI, CAN), also allow high-resolution PWM channels with time-resolutions of up to 150ps.

Ansprechpartner

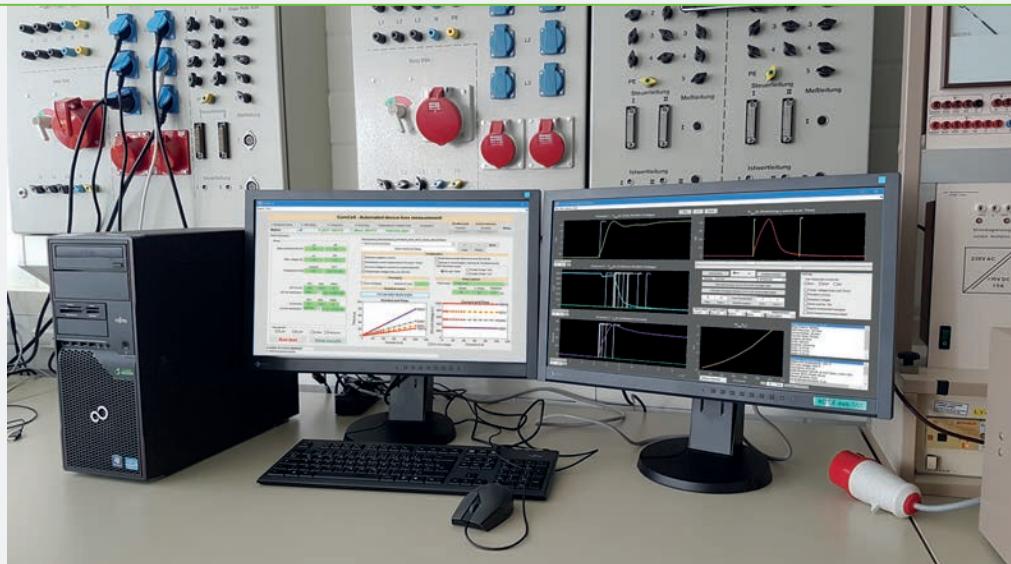
PIERRE KÜSTER, M.SC.; DR.-ING. CHRISTIAN NÖDING (EVS)

Titel

**PRAKTIKUM LEISTUNGSELEKTRONIK FÜR
STUDIERENDE „AUTOMATISIERTE
KOMMUTIERUNGSZELLE“**

title

**PRACTICAL TRAINING IN POWER
ELECTRONICS FOR STUDENTS “AUTOMATED
COMMUTATION CELL”**



Messtand mit geöffneter EVS-Mess-
software

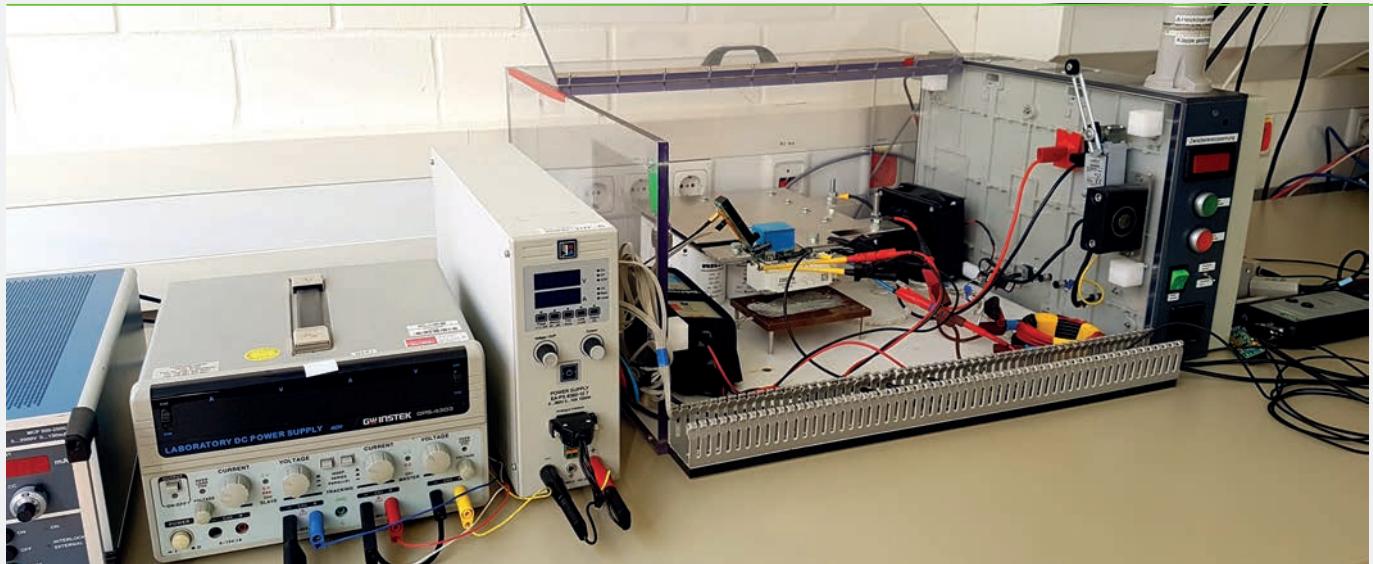
*Workstation for measurements with
opened EVS-measurementt-software*

Sowohl in der Industrie als auch in vielen Forschungseinrichtungen ist die detaillierte Charakterisierung von Halbleiterschaltern eine stets wiederkehrende Aufgabe. Die Daten werden eingesetzt, um Leistungshalbleiter zu optimieren oder leistungselektronische Baugruppen realitätsnah in Berechnungen und Simulationen abzubilden.

Für diese ausführlichen Betrachtungen der Halbleiter bleibt im Regelstudium oft wenig Zeit, sodass am Fachgebiet EVS ein darauf gut abgestimmtes Praktikum im Umfang von vier Creditpoints erarbeitet wurde. Im Verlauf dieses Praktikums vermessen Studierenden selbstständig Halbleiter auf bewährter Si- und aktueller SiC-Basis und nutzen die erzielten Ergebnisse in einer anschließenden leistungselektronischen Simulation mittels Plexim PLECS. Hierdurch wird den Studierenden ein Einblick in die modernste Halbleitertechnik gewährt und der Unterschied zwischen Theorie und Praxis mit neuem Equipment gezeigt.

The detailed characterization of semiconductor switches is a recurring task both in industry and in many research institutions. The data is used to optimize power semiconductors or to scale power electronic assemblies realistically in calculations and simulations.

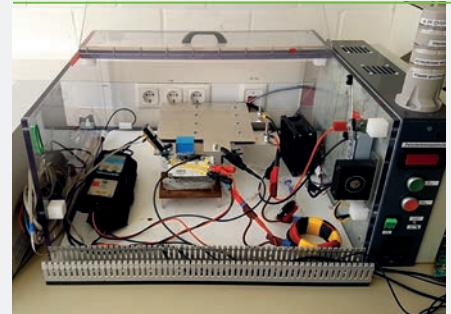
There is often little time for these detailed considerations of semiconductors during the study, so that a well-coordinated internship with four credit points was developed at the EVS department. During this internship, students independently measure semiconductors on a proven Si- and current SiC-basis and use the results achieved in a subsequent power electronic simulation with Plexim PLECS. This gives the students an insight into the most modern semiconductor technology and shows the difference between theory and practice with the latest equipment.

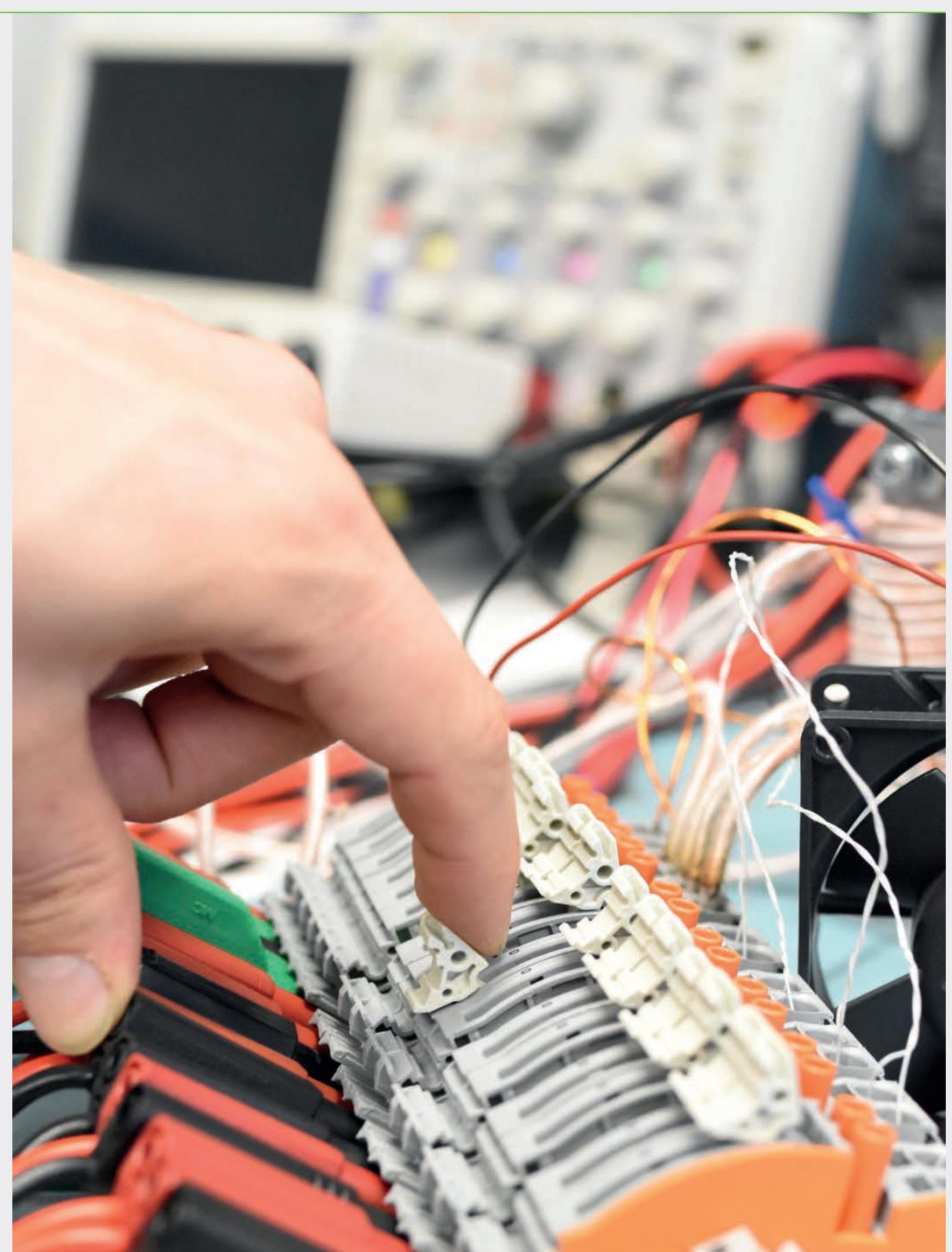


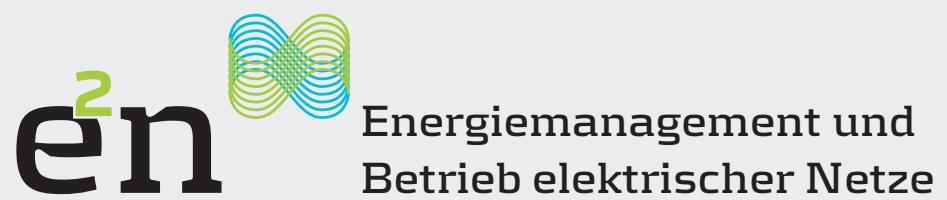
Praktikums-Versuchsstand für Studierende
Workplace for student-internships

Der Versuchsaufbau nutzt dabei die vom EVS entwickelten Softwaretools „ComCell“ und „TopBench“ (siehe entsprechenden Artikel in diesem Bericht). Im durchzuführenden Versuch wird dabei das etablierte Doppelpuls-Verfahren eingesetzt, mit welchem die Halbleiter bei einstellbaren Strömen, Spannungen und Temperaturen charakterisiert werden können. Durch die nutzerfreundliche Oberfläche des Programms (Abbildung 1), sowie der Sicherheitsmessbox mit automatischer Entladefunktion (Abbildung 2) können Studierende schnell in den Versuchsaufbau eingewiesen werden und anschließend selbstständig einzelne Versuche und Aufgaben bearbeiten. Dies ermöglicht eine optimale Ausbildung im Bereich moderner Leistungshalbleiter und realitätsnaher Simulationen von leistungselektronischen Systemen.

The basis of the entire experiment is the software-tools "ComCell" and "TopBench" (see other articles in this report for more details). In the experiment the well-known double pulse test method is used, which allows to characterize the semiconductors at arbitrary currents, voltages, and temperatures. Due to the user-friendly interface of the program (figure 1) and the safety measurement box (figure 2), students can be quickly trained in the experimental setup and then work independently on the individual experiments and tasks. This enables an optimal education in the field of modern power semiconductors and realistic simulations of power electronic systems.







Ansprechpartner

PROF. DR.-ING. MARTIN BRAUN (e²n)

Titel

DAS FACHGEBIET ENERGIEMANAGEMENT UND BETRIEB ELEKTRISCHER NETZE (e²n)

title

DEPARTMENT OF ENERGY MANAGEMENT AND POWER SYSTEM OPERATION (e²n)



Das Fachgebiet Energiemanagement und Betrieb elektrischer Netze (e²n) wurde im September 2012 im Fachbereich Elektrotechnik / Informatik gegründet. Das Fachgebiet vertritt als Teil des KDEE und in enger Kooperation mit dem Fraunhofer IEE die Forschung und Lehre in dem Themenfeld Energiemanagement und Betrieb elektrischer Netze. Hierbei wird die technisch und wirtschaftlich optimierte Auslegung, Regelung und Betriebsführung des zukünftigen dezentralen, digital vernetzten Energieversorgungssystems mit hohem Anteil erneuerbarer Energien als wichtige Herausforderung der Energiewende zur Sicherstellung einer resilienteren, sichereren, kosteneffizienten und nachhaltigen Energieversorgung betrachtet.

Wesentliche inhaltliche Schwerpunkte sind technisch-wirtschaftlich optimierte Konzepte und Verfahren für die Analyse, Auslegung, Regelung und Betriebsführung von elektrischen Netzen insbesondere:

- Regelung und Auslegung von Erzeugern, Verbrauchern, Speichern und Netzbetriebsmitteln zur Bereitstellung von Energie- und Netzdienstleistungen
- Verfahren für Energie- und Netzmanagement / Automatisierungslösungen in dezentralen Versorgungsstrukturen mit verschiedenen Aggregations- und Anreizkonzepten
- Verfahren für automatisierte Netzplanung / optimiertes Systemdesign
- Lösungen für resilientes Systemverhalten im Fehlerfall und für den Netzwiederaufbau

The Department of Energy-Management and Power System Operation (e²n) was founded in September 2012. As part of KDEE and in close cooperation with the Fraunhofer IEE the department's focus in teaching and research is on the technically and economically optimized design and control of the future decentralized, smart energy supply system with a high percentage of renewable energies to guarantee a resilient, secure, cost-efficient and sustainable energy supply.

The main focus is on technically and economically optimized concepts and approaches for the analysis, design, control and operation of power systems, especially:

- *Control and coordination of power sources, loads, storage and grid management tools for the provision of energy and ancillary services*
- *Approaches for energy and system management / automated solutions for decentralized supply structures with different concepts such as aggregation and incentive-based strategies*
- *Concepts for automated grid planning / optimal system design*
- *Solutions for resilient/robust system response in case of failures and for power system restoration*

An important methodical emphasis lies on the development of methods for modelling and simulations, which allows the analysis and characterization of these systems at different time scales and system levels, as well as multi-objective optimization of the design, control and operation of power systems.



Prof. Dr.-Ing. Martin Braun
Leiter des Fachgebietes e²n

Bereichsleiter Netzplanung und Netzbetrieb
am Fraunhofer IEE

Das Fachgebiet bietet folgende Lehrveranstaltungen an:
The following courses are offered by the department:

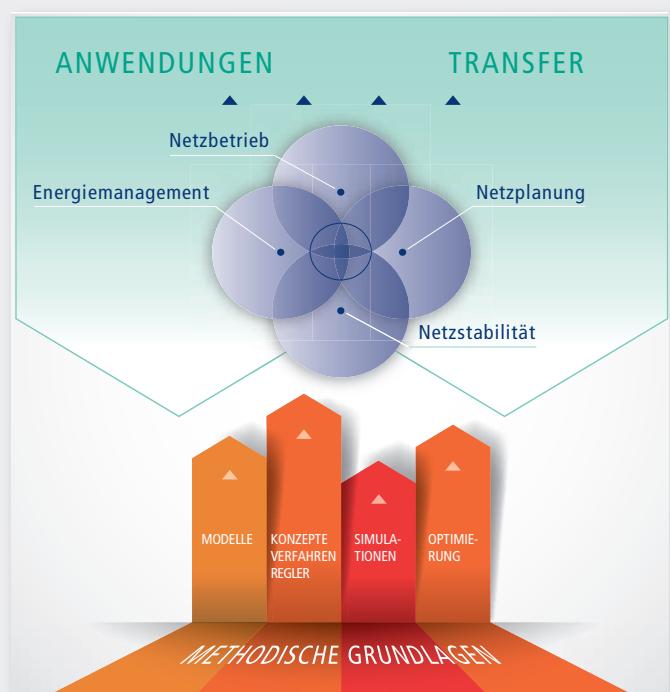
- **Berechnung elektrischer Netze**
- **Planung und Betriebsführung elektrischer Netze**
- **Intelligente Stromnetze**
- **Energiewandlungsverfahren**
- **Photovoltaik Systemtechnik (Teil 1 und 2)**
- **Power System Dynamics**
- **Energiemanagement in Gebäuden**
- **Seminar Intelligente Stromnetze**
- **Softwarepraktikum Netzsimulation**
- **Softwarepraktikum pandapower**
- **Praktikum Photovoltaik**
- **Energietechnisches Praktikum I/II**
- **(PV-Batterie-Systeme im Insel- und Netzparallelbetrieb)**

- Prof. Dr.-Ing. Martin Braun
- Prof. Dr.-Ing. Martin Braun und Dipl.-Ing. Bernd Gruß
- Prof. Dr.-Ing. Martin Braun und Dipl.-Ing. Bernd Gruß

Wesentliche methodische Schwerpunkte sind dabei die Entwicklung von Methoden zur Modellbildung und Simulation zur Analyse und Beschreibung des Systems in allen Zeitskalen und Systemebenen sowie die multikriterielle Optimierung der Auslegung, Regelung und Betriebsführung (inkl. Methoden der Komplexitätsreduktion).

Das Fachgebiet ist Teil des Kompetenzzentrums für Dezentrale Elektrische Energieversorgungstechnik (KDEE) und durch zahlreiche personelle Verknüpfungen eng mit dem Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik (IEE) verbunden. Die Zusammenarbeit basiert unter anderem auf gemeinsam betreuten studentischen Abschlussarbeiten und Promotionen, Angebot von Lehrveranstaltungen durch Fraunhofer-Wissenschaftler, Forschungsprojekten, der gegenseitigen Bereitstellung von Infrastruktur und Entwicklung von Softwaretools. Damit können ausgezeichnete Forschungsmöglichkeiten und breitgefächerte Lehrveranstaltungen angeboten werden.

The department is part of the Centre of Competence for Distributed Power Technology (KDEE) and cooperates closely with the Fraunhofer Institute for Energy Economics and Energy System Technology IEE in Kassel. The collaboration includes jointly supervised theses (Bachelor, Master, PhD), courses offered by Fraunhofer-scientists, joint research projects, the mutual provision of infrastructure, and joint development of software tools. Thereby, excellent research opportunities as well as a wide variety of courses can be offered.



Ansprechpartner

DIPL.-ING. CHRISTIAN HACHMANN (e2n)

Titel

PROMOTIONSvorhaben Einbindung verteilter Erzeugung beim Netz- Wiederaufbau

Das elektrische Energiesystem nach einem Ausfall wiederherzustellen (Netzwiederaufbau und Versorgungswiederherstellung) ist eine wichtige Aufgabe, auch wenn sie zum Glück selten durchgeführt werden muss. Naturgemäß müssen Pläne, die Netzbetreiber für diese Fälle erstellen, daher ohne aktuelle reale betriebliche Erfahrung mit großflächigen Ausfällen und dem anschließenden Wiederaufbau auskommen. Aus diesem Grund sind Simulationsuntersuchungen von besonderer Bedeutung.

Simulationsergebnis: Frequenzverlauf und Wirkleistungsaufteilung zwischen einem Dampfkraftwerk und einem Windpark bei Zuschaltung und anschließender Lastaufnahme

Simulation result: Frequency and active power sharing of a steam power plant and a wind farm during connection of wind farm and consecutive load connection

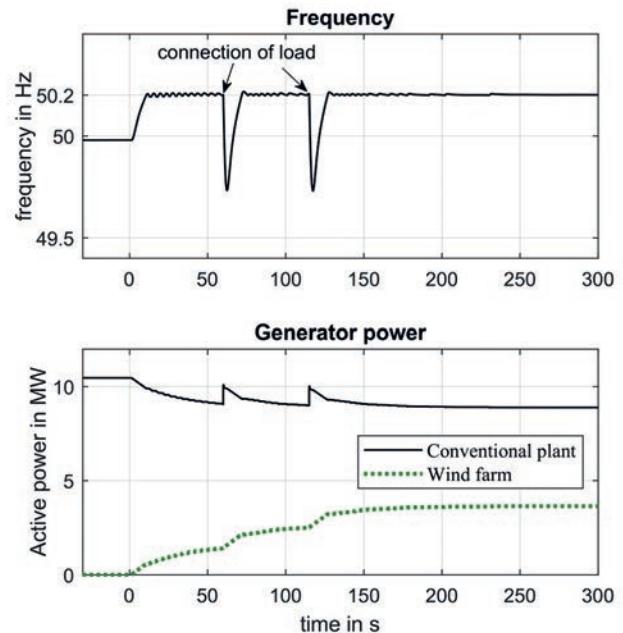
Darüber hinaus ist die Struktur des deutschen Energiesystems massiven Änderungen unterworfen, insbesondere durch die zunehmende Durchdringung dezentraler Erzeugung. Die Anzahl möglicher Szenarien nimmt durch die Wetterabhängigkeit dieser Erzeugung weiter zu und die schnelle Änderung stellt die Übertragbarkeit bisheriger Erfahrungen mit Netzausfällen weiter in Frage.

Technische Anforderungen an dezentrale Erzeugung sollten stets auch mit Blick auf den Netz- und Versorgungswiederaufbau beurteilt werden. Die Wechselwirkung und Lastaufteilung zwischen erneuerbarer und konventioneller Erzeugung verdient dabei besondere Aufmerksamkeit.

Der Beitrag der hier beschriebenen Arbeit besteht darin, systematisch den Einfluss einer Reihe von aktuell oder in Zukunft möglichen Eigenschaften und Einstellungen verteilter Erzeugung und ihre Wechselwirkung mit Netzwiederaufbau-Strategien, insbesondere im Verteilnetz, sowie Lastverhalten zu untersuchen. Dies geschieht insbesondere durch eine große Anzahl von Simulationsuntersuchungen.

title

PHD PROJECT: INTEGRATION OF DISTRIBUTED GENERATION IN POWER SYSTEM RESTORATION



Restoring the electric supply after a large scale black out (Power System Restoration, PSR) is an important, although very rare task. Naturally, the plans made by power system operators for this case are based on little to no practical and up-to-date experience with large scale blackouts and, therefore, based largely on simulation studies.

Also the structure of the German power system is rapidly changing due to the increasing penetration of distributed renewable generation (DER). Since this generation is highly weather-dependent, the number of possible scenarios is further increased. Furthermore, due to the rapid change, the availability of applicable real-world experience with a restoration situation is further decreased.

Proposed features and settings of distributed generators have to be investigated thoroughly with respect to their impact on PSR. The interaction with conventional power plants and the possible load sharing is of special concern here.

The contribution of this thesis is to systematically investigate the impact of a number of current and future DER-settings and capabilities and their interaction with possible control strategies at the DSO level and load behavior. The main method of investigation is to conduct a large number of time domain simulations.

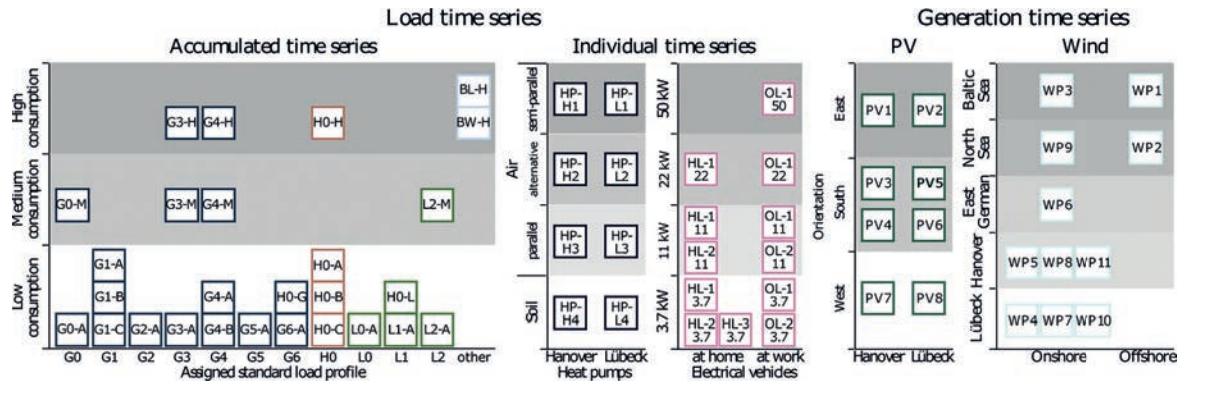
Ansprechpartner

STEFFEN MEINECKE, M.SC. (e²n)

Titel

SimBench

title

SimBench

Übersicht aller durch SimBench bereitgestellter Last- und Erzeugungszeitreihen

Overview of all load and generation time series provided within SimBench

Simulationsdatenbasis zum einheitlichen Vergleich von innovativen Lösungen im Bereich der Netzanalyse, Netzplanung und -betriebsführung

Lösungen und Algorithmen zur Verbesserung von Netzanalyse, Netzplanung und Netzbetriebsführung können ohne Netzdaten üblicherweise nicht sinnvoll entwickelt werden. Aufgrund der Vertraulichkeit realer Netzdaten von Netzbetreibern ist eine Reproduzierbarkeit von Studienergebnissen mit solchen Daten nicht gewährleistet. Ebenso ist dadurch die Transparenz der Forschung eingeschränkt und eine Vergleichbarkeit von Lösungen und Algorithmen nicht gegeben.

Im Forschungsprojekt SimBench wurde daher daher ein Benchmark-Datensatz entwickelt, welcher 2019 veröffentlicht wurde. Er umfasst kombinierbare Netzdaten aus der Höchst-, Hoch-, Mittel- und Niederspannungsebene inklusive dreier Varianten, Szenarien genannt, und einer Vielzahl zugehöriger Last-, Erzeugungs- und Speicherzeitreihen, siehe Bild 1. Um die Nutzbarkeit zu vereinfachen, stehen die Daten in vier verschiedenen Datenformaten zur Verfügung (csv-Tabellen, pandapower, Integral, PowerFactory) und Sincal-Daten kommen noch hinzu. Um außerdem die Nachvollziehbarkeit von Ergebnissen sowie Vergleiche zu vereinfachen, tragen SimBench-Netze und deren Kombinationen eindeutige Bezeichnungen, siehe dazu in Bild 2 die Darstellung der Netzauswahlmaske auf der Projekt-Homepage.

Nähere Informationen zum Projekt, den Veröffentlichungen sowie dem Datensatz finden Sie unter www.simbench.de

Voltage Level(s):

HVMV

Higher Voltage Level:
Urbanization Character:

urban

Parameterübersicht zur eindeutigen Identifikation eines SimBench-Netzes

Lower Voltage Level:
Subnet Number:

all

Overview of parameters for distinct naming of SimBench grids

Scenario:

1

Switch Representation:

with Switches

Download file: 1-HVMV-urban-all-1-sw

Simulation benchmark data to compare innovative solutions for power grid analysis, planning and operation

Solutions and algorithms for improving grid analysis, grid planning and grid operation usually cannot be developed reasonably without grid data. Due to the confidentiality of real grid data of system operators, a reproducibility of study results with such data is not guaranteed. Likewise, the transparency of research under these conditions is limited and establishing a comparability of solutions and algorithms is not possible.

Within the research project SimBench, a benchmark dataset has therefore been developed, which has been published in 2019. It comprises combinable grid data from extra-high, high, medium, and low voltage including three variants, called scenarios, and a large number of associated load, generation, and storage time series, see Fig. 1. To simplify usability, the data is available in four different data formats (csv tables, pandapower, Integral, PowerFactory) and Sincal data will be added soon. In order to simplify the comprehensibility of results as well as comparisons, SimBench grids and their combinations have unique names, see the screen shot of the grid selection mask on the project homepage in Fig. 2.

You can find further information on the project, the publications and the dataset on www.simbench.net

Gefördert durch:

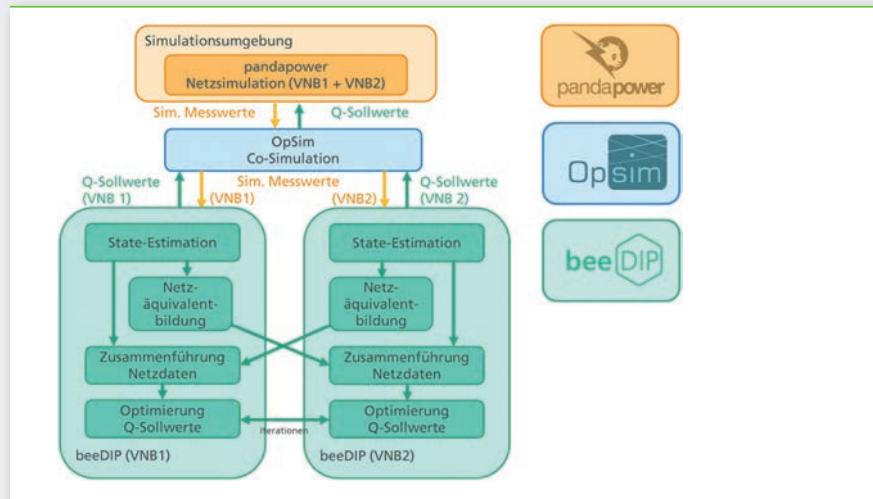
aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Gefördert durch: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 0325917A

RPC2 – Betriebsführungsmodul für ein optimiertes spannungsebenen- und netzbetreiberübergreifendes Blindleistungsmanagement

Im Rahmen des Forschungsprojekts RPC2 untersucht das Fachgebiet e²n in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IEE mögliche Betriebsführungsstrategien für ein optimiertes spannungsebenen- und netzbetreiberübergreifendes Blindleistungsmanagement in der Mittel- und Hochspannungsebene. Bei der Regelung von Blindleistungseinspeisung müssen mögliche Wechselwirkungen mit dem benachbarten Netz berücksichtigt werden, beispielsweise aufgrund von Blindleistungsquerflüssen über die Kuppelstellen. Aus diesem Grund ist der Austausch von Informationen über die Netze und aktuelle Zustände notwendig. Zur Informationsbereitstellung der notwendigen Zustandsparameter wurde die Entwicklung eines Moduls zur State Estimation vorangetrieben. Während die Zustandsschätzung in der Hochspannungsebene die Bereinigung von Messfehlern zur Aufgabe hat, soll in der Mittelspannungsebene aus einer geringen Anzahl an Messwerten ein Netzzustandsbild generiert werden. Das zweite Modul wird durch die Netzaquivalente abgebildet, die die Wechselwirkungen zwischen den beiden Netzen der Netzbetreiber möglichst realistisch nachbilden. Die Netzaquivalente werden unter den benachbarten Verteilnetzbetreibern (VNBs) ausgetauscht und mit den eigenen Netzinformationen zu einem Gesamtbild zusammengeführt. Für den betrachteten Netzzustand werden dann im dritten Modul die Q-Sollwerte für die dezentralen Erzeugungsanlagen im eigenen Netz optimiert, wobei in jeder Iteration des Optimierungsverfahrens Informationen über die Netzaquivalente ausgetauscht werden. Die aufgesetzte System- und Simulationsumgebung (siehe Abbildung 1) ermöglicht die Entwicklung und Analyse von Blindleistungs-Regelungsstrategien im Einzelnen sowie in Kombination der Verteilnetze.

RPC2 – System operation modules for optimized reactive power management across voltage levels and grid operators



System- und Simulationsumgebung für ein optimiertes spannungsebenen- und netzbetreiberübergreifendes Blindleistungsmanagement

In the research project RPC2, e²n in cooperation with the Fraunhofer IEE is investigating control strategies for optimized reactive power management across voltage levels and grid operators. When controlling reactive power feed-in, interactions with the adjacent grid must be considered, for example due to reactive power cross-flows via the coupling nodes. For this reason, the exchange of information about the grids and the current states is essential. In order to provide information on the state variables, a state estimation module is implemented. While the purpose of state estimation in the high-voltage level is the correction of measurement errors, in the medium voltage level, a grid state is generated from a small number of measurements. In the second module, grid equivalents are used to simulate the interactions between the two systems of the grid operators as realistically as possible. The grid equivalents are exchanged among the adjacent distribution system operators and merged with the own grid information. The Q setpoints of the distributed energy resources are then optimized in the third module, where information about the grid equivalents is exchanged in each iteration of the optimization procedure. The simulation environment (Figure 1) enables the development and analysis of reactive power control strategies of the distribution grids individually and in combination.

Gefördert durch:



Gefördert durch: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 0350003C

Ansprechpartner

DR.-ING. DANIEL DUCKWITZ; NILS WIESE, M.ENG. (e2n)

Titel

NETZREGELUNG 2.0: REGELUNG UND STABILITÄT IM STROMRICHTER-DOMINIERTEN VERBUNDNETZ

Im Forschungsprojekt „Netzregelung 2.0“ werden neue Stromrichter-Regelungen entwickelt und bewertet, um die Netzstabilität auch bei hoher Stromrichterdurchdringung zu gewährleisten. Die sogenannten netzbildenden Regelungsverfahren sollen somit einen hohen Einsatz an stromrichter gekoppelten erneuerbaren Erzeugern und Speichern ermöglichen.

Da auf absehbare Zeit noch viele herkömmliche Stromrichter ans Netz angeschlossen sein werden und sowohl momentan als auch zukünftig ein sich verändernder Anteil an Synchrongeneratoren ins Netz einspeisen wird, untersucht das Fachgebiet unter anderem das Zusammenwirken dieser Einheiten mit netzbildenden Regelungsverfahren. Hierfür finden neben simulativen Untersuchungen auch Laborexperimente statt. Der Laboraufbau ist in Abbildung 1 dargestellt.

Ein Netz mit hoher Stromrichterdurchdringung zeichnet sich durch eine geringere physikalische Trägheit und geringere Überstromfähigkeit stromrichter gekoppelter Anlagen im Fehlerfall aus. Die Regelungen wurden demnach im Hinblick auf die Einhaltung kritischer Frequenz- oder Winkelabweichungen als auch fachgebietsintern mit besonderem Fokus auf die Gewährleistung der Kurzzeitspannungsstabilität untersucht. Die bei Unterspannungen/Kurzschlüssen auftretenden Überströme können die Leistungselektronik beschädigen, weswegen mehrere Methoden zum Schutz der Stromrichter erarbeitet und bewertet wurden.

Derzeit werden die Regelungsverfahren bewertet und auf die Validierung in Labortests vorbereitet werden. Des Weiteren werden aus den Ergebnissen Anforderungen an zukünftige Stromrichter entwickelt.

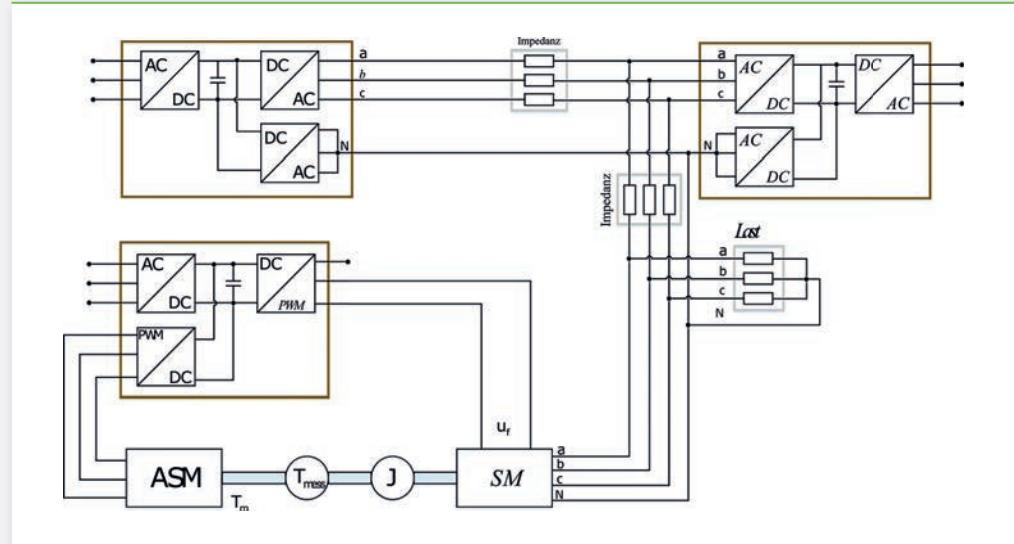
Gefördert durch:

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

**Gefördert durch: Bundesministerium
für Wirtschaft und Energie unter dem
Förderkennzeichen 0350023C**

title

NETZREGELUNG 2.0: CONTROL AND STABILITY IN CONVERTER-DOMINATED BULK POWER SYSTEMS



Schaltplan des Laboraufbaus
Circuit diagram of the laboratory setup

In the research project "Netzregelung 2.0", new converter control methods are being developed and evaluated to ensure grid stability even with high converter penetration. The so-called grid-forming control methods should thus enable a high use of converter-coupled renewable generators and storage systems.

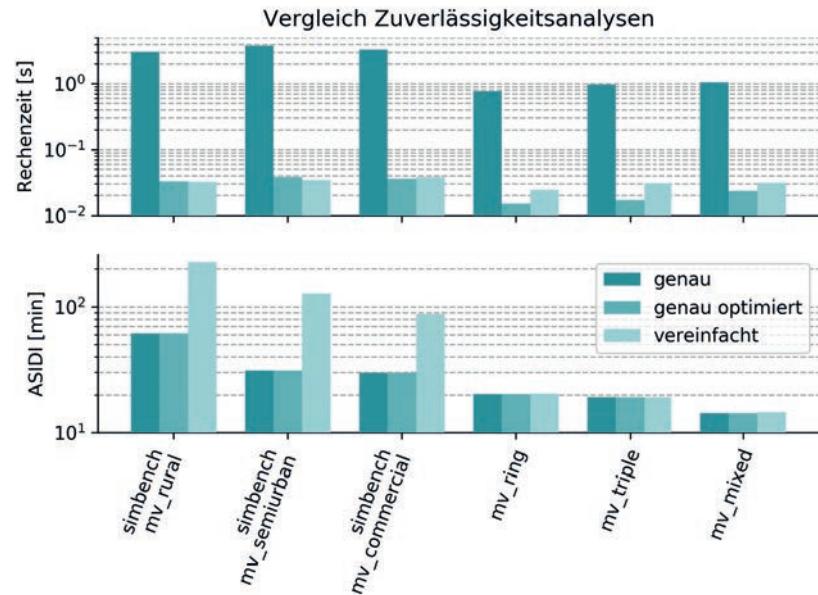
Since many conventional power converters will still be connected to the grid in the foreseeable future and a changing proportion of synchronous generators will continue to feed into the grid in the future, the department is investigating, among other things, the interaction of these units with grid-forming control methods. For this purpose, laboratory experiments are carried out in addition to simulative investigations. The laboratory setup is shown in figure 1.

A grid with high converter penetration is characterized by lower physical inertia and lower overcurrent capability of converter-coupled units in the event of a fault. Accordingly, the control methods were investigated in terms of maintaining critical frequency or angular deviations with a particular focus on ensuring short-term voltage stability. The overcurrents occurring during undervoltage/short-circuits can damage the power electronics, which is why several methods for protecting the converters were developed and evaluated.

The control methods are currently evaluated and the validation in laboratory tests is prepared. Furthermore, the results are being used to develop requirements for future converters.

Die Durch die Zunahme dezentraler Erzeugungsanlagen und die damit steigende Volatilität der elektrischen Netze, wird die Beobachtung und Regelung der Netze immer bedeutender. Die für die Netzbeobachtung und -regelung eingesetzten Sensoren und Steuerungen müssen miteinander und mit der Leitstelle kommunizieren können, wofür Informations- und Kommunikationstechnik in Form eines IKT-Netzes vorhanden sein muss. Das elektrische und das IKT-Netz gemeinsam bilden eine neue Energienetzstruktur, die für das Gelingen der Energiewende so geplant werden muss, dass sie sicher und zuverlässig ist. Durch die zunehmende Komplexität der neuen Netzstrukturen

gerät die manuelle Netzausbauplanung immer stärker an ihre Grenzen. Das Fachgebiet e²n hat sich daher im Rahmen des Projektes ENSURE damit beschäftigt, wie eine automatisierte und optimale Planung neuer Energienetzstrukturen unter Einhaltung der technischen und regulatorischen Vorgaben aussehen kann, die gleichzeitig auch Zuverlässigkeitssaspekte mit berücksichtigt. Für dieses Vorhaben wurde die bereits bestehende automatisierte Netzausbauplanung für elektrische Netze um die automatisierte Planung von IKT-Netzen erweitert und die bisher ebenfalls nur für elektrische Netze ausgelegte Zuverlässigkeitssbestimmung basierend auf der Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse (FMEA) weiterentwickelt, sodass auch die Zuverlässigkeit des IKT-Netzes bestimmt werden kann. Da die automatisierte Netzplanung eine Vielzahl unterschiedlicher Netzausbauvarianten bewerten muss, wurde die sonst sehr zeitaufwändige Zuverlässigkeitssbestimmung durch Einsatz verbesserter Verfahren deutlich beschleunigt und damit der Planungsprozess verkürzt.



Vergleich der Rechenzeit und der Zuverlässigkeitsskennzahl (ASIDI) der entwickelten Zuverlässigkeitssanalysen für verschiedene Netze

Comparison of calculation time and reliability key figure (ASIDI) between the developed reliability analyses for different grids

With increased integration of decentralised power generating systems and thus highly volatile electric grids the monitoring and control of energy grids is gaining significance. Sensors and control systems used for this purpose need to be interconnected and able to communicate with the control center by an information and communication technology grid (ICT-grid). Together, the electric grid and the ICT-grid form a new kind of energy grid structure which needs to be planned securely and reliably for a successful energy transition. The increasing complexity of the new structures is a growing challenge for manual grid planning. To face this problem, e²n developed an automated and optimal grid planning approach which is able to plan new energy structures considering technical, regulatory and reliability concerns. To achieve this, the solely electrical grid planning approach was extended with automated planning of ICT-grids. Additionally, the reliability analysis primarily used for electrical grids, based on failure mode and effect analysis (FMEA), was enhanced to determine the reliability of ICT-grids as well. Because automated grid planning needs to evaluate a variety of different possible grid variants and calculation time is an important factor, the time-to-result was drastically reduced by speeding up the reliability analysis.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

**Bundesministerium für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03SFK110
(e²n im Unterauftrag des Fraunhofer IEE)**

Ansprechpartner

JANNIS KUPKA, M.SC. (e²n)

Titel

MEO – MODELLEXPERIMENTE IN DER OPERATIVEN ENERGIESYSTEMANALYSE

title

MEO – MODEL EXPERIMENTS IN OPERATIVE ENERGY SYSTEM ANALYSIS

Überblick der unterschiedlichen Vergleichsszenarien, die von einem Basisszenario abgeleitet werden

Overview of the different compared scenarios which are derived from a basis scenario



Die Energiesystemanalyse untersucht und beantwortet Fragestellungen, wie unsere Energiesysteme gestaltet sein müssen, um aktuelle und zukünftige Herausforderungen meistern zu können. Zu diesen Fragestellungen gehört beispielsweise der möglichst schnelle und zeitgleich kostenoptimale Ausbau unserer Energienetze um die Anforderungen der zunehmend dezentralen Erzeugung erfüllen zu können. Energiesysteme sind - und werden zunehmend – komplexe Systeme, deren Analyse immer aufwändiger wird. Eine vollumfängliche Untersuchung ist nicht möglich, daher werden hauptsächlich Teilespektren der Systeme untersucht bzw. Vereinfachungen, wie z. B. hinsichtlich der zeitlichen und räumlichen Auflösung, vorgenommen.

Zur Analyse von Energiesystemen existieren vielzählige Anwendungen und Modelle, die bestimmten Teilespektren abdecken, aber auch immer wieder untereinander Überschneidungen in ihren Untersuchungsgebieten aufweisen. Das Fachgebiet Energiemanagement und Betrieb elektrischer Netze entwickelt in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IEE mit pandapower Pro eine dieser Anwendungen. Das Ziel des Projektes MEO ist es, die Anwendungen und Modelle der acht Projektpartner in verschiedenen Fragestellungen miteinander zu vergleichen. Dort wo die Modelle Überschneidungen aufweisen soll untersucht werden, ob die Ergebnisse vergleichbar sind und wenn nicht, welche Gründe dafür verantwortlich sind. Des Weiteren soll verglichen werden, wie jede Anwendung methodisch bei der Modellerstellung und der Simulation vorgeht und welche Anwendung bzw. welches methodische Vorgehen sich besonders eignet, um eine bestimmte Untersuchung durchzuführen.

Energy system analysis is studying and answering questions how energy systems need to be designed to cope with different challenges of today and in the future. One of this challenges for example is the fast and at the same time cost optimal expansion of energy systems to be able to distribute the increasing power feed in of decentralized power generating systems. Energy systems are increasingly complex systems whose analysis is getting more challenging. A comprehensive system analysis is impractical, sometimes impossible, and thus only parts of the system or a simplified system are analyzed.

Many different applications and models exist to analyze the different topics of energy systems and some of them have overlapping research topics. With pandapower Pro the Department of Energymanagement and Power System Operation together with Fraunhofer IEE is developing one of those applications. The objective of MEO is the comparison of applications and models of the eight project partners in different research topics. Results of overlapping analyses will be compared and if there are differences, causes will be identified. Furthermore, the methodical approaches for model creation and simulation will be compared and which method is most suitable to answer a specific research question.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

**Bundesministerium Wirtschaft und Energie unter dem
Förderkennzeichen 03ET4078C**

Ansprechpartner

MARYAM MAJIDI, M.SC. (e²n)

Titel

SpiN-AI: SPITZENKAPPUNG UND NETZ-AUSBAUPLANUNG – AUTOMATISIERT UND INTELLIGENT – POTENZIALANALYSEN UND ALGORITHMEN

title

SpiN-AI: SPIN-AI – AUTOMATED AND INTELLIGENT PEAK SHAVING AND GRID PLANNING – POTENTIAL ANALYSIS AND ALGORITHMS

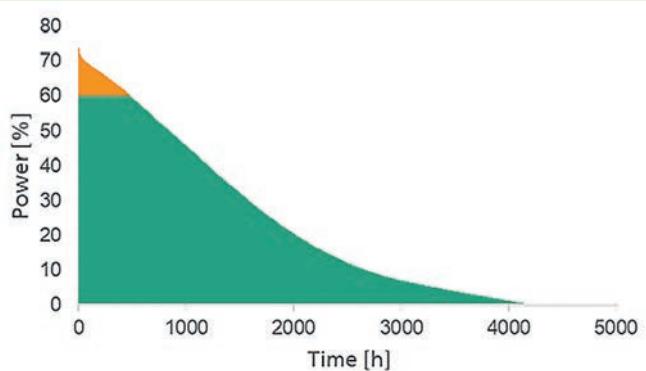


Bild 1 Dauerkurve der Einspeiseleistung einer PVAnlage: In Deutschland können bis zu 3% der Jahresenergie (orange) aus erneuerbaren Energien bei der Netzplanung zur Begrenzung der Einspeiseleistung durch Abregelung berücksichtigt werden.

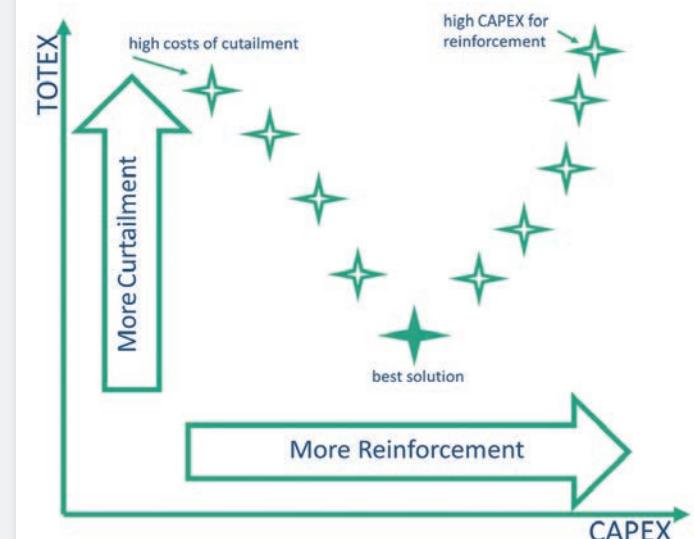
Fig. 1 Duration curve of the feed-in power of a PV plant: In Germany, 3% of the annual energy of renewable energy resources can be assumed for curtailment in grid planning.

Das Projekt SpinN-AI (Kooperation des Fachgebiets e²n und des Fraunhofer IEE) untersucht innovative und praxisnahe Methoden zur Spitzenkappung und Minimierung der dabei abgeregelten Energie und evaluiert deren Auswirkungen auf die optimalen Investitionskosten bei der (kurz- und langfristigen) Netzausbauplanung. In SpiN-AI werden verschiedene Optimierungsalgorithmen auf Basis der klassischen Lastflussrechnung, der optimalen Lastflussrechnung und auf Basis der risikobasierten stochastischen Programmierung sowohl für zeitreihenbasierte Betrachtungen entwickelt. Dabei werden historische Einspeise- und Verbrauchszeitreihendaten und Skalierungsfaktoren bezüglich prognostizierter Anforderungen verwendet. Um die Optimierung zu beschleunigen, erfolgt die Optimierung in der hochperformanten Skriptsprache Julia, die über eine

The project SpiN-AI (cooperation of the department e²n with the Fraunhofer IEE) investigates innovative and practical methods for peak shaving and minimization of the curtailed energy, besides evaluating their effects on optimum investment costs during short and long-term network expansion planning. In SpiN-AI, various optimization algorithms based on power flow, optimal power flow, and risk-based stochastic programming are studied and developed for both static and time series analyses, using historical feed-in and consumption time series data and scaling factors concerning forecast requirements. To accelerate the optimization, it is carried out in the high-performance script language Julia connected via a Python interface to the simulation environment pandapower. Additionally, an application-oriented and user-friendly user

Bild 2 Beispiel Abregelung vs. Verstärkungsaufwand: Suche nach dem wirtschaftlich optimalen Gleichgewicht zwischen Abregelung und Netzverstärkung: Mehr Verstärkungsinvestitionen, CAPEX (Capital Expenditures), verursachen weniger Engpässe, was in der kurzfristigen Planung weniger Kürzungen bedeutet. Bei der langfristigen Planung wären die CAPEX jedoch zu kostspielig, um Engpässe nur durch Verstärkung zu vermeiden. Dadurch spielt die Einschränkung eine wesentliche Rolle bei der Verringerung der TOTEX (CAPEX + Kosten der Einschränkung).

Fig. 2 Curtailment vs. reinforcement expenditures: searching for the economical optimum balance between curtailment and grid reinforcement: More reinforcement investment, CAPEX (Capital Expenditures), causes fewer congestions, which implies less curtailment in short-term planning. However, during long-term planning, CAPEX would be too costly to avoid congestion only by reinforcement. By that very fact, the curtailment plays an essential role in decreasing the TOTEX (CAPEX + cost of curtailment).



Python-Schnittstelle mit der Simulationsumgebung pandapower verbunden ist. Zusätzlich wird eine anwendungsnahe und benutzerfreundliche Benutzeroberfläche (SpiN-AI UI) entwickelt und getestet, um die untersuchten Methoden effizient anwenden zu können und den Verteilnetzbetreibern Pfalzwerke Netz AG, der Energie Netz Mitte GmbH (EAM Netz GmbH) und Avacon Netz GmbH ein operativ anwendbares Werkzeug zur Verfügung zu stellen.

interface (SpiN-AI UI) is developed and tested to efficiently apply the investigated methods and to provide an operative applicable tool for the distribution system operators Pfalzwerke Netz AG, Energie Netz Mitte GmbH (EAM Netz GmbH) and Avacon Netz GmbH.

Gefördert durch:



Gefördert durch: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 0350030B

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Ansprechpartner

GOURAB BANERJEE, M.SC. (e²n)

Titel

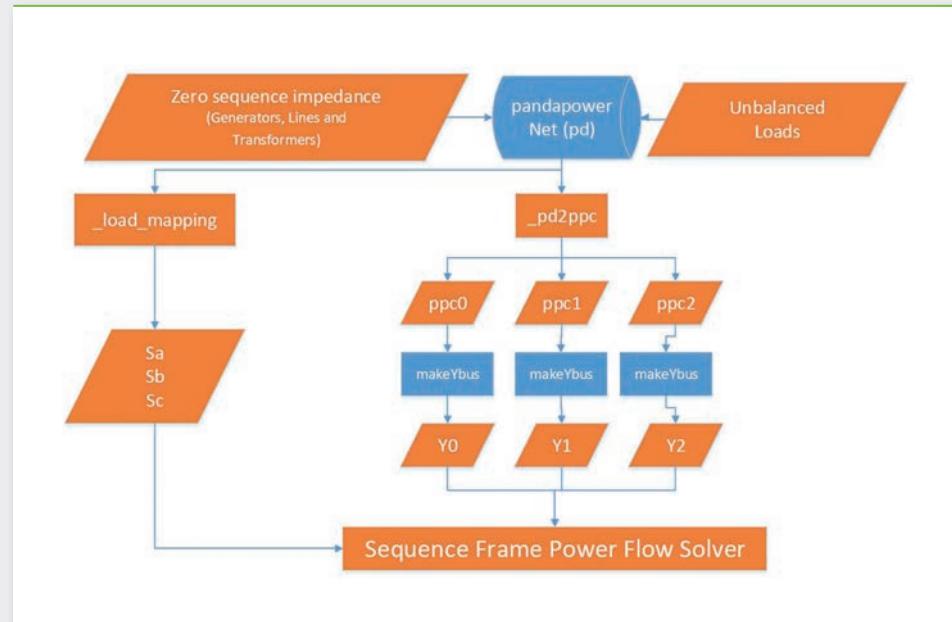
PANDAPOWER – ENTWICKLUNG VON ASYMETRISCHER LASTFLUSSBERECHNUNG FÜR DAS OPEN SOURCE TOOL

title

PANDAPOWER – DEVELOPMENT OF UNBALANCED POWER FLOW CALCULATION FOR THE OPEN-SOURCE TOOL



Dreiphasige Lastflussberechnung
Three-phase load flow calculation



Im Zuge des Ausbaus von Elektromobilität und Photovoltaik werden eine Vielzahl weiterer Ladestationen und PV-Anlagen in die bestehenden Verteilnetze (Niederspannung) integriert. Während größere Anlagen dreiphasig angeschlossen sind, werden kleine Ladestationen und PV-Anlagen oft auch einphasig angeschlossen und führen zu einer Asymmetrie in den Netzen. Daher ist eine automatisierte Berechnung asymmetrischer Netze notwendig, um Netzplanung und Betriebsführung zu vereinfachen. Pandapower bietet nun die Möglichkeit, derartige Netze zu modellieren und auf ihnen eine Lastflussberechnung durchzuführen. Die Implementierung wurde gegen die Simulationssoftware DlgSILENT PowerFactory sowie OpenDSS validiert.

Der Berechnungsalgorithmus verwendet das Verfahren der "symmetrischen Komponenten", um das asymmetrische Netz in Mit-, Gegen- und Nullsystem zu konvertieren (Abbildung 1). Die Lastflussberechnung erfolgt für das Mitsystem unter Verwendung des klassischen Newton-Raphson Verfahrens und zieht für Gegen- und Nullsystem die Stromgleichungen heran. Der Stand der Entwicklung erlaubt die Verwendung gängiger Netz-Elemente von Niederspannungs-Netzen, hierzu zählen unter anderem asymmetrischen Lasten- und statischen Generatoren sowie Leitungen, Busse und 2-Wicklungs-Transformatoren. Momentan unterstützen die Trafos die Schaltgruppen 'Dyn', 'YNyn' und 'Yzn', welche die am häufigsten verwendeten Schaltgruppen in Niederspannungsnetzen sind. Diese grundlegende dreiphasige Lastflussberechnung ist bereits als Teil des pandapower Open Source Tools verfügbar.

The future power system is expanding with a large number of new charging stations and PV systems in the distribution level (low voltage). While larger systems are connected in the three-phase system, smaller charging stations and small PV systems are also often connected in a single-phase system, and hence it leads to an asymmetry in the grids. Therefore, unbalanced network calculation is necessary for network planning and operation. The pandapower implementation is validated against DlgSILENT PowerFactory and OpenDSS simulation software.

The calculation algorithm uses the method of the 'symmetric components' to convert the asymmetric grid into positive-, negative- and zero-sequences (Figure 1). The algorithm considers the Newton-Raphson method for the positive sequence network and the current injection method for negative- and zero-sequence. The current state of development allows for the use of relevant network elements for the low voltage distribution grid, i.e., asymmetric load and static generators as well as cables, buses, and 2-winding transformers. Currently, the transformers support the following vector groups: 'Dyn', 'YNyn' and 'Yzn', which are the most commonly used transformer vector groups for low voltage distribution grids. This basic three-phase power flow module is already released in the pandapower open-source tool.

Ansprechpartner

GOURAB BANERJEE, M.SC. (e²n)

Titel

SCHUTZTECHNIKMODELLIERUNG IN PANDAPOWER

Der Netzschatz hat die Aufgabe, auftretende Störungen schnell und zuverlässig zu erkennen und durch das Ausschalten des gestörten Netzteiles das Energiesystem Schaden zu verhindern sowie den weiteren Betrieb der ungestörten Netzelemente zu ermöglichen.

Mit der steigenden Nachfrage nach elektrischer Energie und der Dekarbonisierung, Digitalisierung und Dezentralisierung von Verteilnetzen, ändern sich die Anforderungen an die Schutztechnik. Wechselrichterbasierte Erzeugung, Sektorkopplung und Automatisierung verschärfen zudem die Anforderungen an eine sichere und zuverlässige Verteilung, Leit- und Schutztechnik.

Automatisierte Untersuchungen von Schutzkonzepten in Verbindung mit IKT für eine schnelle und intelligente Auslösung werden immer wichtiger, um zukünftige Studien zu verbessern und das volle Potential von Automatisierung auszunutzen.

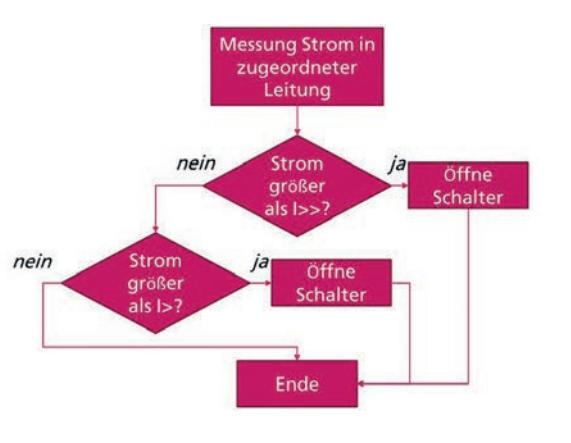


Abb. 1: Überstromschutz Auslöselogik
Overcurrent protection scheme

Ein Überstromschutzschutz-Modell ist bereits erfolgreich in pandapower implementiert und mit DigSILENT PowerFactory validiert. Abbildung 1 zeigt die Logik des Relaismodells.

Die Weiterentwicklung von Schutzmodellen sieht die Implementierung von Distanzschutz, Differentialschutz in Verbindung mit IKT vor wie in Abbildung 2 gezeigt.

PROTECTION MODELLING IN PANDAPOWER

The purpose of the protection system is to detect disturbances in the grid as fast as possible and to minimize damage by disconnecting the faulty part of the grid, and to ensure a safe operation of the undisturbed grid area.

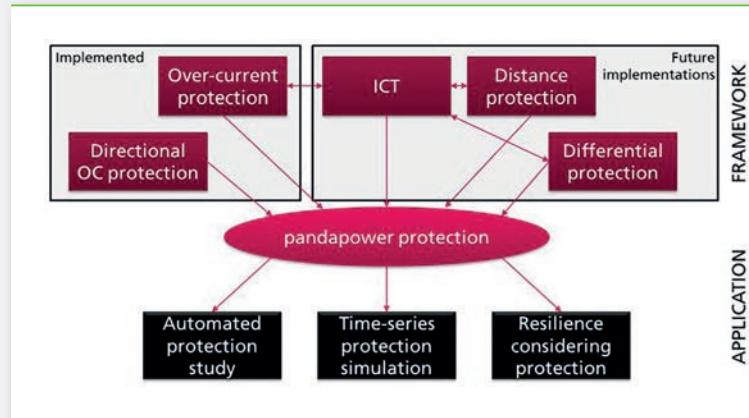


Abb. 2: Überblick Implementierung
Schutztechnik in pandapower
implementation of protection functionali-
ties in pandapower

With the increasing demand for electricity and ongoing decarbonization, digitalization, and decentralization of energy distribution systems, power system configurations change significantly. The inverter-based generation units, sector coupling, cell management concepts, and automation increase the requirements for a safe, secure, and reliable power supply, grid operation, and the challenges concerning protection systems.

Automated protection studies with the help of ICT for a fast and intelligent tripping concept in the distribution grid will be necessary to support futuristic grid study and to apply the full potential of automation.

An overcurrent-protection model is successfully implemented and validated in pandapower against DigSILENT PowerFactory simulation software, and a precise accuracy is achieved. The logic shown in figure 1 is applied. Figure 2 shows the status of protection in pandapower.

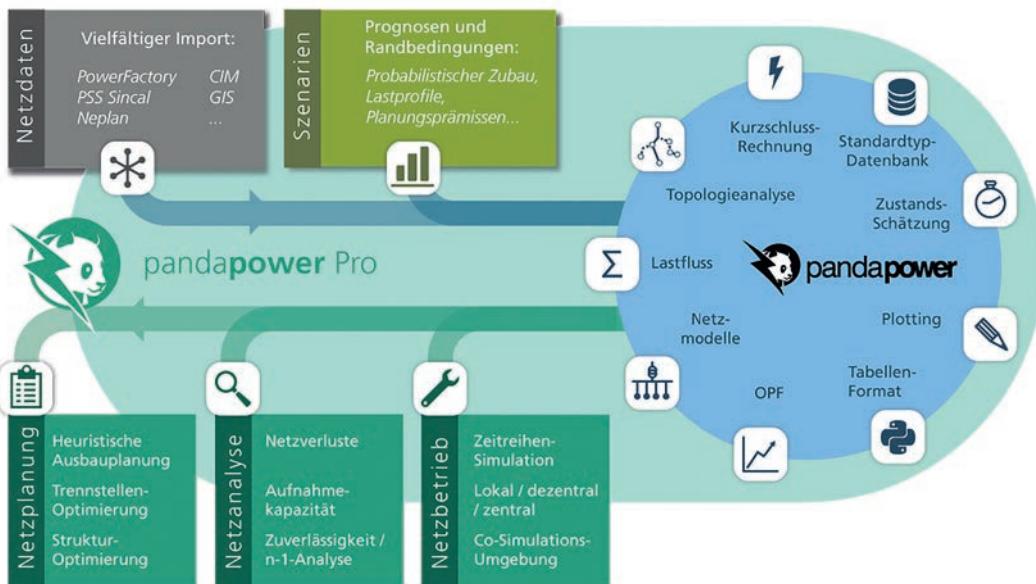
PANDAPOWER – OPEN SOURCE TOOL ZUR BERECHNUNG ELEKTRISCHER NETZE

PANDAPOWER – OPEN SOURCE ELECTRIC NETWORK CALCULATION TOOL

pandapower ist ein Open Source Netzberechnungsprogramm, das am Fachgebiet e²n in Kooperation mit dem Bereich Netzplanung und Netzbetrieb am Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik (IEE) in Kassel entwickelt wird. Es kombiniert die Datenverarbeitungs- und -analysebibliothek pandas mit dem Lastfluss-Solver von PYPOWER zu einem nutzerfreundlichen Netzberechnungsprogramm zur automatisierten Analyse und Berechnung elektrischer Netze (www.pandapower.org). Die flexible Datenstruktur erlaubt eine umfassende Modellierung und Analyse elektrischer Netze mit einem hohen Automatisierungsgrad. Im Gegensatz zu vielen anderen Open Source Netzberechnungstools basiert pandapower nicht auf einem Knoten/Kanten-Modell sondern auf elektrischen Elementen. So können Netze direkt aus elektrischen Elementen wie Leitungen, Schaltern, Generatoren, Zwei-/Dreiwicklungstransformatoren, Ward-Äquivalenten, DC-Leitungen etc. aufgebaut werden. Zur Netzanalyse beinhaltet pandapower Module für Lastfluss- und optimale Lastflussberechnung (OPF), Zustandsschätzung, Kurzschlussrechnung und Topologiesuchen. Außerdem enthält pandapower ein umfangreiches Plotting-Modul, welches das Erstellen von Strukturplänen sowie geographischen Netzplänen erlaubt. pandapower ist heute bereits weltweit bei Netzbetreibern für Netzplanung und Netzbetrieb im Einsatz. Es wird sowohl an vielen Forschungsinstituten und Universitäten als auch von Beratungsinstituten und der Bundesnetzagentur für Netzstudien verwendet.



pandapower is an open source network calculation tool developed at e²n in cooperation with the Power System Planning and Operation Division at the Fraunhofer Institute for Energy Economics and Energy System Technology (IEE) in Kassel. It combines the data analysis library pandas and the power flow solver of PYPOWER to create an easy to use network calculation program aimed at automation of power system analysis and optimization of electric power systems (www.pandapower.org). It provides a flexible data structure for comprehensive modelling of electric power systems that allows a high degree of automation in power system analysis. In contrast to many other open source network calculation tools, pandapower is based on electric elements rather than on a bus/branch model. Networks can thus consist of elements such as lines, switches, generators, two- and three winding transformers, ward equivalents, DC lines and more. For network analysis, pandapower provides modules for power flow, optimal power flow (OPF), state estimation, short-circuit calculation and topological searches. The extensive plotting module allows plotting of



Die pandapower Pro Struktur
The pandapower Pro Framework

	MATPOWER 6.0	PYPOWER 5.1.2	PSAT 2.1.10	OpenDSS 7.6.5	PyPSA 0.10	GridCal	GridLAB-D 3.2	Pandapower 2.5.0
ZIP-load			✓	✓		✓	✓	✓
Line	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2-Winding Transformer (Π)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2-Winding Transformer (T)				✓	✓		✓	✓
3-Winding Transformer			✓	✓		✓	✓	
DC Line	✓		✓	✓		✓	✓	
Ideal Switches								✓
Vol.-Controlled Generator	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Static Load / Generation	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Shunt	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Asymmetrical Impedance								✓
Ward Equivalents								✓
Storage Uni			✓	✓		✓	✓	

Die pandapower Pro Struktur
The pandapower Pro Framework

Zusätzlich zu den als Open Source Software verfügbaren pandapower Kernmodulen werden am Fachgebiet e²n in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IEE vielfältige Tools in den Bereichen Netzbetrieb, -planung und -optimierung entwickelt (www.pandapower.pro). Diese Tools werden auf Basis der durch verschiedene Projekte und Netzbetreiber gegebenen Anforderungen stetig weiterentwickelt und fügen sich so in ein umfassendes Framework zur Netzanalyse und -optimierung ein.

In Zukunft soll der Fokus noch weiter auf der Erweiterung der Schnittstellen von pandapower zu Open Source Optimierungstools und – Frameworks, wie z. B. dem Julia-Package PowerModels.jl oder dem Python-Package EGRET liegen. Hiermit können Standard-Probleme wie Optimale Lastflussrechnungen durchgeführt werden. Aber diese Schnittstellen ermöglichen auch den Zugang zu topologischen Optimierungen, wie einer Trennstellenoptimierung oder sogar einer Netzausbauoptimierung. Im Hintergrund können mit diesen Tools beliebige Solver wie z. B. CPLEX oder Gurobi ausgewählt werden, so dass man für jedes Problem flexibel neu entscheiden kann, welcher Solver passend ist.

Weitere Informationen: www.pandapower.org

structural network plans as well as geographical network plans. pandapower is already applied internationally by distribution and transmission system operators in grid planning and operation today. In addition, many research institutions and universities as well as consulting companies and the German Federal Grid Agency apply pandapower for their network studies. Additionally to the open source pandapower core, a variety of different tools for network planning, optimization and operation are developed at e2n and Fraunhofer IEE (www.pandapower.pro). These tools are based on the specific requirements of different projects and network system operators to build a comprehensive network analysis and optimization library.

In the future, the focus will be even more on extending the interfaces of pandapower to open source optimization tools and frameworks, such as the Julia package PowerModels.jl or the Python package EGRET. These can be used to perform standard problems such as optimal load flow calculations. In addition to this, these interfaces allow access to topological optimization, such as a disconnection optimization or even a network expansion optimization. In the background, these tools can be used to select any solver, such as CPLEX or Gurobi, so that one can flexibly decide which solver is suitable for each problem.

Ansprechpartner

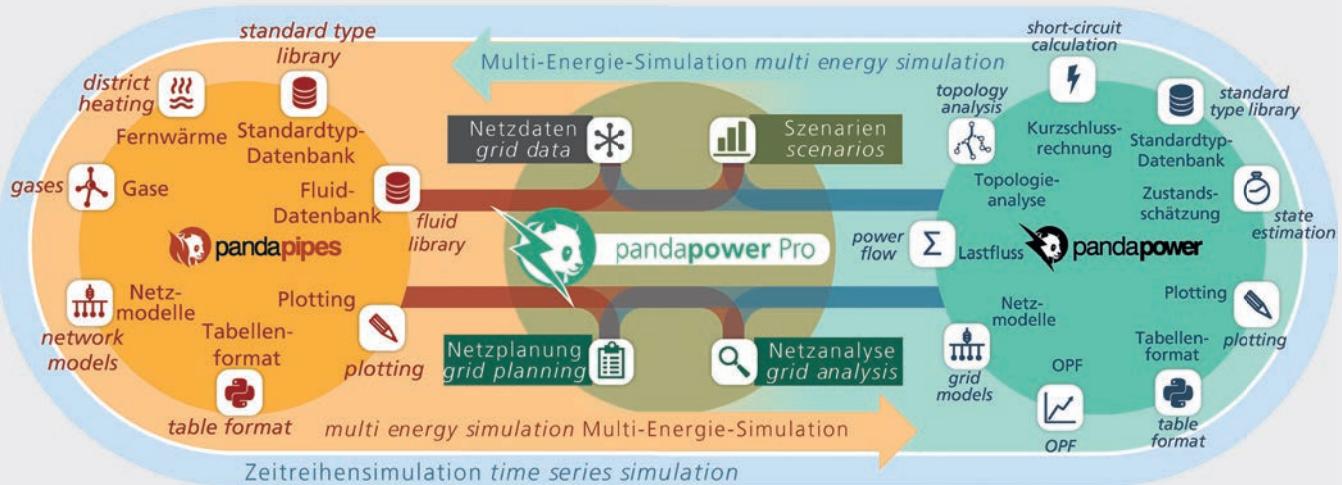
JOLANDO KISSE, M.SC. (e²n); SIMON RUBEN DRAUZ, M.SC. (e²n, IEE)

Titel

PANDAPIPES – OPEN SOURCE TOOL ZUR BERECHNUNG VON ROHRNETZEN UND SEKTORENKOPPLUNG

title

PANDAPIPES – OPEN SOURCE TOOL FOR PIPE FLOW CALCULATIONS AND COUPLED NETWORK SIMULATION



„pandapipes“ ist ein Open Source Programm zur Berechnung von Gas-, Wasser- und Wärmenetzen. Es wird vom Bereich „Netzplanung und Netzbetrieb“ des Fraunhofer IEE und dem Fachgebiet e²n entwickelt. In pandapipes können u. a. Erdgas-, Wasserstoff- und Wasserstoffeigenschaften auf einfache Weise aus einer integrierten Bibliothek abgerufen werden, um in Simulationen Volumenströmen und Druckverlusten zu ermitteln. Die Berechnungen erfolgen mit dem Newton-Raphson-Verfahren und verschiedenen Rohrreibungsmödellen. Im Vergleich mit kommerziellen Netzberechnungsprogrammen hat sich gezeigt, dass mit pandapipes eine starke Verkürzung der Rechenzeit erreicht werden kann.

Durch eine enge Anlehnung an das etablierte Open Source Programm pandapower zur Stromnetzberechnung sind viele bekannte Funktionen übertragbar. In Verbindung mit pandapower ist es zudem möglich, beliebig viele Strom-, Gas- und Wärmenetze kombiniert zu berechnen, um energieträgerübergreifende Verbindungen – wie z. B. Elektrolyseure – mit in die Betrachtungen einfließen zu lassen. Ergänzend zu den öffentlich frei verfügbaren Modulen wird vom Fraunhofer IEE und dem Fachgebiet e²n das interne „pandapower Pro“-Modul um zusätzliche Funktionen für pandapipes erweitert, beispielsweise zur Netzplanung und Optimierung sowie zum Einlesen von Netzdaten aus anderen Netzberechnungsprogrammen.

pandapower und pandapipes lassen sich zur sektorenübergreifenden Simulation von Strom- und Gasnetzen verbinden. Mit pandapower Pro werden tiefergehende Analysen und Studien durchgeführt.
pandapower and pandapipes can be combined for coupled power and gas network calculations. With further tools from pandapower pro, extensive network studies and analyses can be conducted.

Weitere Informationen: www.pandapipes.org



Elektrolyseurstandorte zur Entlastung im Mittelspannungsnetz und Wasserstoffbeimischung in das Gasnetz einer Kleinstadt.
Evaluation of different electrolyser locations in an example town to provide flexible load in the medium voltage network and to feed in hydrogen into the natural gas network by blending.

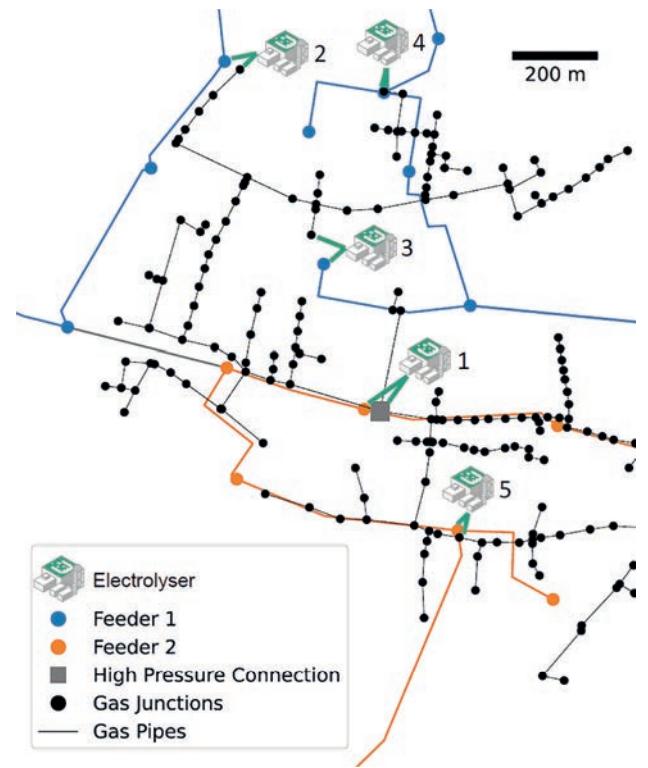


Figure from: Lohmeier, D.; Cronbach, D.; Drauz, S.R.; Braun, M.; Kneiske, T.M. (2020): Pandapipes: An Open-Source Piping Grid Calculation Package for Multi-Energy Grid Simulations. In: Sustainability 12 (23), S. 9899 (adapted and cropped)

„pandapipes“ is an open source tool for the calculation of gas, water, and district heating networks. It is developed by the Grid Planning and Grid Operation Division of the Fraunhofer IEE and e2n. Several pre-defined fluids like natural gas, hydrogen and water easily be used for pipe flow calculations. These calculations are based on the Newton-Raphson algorithm and different friction models. In comparison with established closed-source network simulation software, pandapipes accelerates the simulations significantly.

Since the internal structure of pandapipes is based on the open source tool pandapower for electrical network simulation, many of the functionalities of pandapower can be easily transferred and applied on piping networks. Further, the mutual use of pandapipes and pandapower enables the user to couple different power, gas, and district heating networks and consider interactions in the simulations. For example, it is possible to model coupling elements like electrolyzers and combined heat and power plants. In addition to the public software packages, Fraunhofer IEE and e2n developed further sophisticated extensions in the “pandapower Pro” module that are used in grid studies, like network planning and operation and import/export tools for commercial network simulation software.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Further information can be found on www.pandapipes.org.

Gefördert durch: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie unter den
Förderkennzeichen 03SIN411, 03EGB0009G und 03ET4069C

Ansprechpartner

DR. SEBASTIAN WENDE-VON BERG (e²n)

Titel

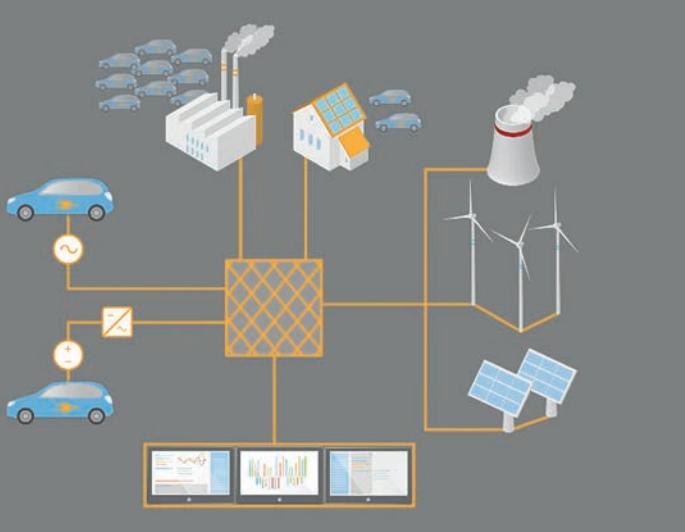
LADEINFRASTRUKTUR 2.0**Optimierung des koordinierten Ausbaus und Betriebs der Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge und der Verteilungsnetze**

Das Projektziel des Verbundvorhabens mit dem Fraunhofer IEE mit Netzbetreibern und Vertretern der Automobilbranche ist die energie- und netzwirtschaftliche Optimierung der Ladeinfrastruktur von Elektrofahrzeugen. Dabei wird untersucht, inwiefern notwendiger Netzausbau durch den Einsatz intelligenter Ladestrategien und -technik und intelligenter Anreizsysteme sinnvoll reduziert werden kann. Zunächst wird auf Basis realer Fahrprofile das erwartete Ladeverhalten von Elektrofahrzeugen zeitlich aufgelöst dargestellt, um Ladeprofile abhängig von der Region, Fahrleistungsklasse und dem Haushaltstyp Ladepunkten zuordnen zu können.

title

CHARGING INFRASTRUCTURE 2.0**Optimization of the coordinated expansion and operation of the charging infrastructure for electric vehicles and the distribution grid**

The project objective is to economically optimize the energy and grid management of the charging infrastructure for electric vehicles. The project investigates the extent to which the necessary grid expansion can be reduced through the use of intelligent charging strategies and technology and intelligent incentive systems. First, the expected charging behavior of electric vehicles is presented in a time-resolved manner on the basis of real driving profiles in order to be able to assign charging profiles to charging points depending on the region, driving performance class and household type.

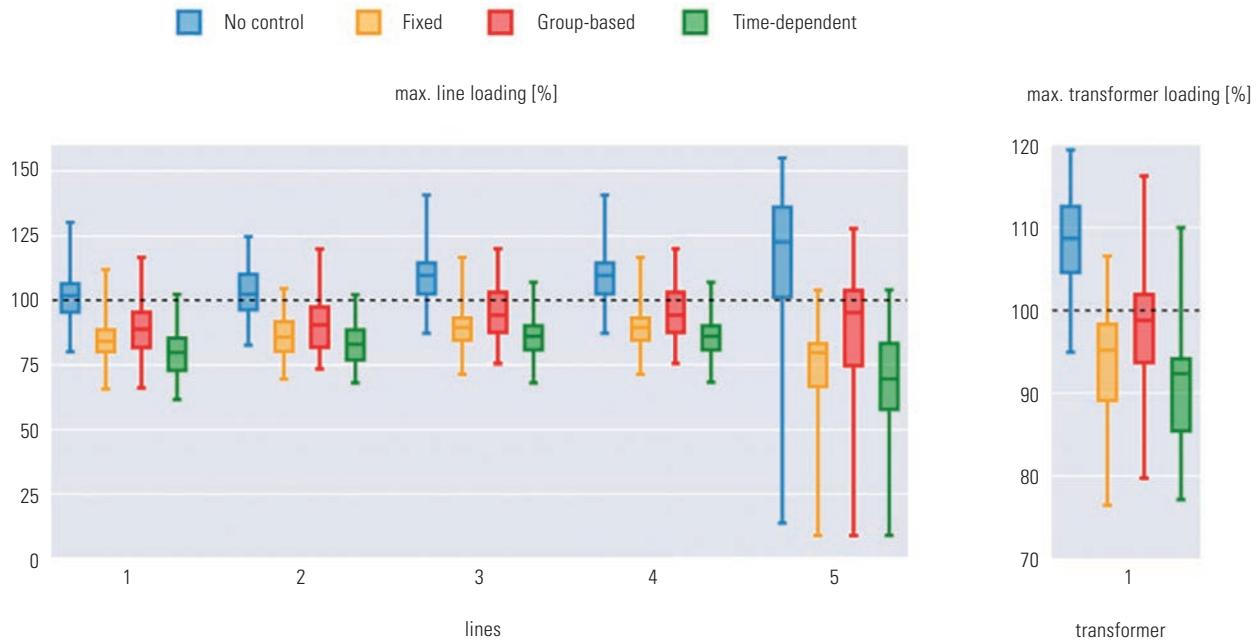


Ein wichtiger Aspekt bei der Netzplanung ist die Berücksichtigung von Regelstrategien für Ladevorgänge. Daher wurde im Rahmen des Projekts ein hybrider Ansatz zur zeitreihenbasierten Worst-Case Netzplanung entwickelt. In einer Fallstudie wurde er auf ein reales Niederspannungsnetzmodell angewendet, um vier verschiedene Strategien hinsichtlich ihres Potenzials zur Reduzierung von Netzengpässen zu vergleichen. Dazu gehören feste und zeitabhängige Leistungsbeschränkungen, sowie Leistungsbeschränkungen für wechselnde Gruppen. Es zeigte sich, dass alle Strategien in der Lage sind, die maximale Leistungs- und Transformatorbelaetzung signifikant zu reduzieren, wobei sich der zeitabhängige Ansatz als am effektivsten erwies.

Im Projekt „Ladeinfrastruktur 2.0“ entwickeln Energieversorger, Ladetechnik-Hersteller und Wissenschaftler an der Universität Kassel und dem Fraunhofer IEE gemeinsam integrierte Lösungen zur Integration von Elektromobilität in Verteilnetzen – dabei kommt es besonders auf intelligente Lademanagement und kostenoptimale Lösungen für die Netzausbauplanung an.

In the "Charging Infrastructure 2.0" project, energy suppliers, charging technology manufacturers and scientists at the University of Kassel and Fraunhofer IEE are jointly developing integrated solutions for integrating electromobility into distribution grids - with a particular focus on intelligent charging management and cost-optimized solutions for grid expansion planning.

An important aspect of grid planning is the consideration of control strategies for charging processes. Therefore, a hybrid approach for time-series-based worst-case grid planning was developed within the project. In a case study, it was applied on a real low-voltage grid model to compare four different strategies in terms of their potential to reduce grid congestion. These included fixed and time-dependent power curtailment, as well as power curtailment for alternating groups of charging points. All strategies were capable of significantly reducing maximum line and transformer loading, while the time-dependent approach exhibited the best performance. Another focus concerns the development of methods for grid state



Vergleich der Netzelastungen ausgewählter Leitungen und der Transformatorbelastung bei vier verschiedenen Ladestrategien für Elektrofahrzeuge in einem realen Niederspannungsnetz
Comparison of line loadings for selected lines and transformer loading between four different EV charging strategies in a real low-voltage grid

A. Schoen, J. Ulfers, H. Maschke, E. Junge, C. Bott, L. Thurner, M. Braun; "Considering Control Approaches for Electric Vehicle Charging in Grid Planning", ETG Kongress 2021, yet unpublished

Ein weiterer Schwerpunkt betrifft die Entwicklung von Methoden zur Netzstatusschätzung und -prognose in der Niederspannung mittels künstlicher neuronaler Netze, um proaktive Regelstrategien zu ermöglichen.

Die genannten Entwicklungen und die dafür notwendige Kommunikations- und IT-Infrastruktur werden im Rahmen eines Feldtests in zwei Ortsnetzen validiert.

estimation and forecast for low voltage grids utilizing artificial neural networks to enable proactive control strategies.

The developments and the communication infrastructure required for them are being validated in two local grids as part of a field test.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

**Gefördert durch: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie unter dem
Förderkennzeichen 0350048D
Laufzeit des Vorhabens: 01.12.2018 – 30.11.2022**

Laboraufbau bestehend aus
Umrichterschränken, Schaltschrank
sowie Maschinensatz
*Microgrid infrastructure consisting of
inverter cabinets, switching cabinet
and machine set*



Möglichkeit zur Untersuchung des Verhaltens von Microgrids mit hohem Anteil erneuerbarer Erzeugung

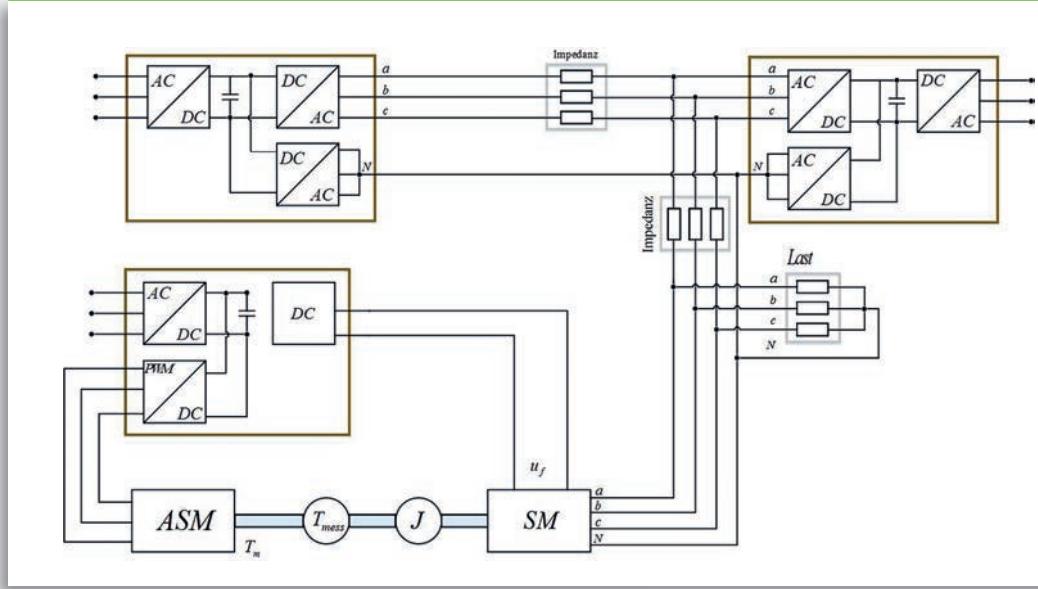
Im Jahr 2016 wurde am Fachgebiet e²n ein Microgrid-System bestehend aus zwei Umrichtern, einem Maschinensatz und einer Konfigurationseinheit aufgebaut und in Betrieb genommen.

Als Erweiterung des Systems ist ein weiterer Schaltschrank mit schaltbaren Induktivitäten hinzugekommen. Diese können für Untersuchungen zur Spannungsstabilität und zum Validieren von Regelungsstrategien eingebunden werden. Der Standort des Labors ist das Design-Zentrum Modulare Versorgungstechnik (DeMoTec), welches gemeinsam von Fraunhofer IEE und der Universität Kassel betrieben wird. Die Umrichter sind über eine Matlab/Simulink-Schnittstelle frei programmierbar. Ein Umrichter wird zur Ansteuerung des Maschinensatzes verwendet. Der andere Umrichter kann als Spannungs- oder Stromquelle konfiguriert werden. Damit lässt sich beispielsweise das Verhalten einer Photovoltaik-Anlage nachbilden. Die Leistungsklasse der Umrichter und des Maschinensatzes liegt bei 15 kVA. Das System ist für eine Nennspannung von 400 V ausgelegt. Über den Konfigurationsschrank lassen sich alle Komponenten des Systems auf praktische Weise verschalten. Das Hinzuschalten von weiteren Elementen, wie beispielsweise einer dreiphasigen Last oder weitere regenerative Energiequellen, ist ebenfalls möglich. Dadurch können sehr komplexe Systeme verschaltet werden, die für anstehende Untersuchungen messtechnisch erfasst werden

Experimental environment to study the behaviour of microgrids with a high share of renewable energy generation

In 2016, a microgrid system has been set up consisting of two converters, a machine device and a configuration unit, put into operation in the e²n department.

Meanwhile, another control cabinet with switchable inductances has been added to this system. These additional inductances can be used for evaluation of voltage stability and for the validation of control strategies. The laboratory premises is the Design-Centre for Modular Supply Technology (DeMoTec), operated jointly by Fraunhofer IEE and the University of Kassel. The converters are freely programmable via a Matlab/Simulink interface. A converter is used to control the machine set. The secondary inverter is supposed to be configured as a voltage or current source. For example, this can be used to simulate the behaviour of a photovoltaic system. The performance class of the converter and the machine is about 15 kVA. The system is designed for a nominal voltage of 400 V. All components of the system can easily be connected via the configuration cabinet. It is also possible to connect additional elements, such as a three-phase load or other additional regenerative energy sources. This allows the operation of very complex interconnected systems, which is supposed to be recorded for upcoming examinations. To be able to analyse and



Verschaltungsplan des Laboraufbaus

Circuit layout of the laboratory setup

müssen. Um solche komplexen Systeme analysieren und bewerten zu können, ist eine taktsynchrone Erfassung sämtlicher Betriebspараметer wie Spannungen, Ströme, Drehmomente, Temperaturen, Schwingungen, etc. erforderlich. Eigens für solche Anwendungen existiert im FG e2n ein sehr leistungsfähiger Poweranalyser, der diese Anforderungen hardware- und softwareseitig mit bis zu 12 Leistungskanälen (Spannung und Strom) in einem Gerät vereinigt.

Vielphasige Leistungsmessung/Analyse von elektrischen Netzen, Antrieben und Antriebssträngen, Wechselrichter/Gleichrichter und anderen elektrischen Komponenten sind möglich. Messdaten werden in Echtzeit zur Verfügung gestellt und können online sowie nachträglich mathematisch verknüpft werden.

Mit dem Versuchsaufbau soll das dynamische Verhalten von Microgrids untersucht werden. Der Fokus liegt dabei insbesondere auf der Wechselwirkung zwischen der Regelung von Synchrongeneratoren und stromrichterbasierten Anlagen, wie beispielsweise Photovoltaikanlagen.

evaluate such complex systems, a clock-synchronous supervision of all operating parameters such as voltages, currents, torques, temperatures, oscillation, etc. is mandatory. The FG e2n has a sophisticated Power Analyzer for such applications, combining these hardware and software requirements with up to 12 power channels (voltage and current) in one device.

Multi-phase power measurement / analysis of electrical network drives and powertrains, inverters/rectifiers and of other electrical components is possible. Measurement data is made available in real time and can be directly mathematically linked online as well as afterwards.

The experimental setup is intended to examine the dynamic behaviour of microgrids. The particular focus is on the interaction between the control of synchronous generators and power converter-based systems, such as photovoltaic systems.



Ansprechpartner

JOLANDO KISSE, M.SC. (e²n)

Titel

HYBRID GRID – ANSCHLUSSMÖGLICHKEITEN VON OFFSHORE-WINDPARKS UNTER BERÜCK- SICHTIGUNG VON SEKTORENKOPPLUNG

Um Deutschland bis 2050 weitestgehend klimaneutral zu gestalten, wird unter anderem ein deutlicher Ausbau der Offshore-Windenergie notwendig sein. Zudem wird „grüner“ Wasserstoff – erzeugt via Wasserspaltung mit erneuerbarer Energie – voraussichtlich eine tragende Rolle als Ersatz von kohlenstoffhaltigen Brennstoffen und Grundstoffen in der Industrie einnehmen.

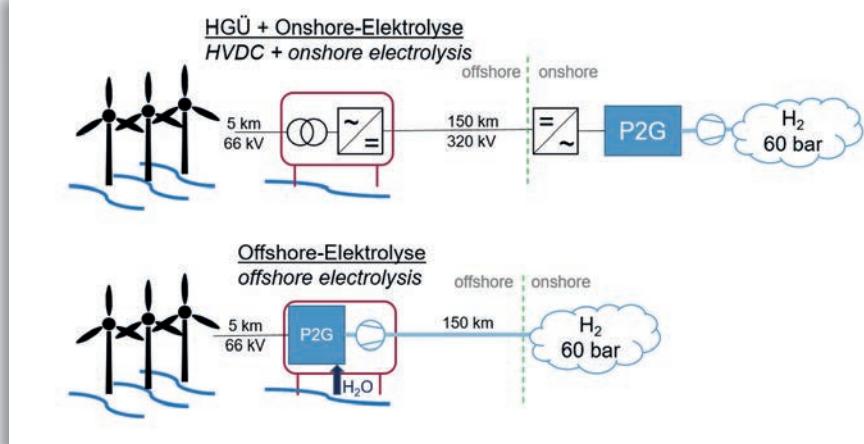
title

HYBRID GRID – OPTIONS FOR OFFSHORE WINDFARM CONNECTIONS WITH DIFFERENT ENERGY CARRIERS

Since Germany decided to strive for climate neutrality in 2050, a massive increase in offshore wind energy will be necessary in the coming decades, among others. In addition, “green” hydrogen – produced by water electrolyses with renewable energy – will likely become a key pillar in the transformation away from carbon-intense energy carriers and basic industry materials.

Schematische Darstellung von zwei exemplarischen Optionen, Wasserstoff mit Offshore-Windkraftanlagen zu erzeugen. („P2G“: Elektrolyseur)

Schematic example of two ways of hydrogen production from offshore wind farms. (“P2G”: electrolyser)



Im Projekt „Hybrid Grid“ werden verschiedene Optionen zur Landanbindung von Offshore-Windparks untersucht. Klassischerweise wird dies über Punkt-zu-Punkt Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungsleitungen realisiert, perspektivisch sind aber auch vermaschte Gleichstromnetze oder die Erzeugung von Wasserstoff auf See mit Pipeline-Verbindungen zur Küste möglich. Die Umwandlung von Elektrizität in Gas wirkt sich auf beide Netzinfrastrukturen aus, so dass Strom- und Gasnetz nicht mehr unabhängig voneinander betrachtet werden können.

Auf der Basis von weiträumigen Stromübertragungs- und Gastransportnetzmodellen werden in diesem Projekt Netzsimulationen mit pandapower und pandapipes durchgeführt und ausgebaut. Die Ergebnisse sollen in Algorithmen zur gekoppelten Netzplanung einfließen, wobei auch die Ertüchtigung bestehender Erdgasnetze zum Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur betrachtet wird. Neben den Netzsimulationen werden auch wirtschaftliche Betrachtungen der verschiedenen Umwandlungs- und Transportoptionen durchgeführt.

Die Arbeit wird vom TÜV Nord e. V. und dem House of Energy beratend begleitet.

In the “Hybrid Grid” project, different options of connecting offshore windfarms are investigated. Typically, point-to-point high voltage direct current (HVDC) connections are used. In the long term however, also multi-terminal HVDC connections can be considered, as well as energy hubs on which electricity is being used for offshore hydrogen production with pipeline connections to shore. The conversion of electricity to gases affects both grid infrastructures, so that power and gas networks can longer be assessed independently of each other.

Against this background, coupled power transmission and gas transport networks are modelled and simulated with pandapower and pandapipes in the Hybrid Grid project. The results will be used in algorithms for coupled network planning scenario analyses. In this research on network planning pathways, also the conversion of existing natural gas pipelines to hydrogen pipelines will be considered. In addition, different energy conversion and transport routes will be assessed economically.

The project work is advised by TÜV Nord e. V. and House of Energy.

MULTI-RESILIENZ: RESILIENZ IN MULTIMODALEN ENERGIESYSTEMEN MIT STARKER DURCHDRINGUNG VON IKT IM VERTEILNETZ

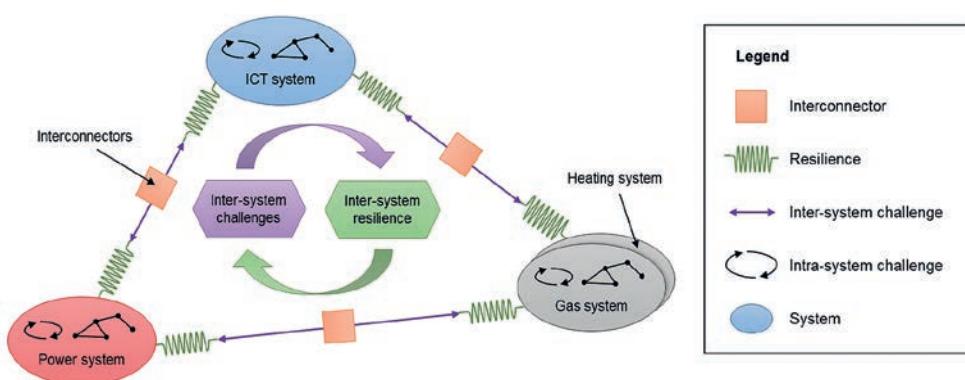
Die Dekarbonisierung, Dezentralisierung und Digitalisierung der Energieversorgung bedingen einander und bringen ein System hervor, das von wechselseitigen Abhängigkeiten geprägt ist. Dezentrale Erneuerbare können nur mit Hilfe von Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) effizient betrieben werden. Neue Methoden der Betriebsführung ermöglichen eine effektivere Nutzung bestehender Netze, und die Kopplung der Sektoren (Elektrizität, Gas, Wärme, siehe Bild 1) schafft die Flexibilität, die für ein 100 % erneuerbares Energieversorgungssystem benötigt wird. Gleichzeitig schaffen die gegenseitigen Abhängigkeiten, besonders die Abhängigkeit von der IKT eine neue Verwundbarkeit des multimodalen Energieversorgungssystems. Im Projekt Multi-Resilienz wird im Rahmen des DFG Schwerpunktprogramms 1984 „Hybride und multimodale Energiesysteme“ untersucht, wie die Resilienz – also die Fähigkeit Störungen zu antizipieren, ihnen zu widerstehen, sie zu überstehen und sich ihnen anzupassen – multimodaler Energieversorgungssysteme analysiert und bemessen, modelliert und simuliert und final durch adäquate Planungs- und Betriebsführungsstrategien verbessert werden kann. Durch die intensive Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Informatik mit Schwerpunkt Rechnernetze und Rechnerkommunikation der Universität Passau (Prof. de Meer), kann insbesondere die Bedeutung der IKT für den resilienten Betrieb der Stromnetze der Zukunft beleuchtet und Lücken in den Methoden, die hierfür zur Verfügung stehen, geschlossen werden.

title

MULTI-RESILIENCE: RESILIENCE IN ICT-BASED MULTIMODAL ENERGY DISTRIBUTION SYSTEMS

The decarbonization, decentralization, and digitization of the energy supply are interrelated and create a system, that is characterized by interdependencies. Decentralized renewables can only be operated efficiently using information and communication technology (ICT). New operational strategies enable a more effective utilization of existing grids and the coupling of power, gas, and heating systems (see Figure 1) enable the flexibility needed for a 100 % renewable energy supply system. However, the mutual interdependencies, especially the reliance on ICT, cause new vulnerabilities. The project Multi-Resilience is part of the DFG SPP 1984 "Hybrid and multimodal energy systems" and investigates how the resilience – the ability of a system to plan for, prevent, survive and adapt to challenges – can be analyzed and quantified, modeled and simulated and finally improved by planning and operational strategies. The intense collaboration with the Chair of Computer Networks and Computer Communications at the University of Passau (Prof. de Meer) allows to examine especially the importance of ICT for the resilient operation of future power systems and to close gaps in the existing methodologies.

In the second phase of the SPP, the Project "ResiServD" will continue and intensify those activities.



In der zweiten Phase des DFG Schwerpunktprogrammes wird das Projekt „ResiServD“ diese Aktivitäten fortsetzen und intensivieren.

Gegenseitige Abhängigkeit und Resilienz der betrachteten Teilsysteme
Mutual interdependency and resilience between the considered systems



This work was supported by the German Research Foundation DFG as part of the project "Multi-Resilience" with the project identification number 360352892 of the priority program DFG SPP 1984 - Hybrid and multimodal energy systems: System theory methods for the transformation and operation of complex networks.

Ansprechpartner

MANUEL VALOIS, M.ENG. (e²n)

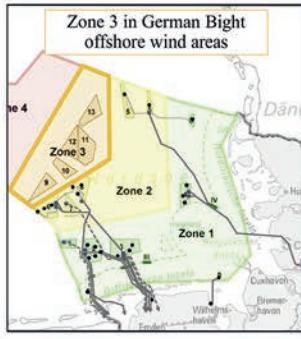
Titel

NSON II: KOSTENEFFIZIENTE ANBINDUNG UND INTERNATIONALE INTEGRATION VON OFFSHORE WINDENERGIE IN DER NORDSEE

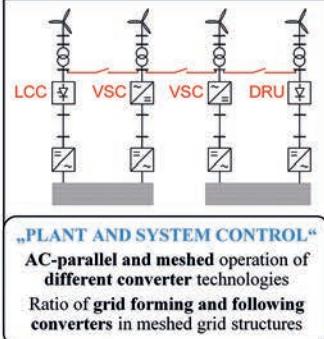
title

NSON II: COST-EFFICIENT CONNECTION AND INTERNATIONAL INTEGRATION OF OFFSHORE WIND ENERGY IN THE NORTH SEA

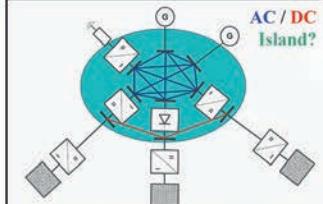
„SHORT-TERM TASKS“
technical feasible and cost-efficient connection of wind farms in German offshore zone 3
Regulation: decrease costs AND maintain system reliability



SCIENTIFIC QUESTIONS
Robust market based scenario planning under uncertainty
Plant and system control structures and methods
Optimized grid planning and operation of offshore systems
Development of suitable mathematical methods and techniques

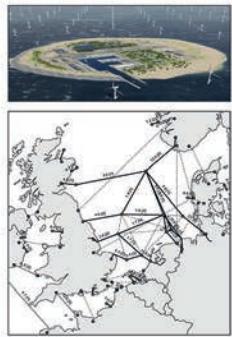


„PLANT AND SYSTEM CONTROL“
AC-parallel and meshed operation of different converter technologies
Ratio of grid forming and following converters in meshed grid structures



„OPERATIONAL CHALLENGES“
Optimized mixed AC/DC- and converter type-system layout
Identification and optimization of system control modes and converter set points

„LONG-TERM PROSPECTS“
meshed offshore grids and multiple interconnectors in North Seas region
built and established North Sea Wind Power Hub(s)



Überblick über die Forschungsfelder im Rahmen der kurzfristigen Aufgaben und der langfristigen Entwicklung sowie der abgeleiteten wissenschaftlichen Fragestellung (mit Input von TenneT).

Overview of research fields within short-term tasks and long term development as well as derived scientific question (with input from TenneT).

Das Projekt NSON-II konzentriert sich auf die zukünftige Entwicklung der Offshore-Windenergie in der deutschen Nordsee. Um die Ziele der Energiewende zu erreichen und den Einsatz von Offshore-Windparks zu beschleunigen, ist es notwendig, die Kosten für die Anbindung zukünftiger Projekte zu reduzieren. Das Fachgebiet e²n der Universität Kassel untersucht daher alternative Technologien zu den derzeit standardisierten Punkt-zu-Punkt-Verbindungen (P2P) die auf VSC (Voltage Source Converter) basieren. Zum Beispiel die Verwendung von DRU (diode rectifier unit) als Umrichtertechnologie auf der Offshore-Plattform und die Parallelschaltung zwischen DRU und VSC. Darüber hinaus ist die langfristige Planung eines Multi-Terminal-Netzes von speziellem Interesse, insbesondere die erforderlichen Steuerungsfähigkeiten von P2P-Verbindungen, um zu einem späteren Zeitpunkt in ein Multi-Terminal-Netz zusammengeführt werden zu können, sowie die Auswirkungen auf das kontinentale HVAC-Netz.

Im weiteren Verlauf des Projektes und auf Basis des von den nationalen Behörden erlassenen Netzentwicklungsplans soll ein Optimierungswerkzeug entwickelt werden, das die kurz-, mittel- und langfristige Planung und den Betrieb eines solchen Multi-Terminal-Netzes unterstützt. Zu diesem Zweck arbeitet das Fachgebiet mit dem Übertragungsnetzbetreiber TenneT, dem Fraunhofer IEE und der Universität Hannover zusammen. Die Leistungsfähigkeit dieses Werkzeugs wird durch die Durchführung realistischer Studienfälle getestet.

NSON-II focuses on the future development of the offshore wind generation in the German North Sea. In order to meet the goals of the energy transition, and to speed up the deployment of offshore wind farms, it is necessary to reduce the costs for the interconnection of future projects. Hence, the e²n department investigates alternative technologies to the currently standardized point-to-point (P2P) connections, which are based on voltage source converters (VSC). For example, the use of diode rectifier units (DRU) as converter technology at the offshore platform and the parallel connection between DRU and VSC. Furthermore, the long-term planning of a multi-terminal grid is of special interest, especially the required control capabilities from P2P connection for being able to be transformed into a multi-terminal grid in a later stage, as well as the implications for continental HVAC grid.

In the further course of the project and based on the Network Development Plan issued by the national authorities, a optimization tool is to be developed with the aim to support the short, medium and long term planning and operation of such a multi-terminal grid. For that purpose, the e²n collaborates with the transmission system operator TenneT, Fraunhofer IEE and the University of Hannover. We will test the performance of this tool with realistic study cases.

Gefördert durch:



Gefördert durch: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 03EI4009C

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Ansprechpartner

DR. SEBASTIAN WENDE-VON BERG (e²n, IEE), DR. LARS LAUVEN (e²n)

Titel

INTERCONNECT: SMARTE LIEGENSCHAFTEN UNTERSTÜTZEN NETZBETRIEB

title

INTERCONNECT: SMART PROPERTIES SUPPORT NETWORK OPERATIONS

Aktuelle Schwerpunkte von e²n: Anwendung von Netz-zustandsschätzung, Netzkapazitätsbestimmung, Handlungs-unterstützung

Ziel des Projektes InterConnect ist die einheitliche Behandlung von verschiedenen Datenquellen. Diese starten bei smarten Haushaltsgeräten wie z.B. Kühlschränke oder Waschmaschinen gehen über Elektrofahrzeuge und deren Ladepunkte bis hin zu Erzeugungsanlagen in der Mittelspannung. Alle diese Informationen können die Nutzung von erneuerbaren Energien effektiver machen und gleichzeitig die Sicherheit und Zuverlässigkeit der Stromnetze erhöhen.

Die Universität Kassel arbeitet in dem Projekt InterConnect eng mit dem Fraunhofer IEE zusammen und ist aktiv in dem Demonstrationsfeldtest „Hamburg Pilot“. In diesem Piloten beteiligen sich weiterhin die Stromnetze Hamburg, KEO, EEBus und Wirelane. Ziel ist es, Liegenschaften mit intelligenten Systemen, wie in diesem Fall Ladepunkte für E-KFZ innerhalb eines Hotelkomplexes, zu erfüllen, um das Netzgeschehen zu beeinflussen. Hierfür entwickelt und untersucht die Universität Kassel Methoden zur Zustandsbestimmung in Mittelspannungsnetzen auf Basis künstlicher Intelligenz. Auf dieser Basis können dann Netzkapazitäten und zukünftige Netz-zustände bestimmt und analysiert werden. Mithilfe von Flexibilitäten durch Verschieben der Ladevorgänge lassen sich auch Maßnahmen für das Netzmanagement definieren und dem Netzfahrer vorschlagen. Neben den Netzanwendungen und der Optimierung der Liegenschaften, geht es in dem Projekt um Abstimmung und Harmonisierung der Datenmodelle und Schnittstellen. Es wird versucht, die Kommunikation SAREF-konform zu gestalten und damit auch interoperabel für spätere weitere Verwendung.

Das Projekt startete Ende 2019 und läuft noch bis Ende 2023. Der Feldtest ist für die Jahre 2021 und 2022 geplant.

Current focus areas of e²n: Application of network state estimation, network capacity determination, action support.

The goal of the InterConnect project is the uniform treatment of different data sources. This covers a spectrum from smart household applications, such as in refrigerators or washing machines, over electric vehicles and their charging points up to generation plants in the medium voltage grids. All of this information can make the use of renewable energy more efficient while increasing the security and reliability of the power system.

The University of Kassel is working closely with Fraunhofer IEE on the InterConnect project and is actively involved in the "Hamburg Pilot" demonstration field test. In this, Stromnetze Hamburg, KEO, EEBus and Wirelane are also participating. The aim is to equip properties with intelligent systems, such as in this case, charging points for electric vehicles within a hotel complex, in order to actively influence the network. To this end, the University of Kassel is developing and investigating methods for determining the status of medium-voltage grids on the basis of artificial intelligence. Within this approach, network capacities and future network conditions can be determined and analysed. With the help of flexibilities by shifting charging processes, measures for grid management can also be defined and proposed to the grid operator. In addition to the network applications and the optimization of the properties, the project is concerned with the coordination and harmonization of the data models and interfaces. Efforts are being made to make communication SAREF-compliant and thus interoperable for subsequent further benefits.

The project started at the end of 2019 and will run until the end of 2023, with field testing planned for the years 2021 and 2022.

*For further information on InterConnect, please visit:
<https://interconnectproject.eu>*

This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under Grant agreement No 857237.

DISCLAIMER: The sole responsibility for the content lies with the authors. It does not necessarily reflect the opinion of the CNECT or the European Commission (EC). CNECT or the EC are not responsible for any use that may be made of the information contained therein.



Ansprechpartner

DR. SEBASTIAN WENDE-VON BERG (e²n, IEE); ZHENQI WANG, M.SC. (e²n)

Titel

EU SysFlex

title

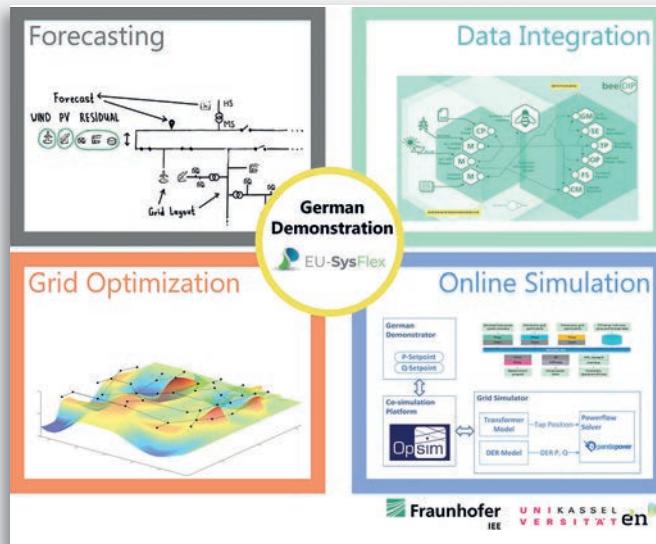
EU SysFlex

Pan-Europäisches Energiesystem mit einer effizienten koordinierten Nutzung von Flexibilitäten für die Integration eines hohen Anteils an EE

Ziel des Projektes EU-SysFlex ist die Entwicklung eines Demonstrators (Projektrahmen siehe Abbildung) zur kombinierten Prognose, Optimierung, Datenintegration und online Netzsimulation für die Bereitstellung von Wirk- und Blindleistungsflexibilitäten aus dezentralen Erzeugungsanlagen. Diese Flexibilitäten aus dem Verteilnetz sollen zum Engpassmanagement unter den aktuellen und zukünftigen gesetzlichen Regelungen im Übertragungsnetz eingesetzt werden. Der Arbeitsschwerpunkt des Fachgebiets e²n liegt auf der Netzzustandsschätzung, dem Engpassmanagement und der Netzsimulation. In enger Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IEE werden die o.g. Module für die Netzbetriebsführung in einem Demonstrator beim Verteilnetzbetreiber MITNETZ Strom GmbH in der Netzeleitwarte integriert und in einem langfristigen Feldtest verifiziert.

Neben der Umsetzung der Module hat das Fachgebiet e²n sich in der Grundlagenforschung zur Netzbetriebsführung im Rahmen des Projektes engagiert. Diese umfassen die Anwendung von High-Performance Computing (HPC) für Echtzeitnetzberechnungen und Netzoptimierungen mittels künstlicher Intelligenz (KI), um neue Verfahren für die sichere und kosteneffizientere Netzbetriebsführung zu entwickeln und zu evaluieren. Der entwickelte HPC-Lastfluss-Solver und -Netzsimulator unterstützt die Beschleunigung durch mehrere GPUs, wodurch die rechenaufwändigen Aufgaben jetzt auch in Echtzeit durchgeführt werden können. Erste Untersuchungen eines KI-basierten Netzoptimierungstools haben positive Ergebnisse und Potenzial für reale Anwendungen gezeigt. Um die Vor- und Nachteile des KI-basierten Netzoptimierungstools besser bewerten zu können, sollen weitere Vergleiche mit vorhandenen Engpassmanagement-Tools durchgeführt werden.

Pan-European system with an efficient coordinated use of flexibilities for the integration of a large share of RES



Übersicht der Systemstruktur des Demonstrators in EU SysFlex
System Overview of Demonstrator in EU SysFlex

The main goal of the project EU-SysFlex is the development of a demonstrator (project scope in Figure) for a combined forecasting, optimization, data integration and online grid simulation to enable the usage of the active and reactive power flexibility from decentralized generators such as wind and PV parks. These flexibilities from the distribution grid are supposed to be used for congestion management in the transmission grid under the current and future energy law. The focus of the department e²n is the development of components such as a grid state estimation, a grid

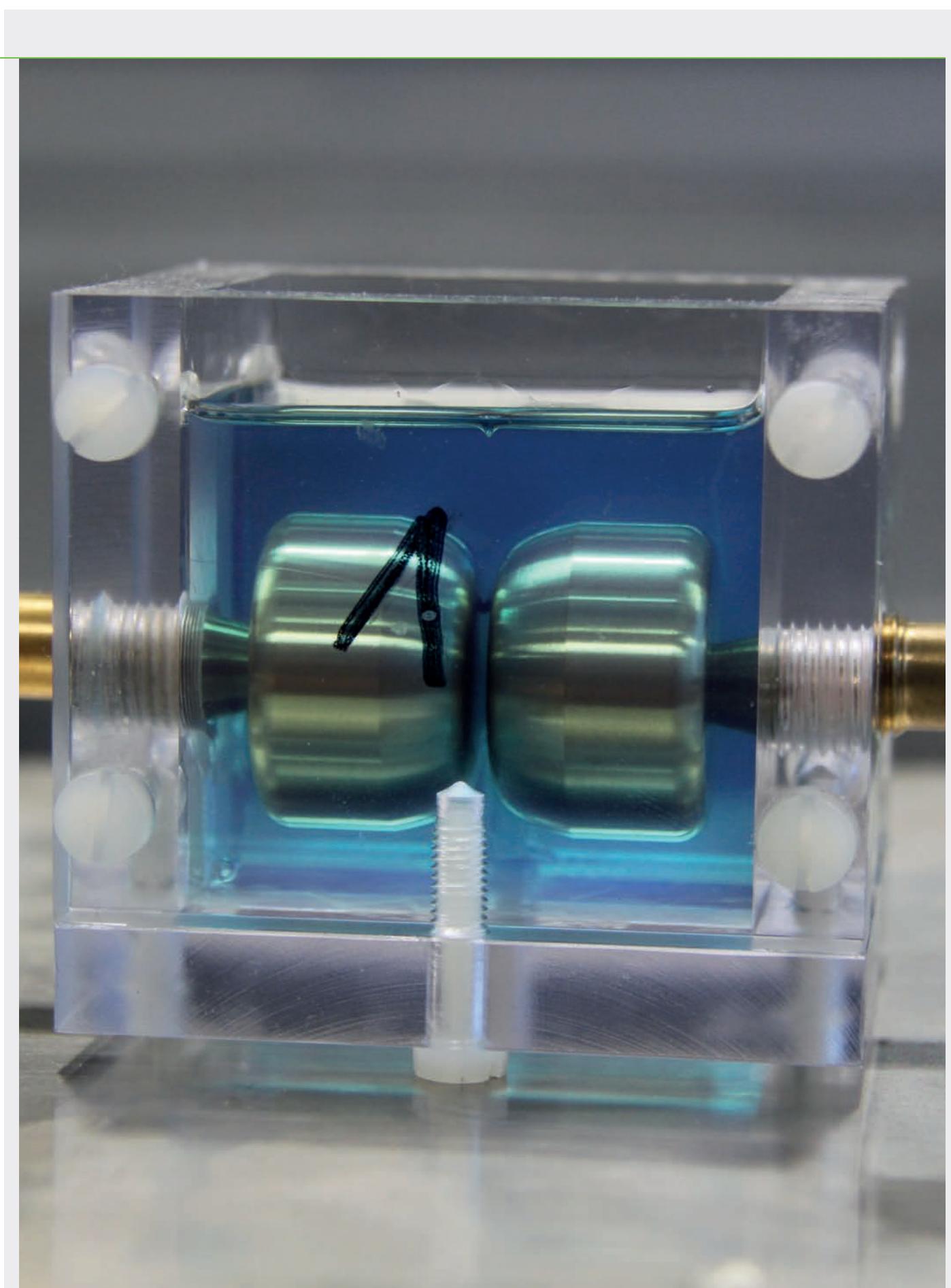
congestion management and a grid simulation. In strong cooperation with the Fraunhofer IEE, the demonstrator and all its functionalities will be integrated into the grid control centre of German distribution system operator MITNETZ Strom GmbH and will be verified in a long-term field test.

In addition to the development tasks, the department e²n has been engaged in fundamental research in future grid operation strategies within the project EU-SysFlex. These include the application of the High-Performance Computing (HPC) technology for real-time grid simulation and grid optimization based on artificial intelligence (AI), to enable a contingency-free and cost-efficient future grid operation. The successfully developed HPC powerflow solver and grid simulator can be accelerated with multiple GPUs, with which the computationally intensive tasks can now be solved in real-time. First investigations on an AI-based grid optimization tool have yielded positive results and shown potential for application. To further evaluate the advantages and disadvantages of the AI-based grid optimization tool, additional comparison with current grid congestion management tools will be performed.

For further information on EU-SysFlex, please visit:
<http://eu-sysflex.com/>

This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No. 773505.







Anlagen und
Hochspannungstechnik

Ansprechpartner

PROF. DR.-ING. ALBERT CLAUDI (AHT)

Titel

**DAS FACHGEBIET ANLAGEN UND HOCH-
SPANNUNGSTECHNIK (AHT)**

title

**DEPARTMENT OF POWER SYSTEMS AND
HIGH VOLTAGE TECHNOLOGY**

Anlagen und
Hochspannungstechnik

Im Fachgebiet Anlagen- und Hochspannungstechnik (AHT) werden Fragestellungen des Gebiets der Hochspannungsnetzübertragung bearbeitet. Neben der Berechnung und Auslegung von Übertragungssystemen werden Isolationsmaterialien hinsichtlich ihrer Festigkeit untersucht. Gele haben gegenüber konventionellen Isolierstoffen einige vielversprechende Eigenschaften, die sie für den Einsatz in der Mittel- und Hochspannungstechnik interessant machen. Das Fachgebiet arbeitet seit dem Jahr 2001 schwerpunktmäßig auf diesem Gebiet. Die Forschungsarbeiten wurden dabei begleitet von Applikationsprojekten, die in Zusammenarbeit mit verschiedenen Industrieunternehmen bearbeitet wurden. Das Monitoring von Anlagen und elektrischen Netzen ist zudem ein wichtiger Bestandteil in der sich ändernden Netzstruktur auf dem Weg zu den SMARTGRIDS der Zukunft. Es verfolgt unterschiedliche Zielsetzungen der Reduktion von Wartung und Instandsetzung, Erhöhung der Zuverlässigkeit, bessere Auslastung von Netzen und Erhöhung der Lebensdauer von Komponenten. Gegenüber reinen Messsystemen sind Monitoringsysteme in der Lage, den Zustand einer Anlage oder eines Netzes zu bewerten und ggf. entsprechende Maßnahmen automatisch auszulösen.

The department of Power Systems and High Voltage Technology examines themes of the broad field of high-voltage transmission. In addition to the calculation and design of transmission systems, insulation materials are tested for their withstand capability. Gels have some promising properties compared to conventional insulating materials, which make them interesting for use in medium and high voltage engineering. Since 2001 the department has been working within this field of interest. The research work was accompanied by application projects, which were carried out in cooperation with various industrial companies. The monitoring of plants and electrical networks is also an important part of the changing network structure on the way to the Smart Grids of the future. It pursues different objectives of reducing maintenance and repair, increasing reliability, better utilization of networks and increasing the service life of components. In contrast to pure measuring systems, monitoring systems are capable of evaluating the state of a system or a network and, if necessary, initiating appropriate actions automatically.



Prof. Dr.-Ing. Albert Claudi
Fachgebetsleiter AHT

Faraday-Halle mit 1MV Stoßspannungsgenerator
Farady-Hall with 1MV impulse generator

Forschungsthemen

- Gele als Isolierstoff für die Mittel- und Hochspannungstechnik
- Lebensdaueruntersuchungen an flüssigen und festen Isoliermaterialien
- Monitoring von Trenn- und Leistungsschaltern
- Diagnose elektrischer Traktionsmotoren mittels Teilentladungsmesstechnik
- Modellierung und Berechnung elektrostatischer Felder, sowie elektrischer Energieversorgungsnetze

Main emphasis

- *Gels as insulating material for medium and high voltage applicas insulating material for medium and high voltage applications*
- *Investigations on life expectancy of liquid and solid insulating materials*
- *Monitoring of plants and electrical networks*
- *Durability tests on liquid and solid materials*
- *Modelling and calculation of electrostatic fields, as well as electrical power supply networks*

Das Fachgebiet bietet folgende Lehrveranstaltungen an.

The following courses are offered by the department.

Das Fachgebiet AHT ist seit 2020 nicht mehr besetzt. Die Lehre wird kommissarisch fortgeführt.

- | | |
|--|------------------|
| ▪ Anlagen- und Hochspannungstechnik I | Dr.-Ing. S. Wels |
| ▪ Anlagen und Hochspannungstechnik II | Dr.-Ing. S. Wels |
| ▪ Energietechnisches Praktikum I | O. Schröder |
| ▪ Energietechnisches Praktikum II | O. Schröder |

Bis 2020 wurden die nachfolgenden Lehrveranstaltungen angeboten:

- | | |
|--|---|
| ▪ Seminar Elektr. Entladungen und Durchschläge | Prof. Claudi |
| ▪ Seminar Berechnung elektrischer Hochspannungsfelder | Prof. Claudi |
| ▪ Regelungstechnik für den Studiengang Regenerative Energien und Energieeffizienz | Prof. Claudi, T. Raulf |
| ▪ Hochspannungsmesstechnik | Prof. Claudi |
| ▪ Hochspannungspraktikum | Stefan Jörres |
| ▪ Lichttechnik | Frau Dr. Vandahl, F. Gielsdorf, O. Winter, Wolf |
| ▪ Blitz- und Überspannungsschutz für elektrische und elektronische Systeme | Dr. Gernot Finis |

Ansprechpartner

DR.-ING. SEBASTIAN WELS (AHT)

Titel

EINFLUSS VON TEMPERATUR UND FEUCHTIGKEIT AUF DIE ELEKTRISCHE FESTIGKEIT VON SCHICHTISOLIERSYSTEMEN

title

INFLUENCE OF TEMPERATURE AND HUMIDITY ON ELECTRICAL STRENGTH OF LAYER INSULATION SYSTEMS

Die Überwachung Im Fokus dieser Arbeit steht der Einsatz von technischem Kunststoff, Silikongel und dem Isolationssystem aus beiden Isolierstoffen für elektrotechnische Anwendungen. Aktuell findet diese Werkstoffkombination breite Anwendung in der Halbleiterindustrie, wo sie hauptsächlich als Packaging von Hochleistungsmodulen eingesetzt wird. Silikongel wird hier als Vergussmasse des Halbleiters und somit als elektrische Hauptisolierung verwendet. Aus dem technischen Kunststoff wird das Gehäuse hergestellt. Die Entscheidung für ein spezifisches Gehäusematerial erfolgte in der Vergangenheit somit hauptsächlich nach mechanischen Gesichtspunkten.

The focus of this work is the use of technical plastic, silicone gel and the insulation system made of both insulation materials for electrical applications. The material combination is currently used in the semiconductor industry where it is mainly used as packaging for high-performance modules. Silicone gel is applied as a casting compound for the semiconductor and thus the main electrical insulation. The housing is made of engineering plastics. In the past, the decision for a specific housing material was mainly based on mechanical aspects.

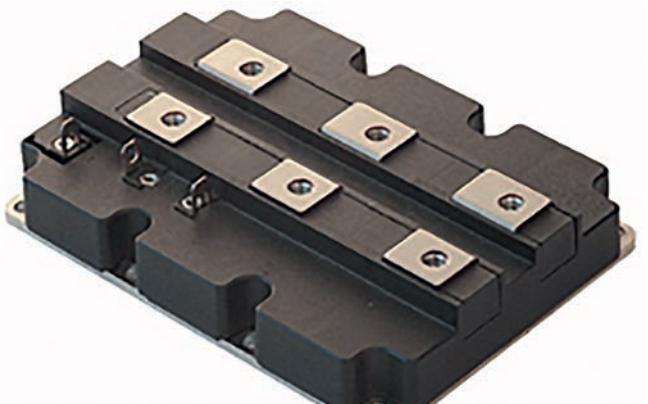
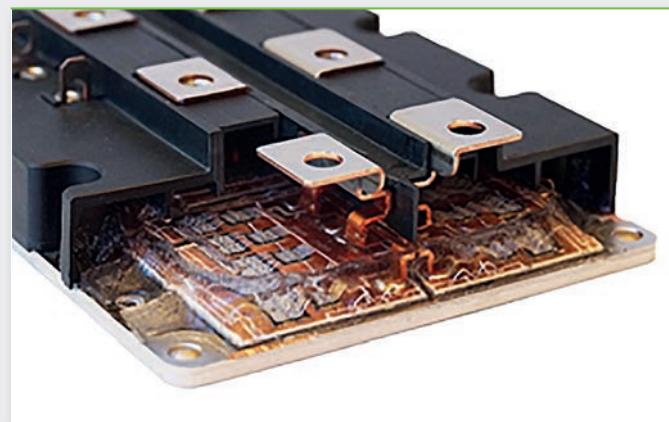


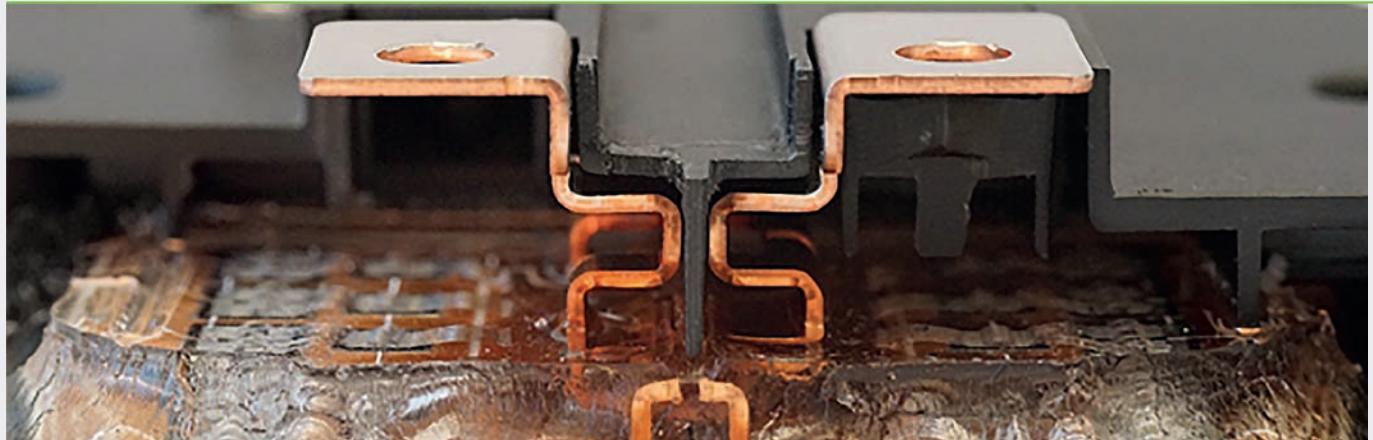
Bild 1: Leistungs-IGBT / 3-polig / 1,7 kV

Figure 1: Power-IGBT / 3-phase / 1,7 kV



Wie Bild 1 zeigt, müssen die eingesetzten Gehäuse jedoch auch elektrische Anforderungen erfüllen. Zum einen ist das Gehäuse einer Grenzflächenbelastung zwischen den Anschlussklemmen ausgesetzt (Bild 1 oben), zum anderen wird das Gehäuse nach innen bis ins Silikongel weitergeführt und erfüllt hier potentialtrennende Aufgaben (Bild 1 unten).

However, as Figure 1 shows, the housings that are used must also meet electrical requirements. On the one hand the housing is exposed to an interface load between the connection terminals (Figure 1, above), on the other hand the housing is continued inwards into the silicone gel and thus also performs potential-separating tasks (Figure 1, below).



Der generelle Trend hin zur Miniaturisierung von elektronischen Baugruppen, bei stetig höheren elektrischen Beanspruchungen, führt zu immer größeren Anforderungen an die Belastbarkeit der Isolierstoffsysteme. Durch Anwendungsbereiche wie Aufzugssteuerungen, Elektrofahrzeuge, Übertragung von Windenergie oder Stromwandlung im Eisenbahnbetrieb sind die Bauteile oftmals rauen Umgebungsbedingungen ausgesetzt, wodurch die Anforderungen an das Isolationssystem zusätzlich angehoben werden.

Die Kombination aus ansteigender Belastung und unzureichend bekannten elektrischen Eigenschaften der Isoliersysteme ist eine Einschränkung auf dem Weg zu höheren Betriebsspannungen und damit zur Weiterentwicklung der Halbleiterbauelemente. Eine umfassende Kenntnis über das elektrische Verhalten der eingesetzten Isolierungen ist somit unumgänglich und rückt immer mehr in den Fokus der Forschung.

The general trend towards miniaturization of electronical components with constantly higher electrical loads, leads to greater demands on the load capability on the insulation system. Due to application areas such as elevator controls, electric vehicles, the transmission of wind energy or power conversion in railway, the components are often exposed to harsh environmental conditions which increase the demands on the insulation system.

The combination of increasing loads and incomplete knowledge about the electrical properties of the insulation system is a limitation on the way to higher operating voltages and thus to further development of semiconductor components. Comprehensive knowledge of the electrical behavior of the insulation used is therefore essential and is increasingly becoming the focus of research.



Gefördert durch: ECPE European Center for Power Electronics e.V.

Ansprechpartner

DIPL.-ING. SEBASTIAN WELS (AHT)

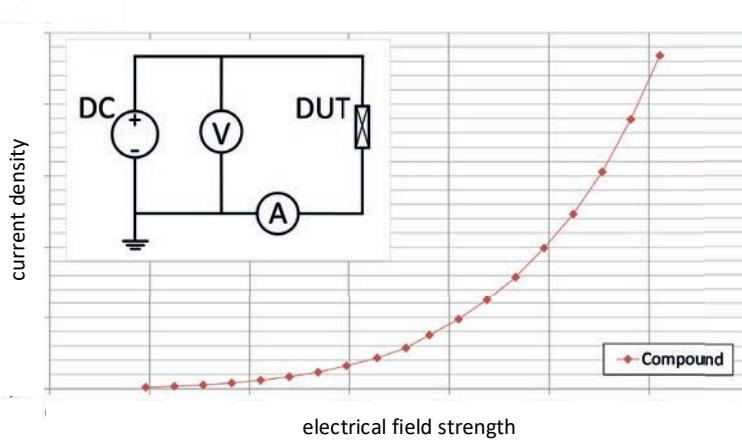
Titel

SMART MATERIALS – NLCM (NON-LINEAR-CONDUCTIVE MATERIALS)

title

SMART MATERIALS – NLCM (NON-LINEAR-CONDUCTIVE MATERIALS)

Typische J-E-Charakteristik
Typical J-E-characteristic



In konventionellen Isolationssystemen kann es durch Inhomogenitäten im Isolationsmaterial (z. B. Lufteinschlüsse, leitfähige Partikel) oder durch die Form bzw. Oberflächenqualität von angrenzenden Elektroden zu erhöhten elektrischen Feldstärken kommen. Als Folge kann es zum Erreichen / Überschreiten der Teilentladungseinsetzfeldstärke kommen. Die dann auftretenden Teilentladungen und die resultierende Degradation können zum Versagen des gesamten Isolationssystems führen. Nach aktuellen Designrichtlinien werden Isolationssysteme so ausgelegt, dass die oben beschriebenen Ursachen für erhöhte elektrische Feldstärke unter allen Umständen vermieden werden. Diese Lösungen sind meist hochkomplex und dementsprechend kostenintensiv. Folglich ist die Entwicklung von fehlerresistenten Produkten ein allgemein angestrebtes Ziel.

Ein neuer Ansatz zur Lösung der oben beschriebenen Problematik sind innovative Materialien, die hohe elektrische Feldstärken abbauen indem sie ihre Materialeigenschaften an die auftretende Belastung anpassen. In diesem Bereich hat sich das Fachgebiet Anlagen und Hochspannungstechnik auf Materialien spezialisiert, die überhöhte Feldstärke in lokalen Teilbereichen des Isolationssystems automatisch durch die Reduzierung des Volumenwiderstandes abbauen (Bild 1). Diese sogenannten nichtlinearen leitfähigen Materialien (non-linear-conductive materials – NLCM) homogenisieren die elektrische Feldbelastung im Isolierstoff, sodass die resultierenden Isoliersysteme deutlich resistenter gegen diverse Fehlstellen sind. Die Vorteile beim Einsatz dieser innovativen Isolierstoffe sind Isoliersysteme mit geringerer Komplexität, weniger Fertigungsschritten und einfacherer Installation und somit geringeren Gesamtkosten.

In conventional insulation systems, inhomogeneities in the insulation material (e.g. air inclusions, conductive particles) or the shape or surface quality of adjacent electrodes can lead to increased electrical field strength. As a result, the partial discharge inception field strength can be reached / exceeded. The partial discharge and the resulting degradation can lead to the failure of the entire insulation system. According to current design guidelines, insulation systems are designed in a way that the causes of increased electrical field strength (described above) are prevented under all circumstances. These solutions are usually highly complex and correspondingly expensive. Therefore, the development of defect-resistant products is a common goal.

A new approach to solve the described problem are innovative materials which reduce high electrical field strengths by adapting their material properties to the occurring field strength load. In this area, the Department of Power Systems and High Voltage Technology has specialized in materials that automatically reduce excessive field strength in local parts of the insulation system by reducing the volume resistance (Figure 1). These so-called non-linear conductive materials (NLCM) homogenize the electrical field in the insulating material, thus the resulting insulation systems are significantly more resistant to various defects. The advantages of using these innovative insulation materials are insulation systems with lower complexity, fewer production steps and easier installation and thus lower overall costs.

Ansprechpartner

DR.-ING. STEFAN JÖRRES (AHT)

Titel

**METHODEN ZUR KENN LINIENBASIERTEN
ZUSTANDSÜBERWACHUNG VON METALL-
OXID-VARISTOREN**



title

**TITLE OF THE RESEARCH PROJECT OR THE
ARTICLE**



Untersuchung des Ausfallverhalten eines Metallocid-Varistors durch gezielte praxisrelevante Belastungen
Investigation of the failure behavior of a metal-oxide varistor by practice-relevant electrical stress conditions

Die unterbrechungsfreie und zuverlässige Versorgung elektrischer Betriebsmittel ist ein Kernthema heutiger Infrastrukturen. Ein elementarer Bestandteil von Schutzkonzepten besteht im Überspannungsschutz, welcher infolge von Überspannungssereignissen und instabilen Netzversorgungen sukzessive altert. Um diese Alterungsprozesse zu verstehen und vorrauselnde Wartungen zu ermöglichen, wurde das kennlinienbasierte Alterungsverhalten von Metallocid-Varistoren und dessen messtechnische Bestimmung einschlägig untersucht.

Ziele der Untersuchungen bestanden in der systematischen Aufnahme und Darstellung der unterschiedlichen Degradationsmechanismen in Abhängigkeit praxisrelevanter Belastungsarten. Die Daten sind die Basis bei der Entwicklung eines Zustandsüberwachungssystems für Überspannungsschutzgeräte im Bereich von Niederspannungsenergieversorgungsanlagen. Zur Untersuchung des Alterungsverhaltens von Varistoren wurde eine vollautomatisierte skalierbare Messmethode entwickelt und qualifiziert, die im Gegensatz zu standardisierten Prüfverfahren eine höhere Datentiefe aufweist und somit einschlägige Untersuchungen erstmalig ermöglicht. Mithilfe einer neuen Darstellungsform lassen sich die unterschiedlichen Degradationsmechanismen bestimmen und zuordnen. Ergebnisse zeigen, dass die bisherige Messung der charakterisierenden Varistorspannung im sogenannten Milliampere-Punkt, zur Bestimmung einer Alterung nur unzureichende Interpretationen zulässt.

Nicht zuletzt ist das Ziel dieser Arbeit, die oftmals makroskopische Sichtweise der Degradation von Zinkoxid-Varistoren im Bereich des Überspannungsschutzes mit hinreichenden mikroskopischen Zusammenhängen und Ursachen zu vereinen. Die gewonnenen Erkenntnisse zur Überwachung von Überspannungsableitern helfen aus aktuellem Anlass internationalen Normungen bei der Anpassung und Weiterentwicklung ihrer Regularien.

Die Forschungen wurden am 15.05.2020 mit der erfolgten Promotion vollendet.

The uninterrupted and reliable supply of electrical equipment is a key topic in today's infrastructures. An elementary component of protection concepts is overvoltage protection, which gradually ages as a result of overvoltage events and unstable mains supplies. In order to understand these aging processes and to enable predictive maintenance, the characteristic curve-based aging behavior of metal oxide varistors were investigated.

In order to be able to study the aging behavior of varistors, a fully automated and scalable measuring method was developed and optimized, which, in contrast to conventional testing methods, produces an increased data depth. Using a new form of data presentation, this allows different aging and degradation mechanisms to be determined and assigned. In contrast, current data shows that conventional methods measuring the characteristic voltage of varistors are inefficient and inadequate to determine aging behaviours.

Finally, the aim of this work is to combine the rather macroscopic view of the degradation of zinc oxide varistors in the area of surge protection with sufficient microscopic causal consequential relationships. The findings and knowledge gained from this work will help international standards to adapt and further develop novel regulations.

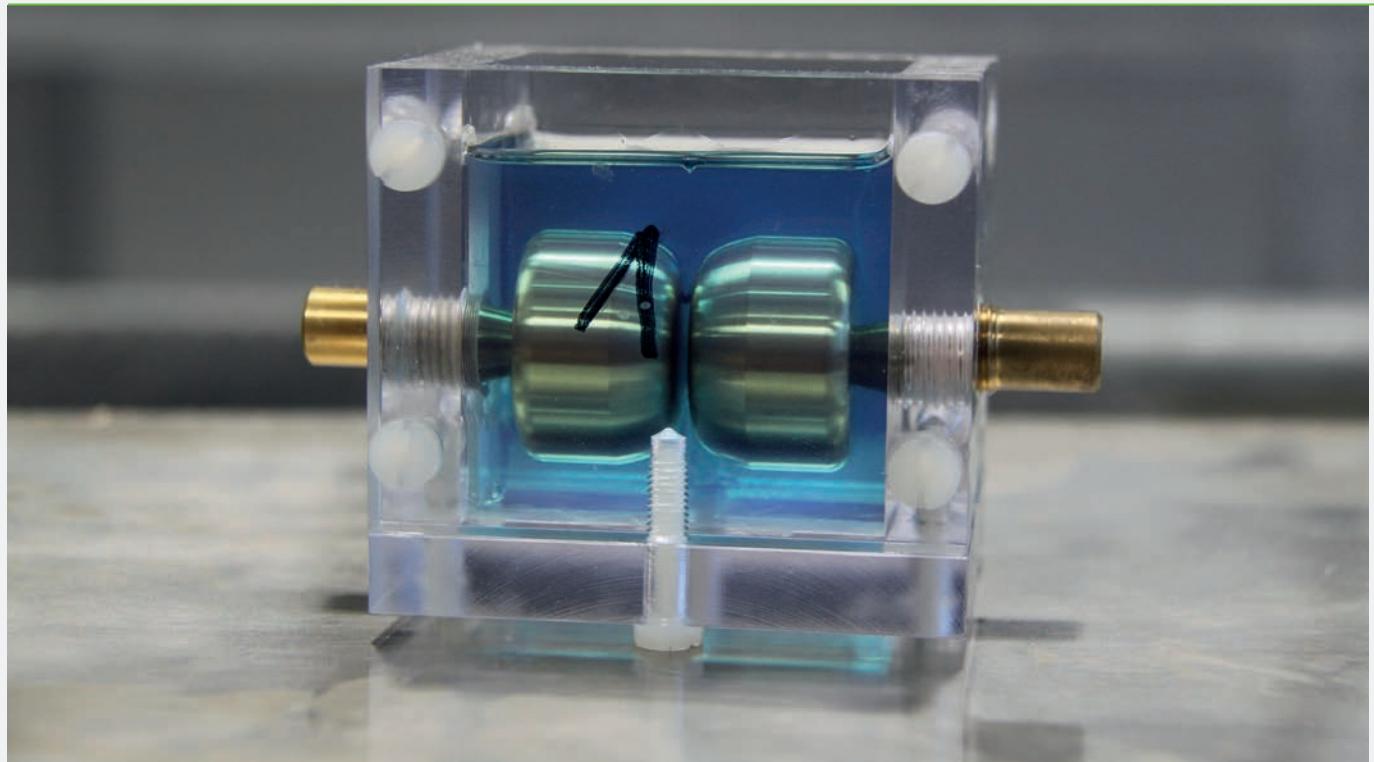
The research was completed on May 15, 2020 with the completion of the doctorate.

ISBN: 978-3-8440-7416-1



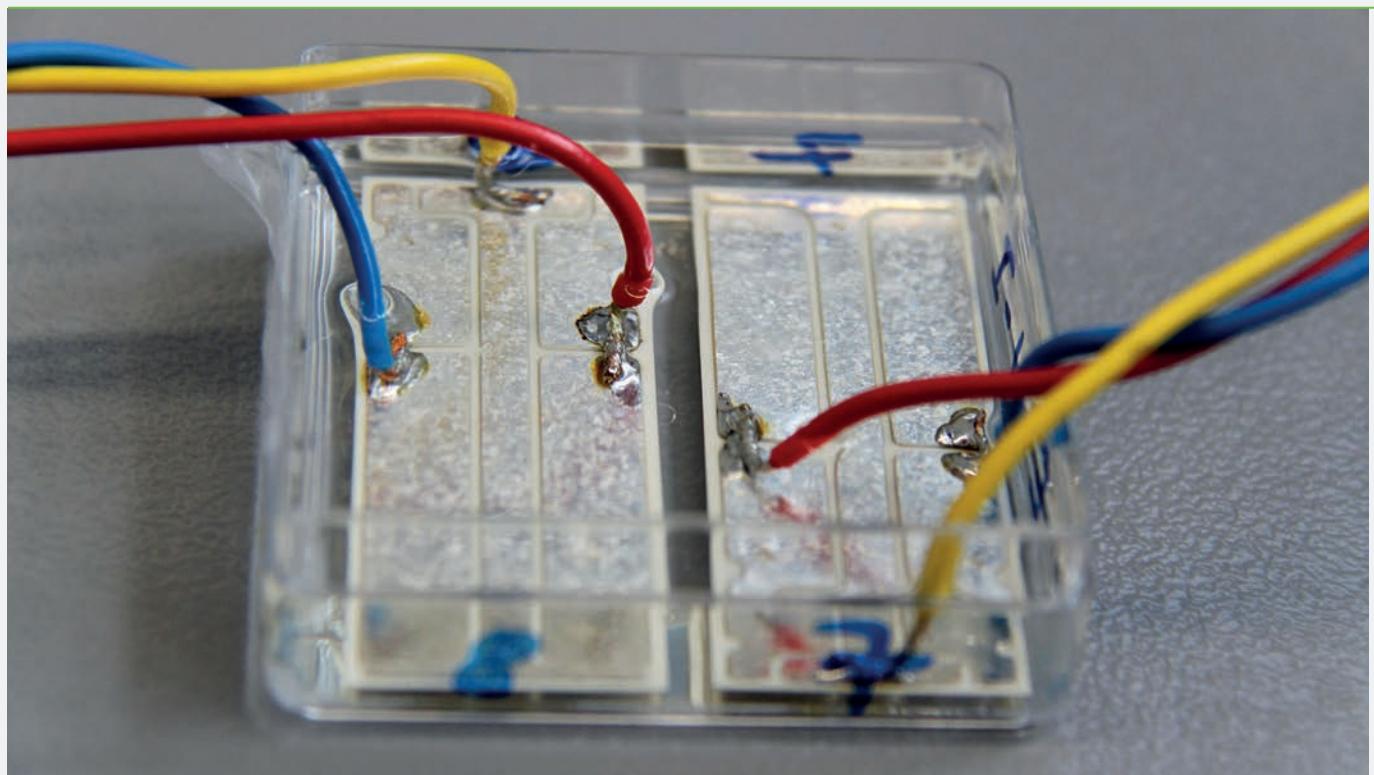
Gefördert durch: Phoenix Contact GmbH & Co. KG, BU TRABTECH, Blomberg

Wechselspannung:	bis 300 kV 50 Hz 500 mA bis 200 kV 40 - 400 Hz 50 mA bis 10 kV 0 - 10 kHz 10 mA mit Arbitär Generator	AC voltage:	up to 300 kV 50 Hz 500 mA up to 200 kV 40 - 400 Hz 50 mA up to 10 kV 0 - 10 kHz 10 mA with arbitrary generator
Gleichspannung:	bis 280 kV 50 mA	DC voltage:	up to 280 kV 50 mA
Impulsspannung:	bis 1000 kV 1,2/50 μ s (Blitzstoß) Abschneidung möglich bis 1000 kV 250/2500 μ s (Schaltstoß) Abschneidung möglich bis 50 kV schnell repetierend hohe Flankensteilheit	Pulse voltage:	up to 1000 kV 1,2/50 μ s (lightning) Chopping possible up to 1000 kV 250/2500 μ s (switching) Chopping possible up to 50 kV fast repetitive fast rise time
Stoßstrom:	bis 20 kA 8/20 μ s oder 4/10 μ s	Surge current:	up to 20 kA 8/20 μ s or 4/10 μ s
Hybrid:	bis 7 kV 1,2/50 μ s bis 3,5 kA 8/20 μ s	Hybrid:	up to 7 kV 1,2/50 μ s up to 3,5 kA 8/20 μ s
Teilentladungsmessung:	bis 100 kV 0 - 400 Hz bis 5 kV repetierende Impulse mit hoher Flankensteilheit	Partial discharge:	up to 100 kV 0 - 400 Hz up to 5 kV fast repetitive Impulse with fast rise time
$\tan \delta$ - Messung:	bis 100 kV $\tan \delta$ bis 5×10^{-6}	$\tan \delta$ - measurement:	up to 100 kV $\tan \delta$ down to 5×10^{-6}
Widerstandsmessung:	bis $T\Omega$	Resistance measurement:	up to $T\Omega$
Klimabeeinflussung:	Konditionierung -40 °C bis 300 °C 10 % r.F. bis 95 % r.F. Prüfung und Messung bis 100 kV AC 140 kV DC 140 kV Impuls -40 °C bis 140 °C 10 % r.F. bis 95 % r.F.	Climate control:	conditioning -40 °C to 300 °C 10 % r.h. to 95 % r.h. testing and measurement up to 100 kV AC 140 kV DC 140 kV pulse -40 °C to 140 °C 10 % r.h. to 95 % r.h.
Weitere Ausstattung:	- Messungen unter Vakuum oder Überdruck - Messungen unter Isoliergas - Prüfgeräte für flüssige Isolierstoffe - Simulation elektr. Felder (COMSOL)	Further equipment:	- Measurements under vacuum or pressure - Measurements under insulating gas - Test equipment for insulating fluids - Simulation of electric fields (COMSOL)



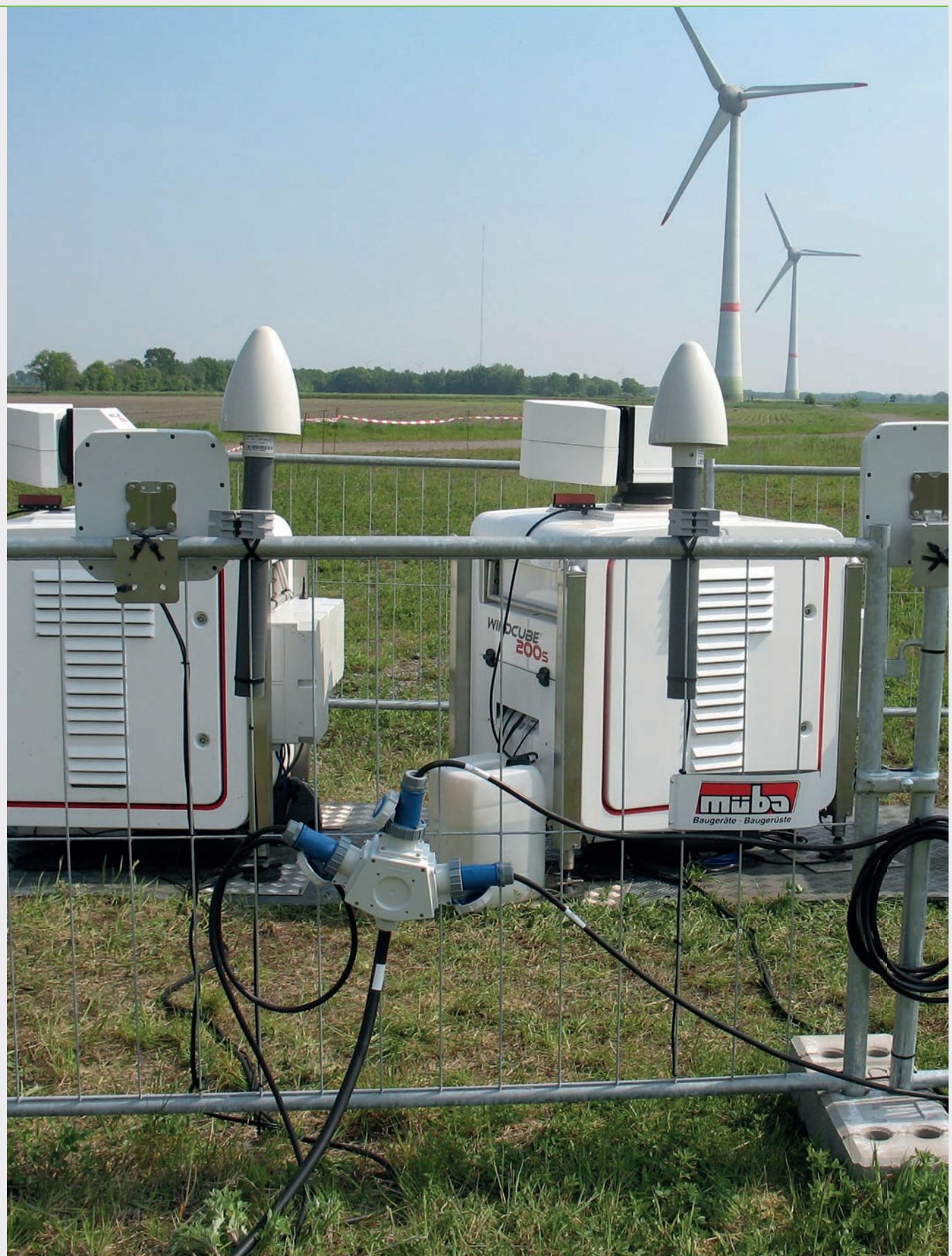
Prüfkörper zur Ermittlung der Durchschlagsspannung von vernetzten Isolierstoffen.

Test specimen for determining the breakdown voltage of cross-linked insulating materials.



Untersuchung des Durchschlagverhaltens von Grenzflächen in vergossenen Isoliersystemen.

Investigation of the breakdown behavior of interfaces in encapsulated insulation systems.





Integrierte
Energiesysteme

Ansprechpartner

PROF. DR. RER. NAT. CLEMENS HOFFMANN (INES)

Titel

DAS FACHGEBIET INTEGRIERTE ENERGIE-SYSTEME

title

INTEGRATED ENERGY SYSTEMS



Das Fachgebiet „Integrierte Energiesysteme“ (INES) erforscht die Transformation von heutigen Energieversorgungssystemen auf drei wesentlichen Themenfeldern, nämlich der Energiewirtschaft und Entscheidungsunterstützung, der Kommunikation und Koordination sowie der Windenergie. Diese Kernthemen des Fachgebietes werden auf dem theoretischen Fundament der am Fachgebiet aufgebauten Systemtheorie der Energiewende in drei Arbeitsgruppen bearbeitet.

Die Gruppe Energiewirtschaft und Entscheidungsunterstützung entwickelt Optimierungs- und Simulationsmodelle für nationale oder regionale integrierte Energiesysteme. Bei der Modellierung und Analyse möglicher Zielsysteme und Pfade für die Sektoren Strom, Wärme, und Verkehr werden technische, volks- und betriebswirtschaftliche, als auch stakeholdergruppenspezifische Aspekte erfasst. Die Forschungsergebnisse bieten Stakeholdern und Entscheidenden aus Politik, Wirtschaft und Zivilgesellschaft Folgenabschätzungen und Bewertungen für technische, regulatorische oder geschäftsmodellspezifische Handlungsoptionen.

Das Themenfeld der Gruppe Koordination und Kommunikation im Energiesystem (KUKIES) ist die Erforschung von IKT-Architekturen, Datenstrukturen, Steuerungsalgorithmen und Kommunikationsprotokollen zur Prognose, Kontrolle, Abstimmung und Steuerung des Energiesystems. Der Fokus liegt derzeit zum einen auf dem Design und der

The department "Integrated Energy Systems" explores the transition of current energy systems with three research foci: energy economics and decision support, coordination and communication, as well as wind energy. These core topics are investigated in three working groups, grounded on the theoretical basement of a system theory of the energy transition, which is established at the department.

The group Energy Economics and Decision Support develops optimisation and simulation models for national and regional integrated energy systems. For the modelling and analysis of possible target systems and according paths for sectors power, heat, and mobility, technical, macro as well as micro economic, and stakeholder-group-specific factors are taken into account. Research results provide stakeholders and decision makers of policy, economy, and civil society with estimations and assessments of technical, regulatory, and business-case-specific options.

The group Coordination and Key Communication in the Energy System (CooKiES) investigates ICT architectures, data structures, control algorithms, and communication protocols for monitoring, control, forecast, and coordination of the energy system. Currently, the focus is on the design and simulation of flexibility markets,



Prof. Dr. rer. nat.
Clemens Hoffmann

simulativen Erprobung eines Flexibilitätsmarktes im Zusammenspiel zwischen dezentralen Energiemanagementanlagen (Home Energy Management Systems), Prognosewerkzeugen der Netzbetreiber und weiteren Energiemarkten. Konzeptionell werden Beiträge zum Entwurf einer umfassenden IKT-Architektur des Energiesystems für ein anpassungsfähiges, dynamisches Energiesystem geleistet.

Die Gruppe Wind im Energiesystem beschäftigt sich mit zentralen Fragestellungen der Windenergie. Derzeit liegt der Arbeitsschwerpunkt der Gruppe in der Bestimmung und Charakterisierung der Ressource Wind mit dem Fokus auf Windpotenziale und Windenergiemeteorologie. Mittelfristig sollen weitere Fragestellungen Bestandteile der Forschung werden, wie beispielsweise die gesellschaftlichen Herausforderungen der Windenergie. Hierfür sollen die Auswirkungen politischer Entscheidungen auf den Ausbau der Windenergie modelliert werden. Ein weiteres, zukünftiges Forschungsthema stellt die Integration der Windenergie ins Energiesystem dar.

Mit dieser Ausrichtung spielt das Fachgebiet INES eine zentrale Rolle als Pipeline zwischen der assoziierten Universität und dem Fraunhofer Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik (IIE). Dieser vom Fachgebiet initiierte „Pipeline“-Gedanke der Kooperation zwischen Universität und Fraunhofer IIE hat vielfältige Dimensionen. Seinen Auftrag nach hat ein Fraunhofer Institut Ergebnisse universitärer Forschung in Richtung der industriellen Anwendung weiterzuentwickeln. Dieser Transfer wird über konkrete Kooperationen mit dem Fachgebiet INES, aber auch über Austausch von qualifiziertem Personal geleistet.

especially the interplay between a market platform and home energy management systems (HEMS), prognosis tools, and existing energy markets. Conceptionally, we contribute to proposals of an overall ICT architecture to enable the energy system to be flexible and dynamic.

The group Wind in the Energy System deals with central issues of wind energy. A seminar for addressing these topics is held annually at the University of Kassel. Currently, the group's interest is in the determination and characterisation of wind as a resource, focusing on wind potentials and wind energy meteorology. In the medium term societal challenges of wind energy will be addressed by modelling the effect of political decisions on the extension of wind energy. Also, the integration of wind energy in the energy system will be considered.

Following these directions, the department INES plays a key role as pipeline between the associated University and Fraunhofer Institute for Energy Economics and Energy System Technology. This idea of being a pipeline has manifold dimensions, as it is an Fraunhofer Institute's duty to develop further University research towards industrial applications. This transfer is achieved via project cooperations with the department INES, but also by the exchange of qualified staff.

Das Fachgebiet bietet folgende Lehrveranstaltungen an:
The following courses are offered by the department:

- **Systemtheorie der Energiewende**
- **Informations- und Kommunikationsstrukturen in der Energiewirtschaft**
- **Standortbewertung für Windenergieanlagen**
- **Windenergie als Teil des Energieversorgungssystems**

Prof. Dr. rer. nat. Clemens Hoffmann

Dr.-Ing. Reinhard Mackensen

Dr.-Ing. Doron Callies, Dipl.-Geoökol. Lukas Pauscher

Hon.-Prof. Dr.-Ing. Kurt Rohrig



Das Fachgebiet INES ist im Rahmen eines Teilvorhabens am Forschungsschwerpunkt Energiesystem Stadt des Fraunhofer IEE (<http://www.energie-system-stadt.de>) beteiligt. Ziel des Vorhabens ist es, die am Fachgebiet vorhandenen Methoden und Werkzeuge der Energiesystemanalyse und -optimierung in enger Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IEE auf die kommunalen und regionalen Gegebenheiten in Kassel anzupassen und zum Einsatz zu bringen.

Der Kern des Vorhabens ist die Durchführung von sogenannten Decision Theatres (DT). Bei diesen Veranstaltungen sollen über einen informierten Dialog kosteneffiziente Zielsysteme und regulative Maßnahmen mit den Stakeholdern der urbanen Energiewende diskutiert werden. Sensitivitätsrechnungen und deren Visualisierung spielen in einem DT eine wesentliche Rolle, denn während der Veranstaltung müssen die Konsequenzen einer Variation von Modellannahmen in Echtzeit veranschaulicht werden können. So können die Informationen für Diskussionen nutzbar gemacht werden, um damit Vertrauen in den Entscheidungsprozess zu bilden. Berücksichtigte Annahmen umfassen Technologiekosten oder technologische Präferenzen für/ gegen Windkraft, Freiflächen/Dachflächen-PV, eigenverbrauchsorientierte Prosumersysteme, Nah-, Fernwärme, Gebäudesanierung oder andere Effizienzmaßnahmen. Der vorgeschlagene Ansatz soll der Versachlichung der Diskussionen vor dem Hintergrund von Zielkonflikten der beteiligten Akteure dienen und eine effiziente Konsensfindung ermöglichen.

Im Forschungsschwerpunkt Energiesystem Stadt werden Methoden erarbeitet, um Kommunen, Städte und Versorger bei den Herausforderungen der Transformation der städtischen Energieinfrastrukturen und der Kopplung der Sektoren Strom, Wärme und Verkehr im urbanen Bereich zu unterstützen.

The focus research area urban energy system deals with the current and future research questions in order to support municipalities, cities, and utilities in the challenges of transforming urban energy infrastructures and coupling the electricity, heat, and transport sectors in urban areas.

The purpose of this INES project is the adaptation of methods and tools of energy system analysis and optimisation to the local and regional context of Kassel, and to apply them in close cooperation with Fraunhofer IEE. To do so, so-called Decision Theatres (DT) are going to be conducted. In these events, cost-efficient target systems and regulatory options are presented to stakeholders of the urban energy system transformation in an informed dialogue. Results of parameter sensitivity calculations and their visualisation play an substantial role in a DT because the live situation requires instant illustration of the effects varying underlying model assumptions. Assumptions to be varied comprise technology costs, technological preferences pro/con wind power, open space/roof top PV, self-consumption oriented prosumer systems, local or district heating, building retrofitting, or other efficiency improvement measures. This in turn builds trust in the decision-making process. The proposed approach is intended to rationalise the discussions, considering conflicting objectives of the involved actors, and to enable an efficiently consensus building.

Ansprechpartner

DR. SASCHA HOLZHAUER (INES)

Titel

LADEINFRASTRUKTUR 2.0**Optimierung des koordinierten Ausbaus und Betriebs der Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge und der Verteilungsnetze**

Im Projekt soll die Ladeinfrastruktur von Elektrofahrzeugen energie- und netzwirtschaftlich optimiert werden. Dabei sollen die Bedarfe und Interessen der Fahrzeugnutzer, Fahrzeug- und Ladeinfrastrukturhersteller sowie Netzbetreiber und Energieversorger aufeinander abgestimmt werden. Im Fokus der ganzheitlichen Analyse stehen Wechselwirkungen zwischen Produkten und Tarifen, Regularien, der Planung und des Betriebes.

Als eine Betriebsführungsstrategie des Verteilnetzes wird am Fachgebiet INES ein Flexibilitätsmarkt konzipiert, implementiert und analysiert. Auf Basis ursprünglicher Fahrpläne der Home Energy Management Systems (HEMS) können diese (automatisiert) flexible Verbrauchs- oder Erzeugungskapazitäten als Abweichungen von ihren Fahrplänen definieren und als Flexibilitätsangebote auf der Flexibilitätsmarktplattform platzieren. Die Plattform führt auf Grundlage des vom VNB bereitgestellten Flexibilitätsbedarfs für kurze Intervalle über 24 Stunden ein Matching der Gebote unter Berücksichtigung von Gebotsabhängigkeiten und Netzrestriktionen durch. Durch eine verbundene Verteilnetzsimulation kann anschließend die Wirksamkeit überprüft werden. Gegebenenfalls wird daraufhin das Matching angepasst und das Resultat in jedem Fall an die HEMS zurückgemeldet.

Diese Betriebsführung kann potentiell eine große Zahl unterschiedlicher Kunden erreichen und sowohl zeitlich als auch räumlich zielgerichtet wirken, um Netzüberlast zu vermeiden. Im Fokus der Forschungsarbeiten stehen Wechselwirkungen zwischen Flexibilitätsmarktdesign und Kundenverhalten auf Preisentwicklungen und Netzstabilität. Der Flexibilitätsmarkt wird als eine Komponente in die Gesamtsimulation des Projektes integriert, auch um Szenarien zusammenwirkender Betriebsführungsstrategien zu betrachten.

Ablauf des Flexibilitätsmarktes. Zunächst werden Basisfahrpläne (1) und Flexibilitätsbedarfe (2) an die Marktplattform geschickt. HEMS können diese Bedarfe abrufen und Flexibilitätsangebote absetzen (3), und resultierende Fahrplanänderungen werden an die Netzbetriebsführung geleitet (4). Falls die Flexibilitäten nicht greifen, kann abgeregelt (5) werden.

Course of flexibility market. Initially, baseline energy schedules (1) and flexibility demands (2) are sent to the market platform. HEMS can retrieve demand figures and bid flexibility (3). Resulting changes in the schedule are sent to the DSO (4). In case flexibilities are not sufficient, curtailment takes place (5).

Gefördert durch:

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

**Gefördert durch: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
(BMWi) unter dem Förderkennzeichen 0350048A**

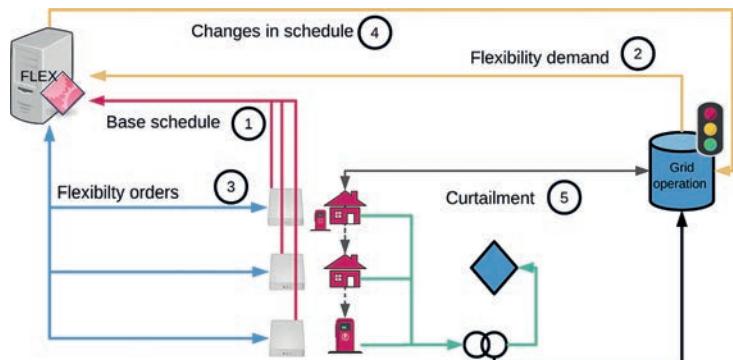
title

LADEINFRASTRUKTUR 2.0**Optimising the coordinated extension and operation of charging infrastructure for electric vehicles and distribution grids**

The project addresses the optimisation of charging infrastructure for electric vehicles considering energy and grid economic criteria. To this end, demands and interests of car users, manufacturers of cars and infrastructure, grid operators, and energy providers shall be integrated.

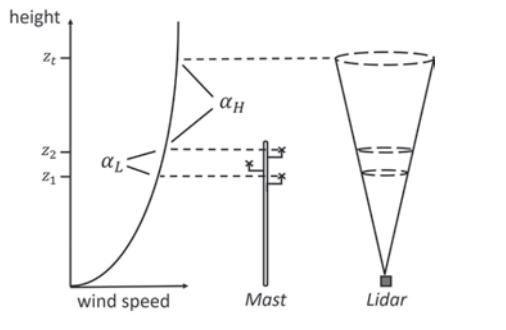
As one of the considered distribution grid operation strategies, at INES a flexibility market is conceptualised, implemented, and analysed. Based on originally planned energy schedules of Home Energy Management Systems (HEMS) these are enabled to define flexibilities as deviations from the proposed schedule to be placed as bids at the flexibility market platform. Considering the distribution service operator's (DSO) demand for flexibility, the platform performs a matching for each of short intervals of the next day. In doing so, the platform respects dependencies and grid restrictions. By means of a connected grid simulation, the effects of such a matching can be estimated, the matching can be improved if necessary, and results are played back to HEMS.

An important aspect of the research at INES is the interplay between flexibility market design and customer behaviour and its effect on price development and grid stability. The flexibility market will be integrated as one component in the project's overarching simulation environment in order to investigate the interplay with other operation strategies.



OPTIMIERUNG VON LiDAR-BASIERTEN MESSSTRATEGIEN ZUR STANDORT-BEWERTUNG VON WINDPARKS (LiMeS)

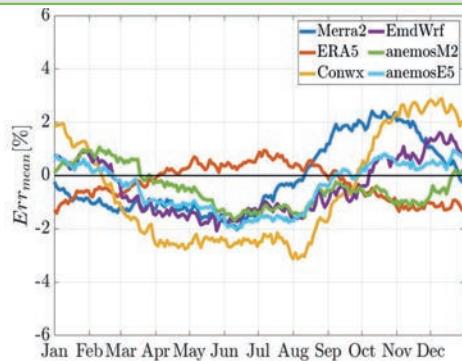
OPTIMIZATION OF LiDAR-BASED MEASUREMENT STRATEGIES FOR RESOURCE ASSESSMENT OF WIND FARMS (LiMeS)



Systematische Fehler der Langzeitkorrektur in Abhängigkeit des Messbeginns bei Verwendung verschiedener Referenzdaten (Messdauer: 90 Tage, Regressionsmodell: Lineare Regression mit Residuen). Gezeigt ist der Fehler in mittlerer Windgeschwindigkeit. *Systematic errors (bias in mean wind speed) of the long-term correction in dependence of the start of the measurement period (measurement period: 90 days, regression model: linear regression with residuals). Each line represents the use of one different reference data set.*

Kombination von Mast- und LiDAR-Messungen zur Verbesserung der Vertikalextrapolation der Windgeschwindigkeit auf die Zielhöhe z_t . Die Windprofile α_L und α_H unterhalb/oberhalb der Mastspitze werden im Zeitraum der LiDAR-Messung bestimmt und korreliert.

Combination of mast and lidar in order to improve the vertical extrapolation of wind speed to the target height z_t . The wind profiles α_L and α_H below/above the top of the mast are correlated using the data obtained in the lidar measurement period.



Laserbasierte Fernmessgeräte (sog. LiDAR, engl.: Light Detection And Ranging) ermöglichen die Messung der Windgeschwindigkeit in großen Höhen vom Boden aus. Im Rahmen einer Windpotentialbestimmung bieten sie insbesondere aufgrund ihrer Flexibilität eine attraktive Alternative zu hohen Windmessmasten. Das Fachgebiet INES erforscht im Projekt insbesondere zwei Ansätze beim effizienten Einsatz der LiDAR-Messtechnik.

1. Kombination von Mast- und LiDAR-Messung

Aufgrund der großen Höhe moderner Windenergieanlagen werden Mastmessungen i.d.R. deutlich unterhalb der Zielhöhe durchgeführt und die Messdaten vertikal extrapoliert. Ergänzende kurzzeitige LiDAR-Messungen auf Zielhöhe und eine geschickte Korrelation der gemessenen Windprofile ermöglichen eine Verbesserung der Genauigkeit.

2. Kurzzeitige LiDAR-Messung und Langzeitkorrektur

Da die Windbedingungen zeitlich variieren, werden die gemessenen Daten mit langzeitlichen Referenzdaten abgeglichen (korreliert) und langzeitkorrigiert. Durch den flexiblen Einsatz von LiDAR-Geräten wird eine kurzzeitige Messung von deutlich unter einem Jahr attraktiv. Hierbei entstehen jedoch saisonale Effekte, d.h. das Ergebnis der Langzeitkorrektur hängt davon ab, wann die Messung durchgeführt wurde.

In wind resource assessment, remote sensing devices such as lidar (Light Detection And Ranging) offer an attractive alternative to wind measurement masts, especially due to their flexibility. In the LiMeS project, the department INES investigates two practical approaches regarding the efficient use of lidar measurement technology.

1. Combination of mast and lidar

Due to the large heights of modern wind turbines, mast measurements are usually carried out well below the target height and the measured data are extrapolated vertically. Additional short-time lidar measurements and a correlation of the measured wind profiles allow an increase of the accuracy.

2. Long-term correction of short-term lidar measurements

As wind conditions vary over time, the measured data are correlated with long-term reference data, and a long-term correction is performed. The flexible use of lidar makes measurements shorter than a year attractive. However, seasonal effects arise, i.e., the results depend on the measurement period.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

**Gefördert durch: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi),
Förderkennzeichen 0324159E**

Ansprechpartner

DR. DORON CALLIES (INES)

Titel

TECHNISCHE WEITERENTWICKLUNGEN VON MULTI-LiDAR-MESSKAMPAGNEN FÜR ERTRAGSPROGNOSE UND PERFORMANZ- ÜBERPRÜFUNG

Für Ertragsprognosen von Windenergieanlagen (WEA) sowie für Performanzüberprüfungen von WEA werden aktuell Messungen von Messmasten und Windprofil-LiDAR verwendet. Allerdings ist die Repräsentativität dieser Messsysteme räumlich jeweils stark begrenzt. Eine innovative Möglichkeit für die Bestimmung der Windbedingungen an verschiedenen Punkten bieten Multi-LiDAR Geräte. Hierbei handelt es sich um mehrere scannende Lidar mit großen Reichweiten von mehreren Kilometern, welche aus verschiedenen Richtungen ihren Laserstrahl in einem bzw. mehreren Messpunkt(en) kreuzen und so den Wind messen können. Damit lässt sich eine hohe räumliche Flexibilität für Messpunkte im Windpark erreichen.

title

TECHNICAL ENHANCEMENTS OF MULTI- LiDAR MEASUREMENT CAMPAIGNS FOR YIELD ASSESSMENT AND PERFORMANCE VERIFICATION



Einsatz von
scannenden LiDAR zur
Windmessung.
*Application of
scanning lidars for a
wind measurement.*



Nutzung einer Drohne zur Überprüfung des Messortes des Laserstrahls eines scannenden LiDAR.
Use of a drone to check the measurement location of the laser beam of the scanning lidar.

Für die praktische Anwendung in den energiemeteorologischen Fragestellungen fehlt bisher jedoch der Nachweis für die Eignung von Multi-LiDAR. Die Forscher*innen des Fachgebiet INES leisten mit ihrer Arbeit einen Beitrag zur Qualifizierung dieser innovativen Technologie für den industriellen Einsatz. Dabei steht insbesondere die Bestimmung der Messunsicherheit solcher Multi-LiDAR Messungen im Fokus. Diese soll über theoretische Modellierung und anhand von Messungen abgeschätzt werden.

For yield assessment as well as for performance verification of wind turbines, measurements from measuring masts and wind profile lidar are currently used. However, the representativeness of these measurement systems is spatially very limited. Multi-lidar devices offer an innovative possibility for the determination of wind conditions at different points. These are multiple scanning lidars with long ranges of several kilometres, which cross their laser beam from different directions in one or more measurement point(s) and can thus measure the wind. This allows high spatial flexibility for measurement points in the wind farm.

So far, however, there is no proof of the suitability of multi-lidar for these applications. With their work, researchers of the INES department contribute to the qualification of this innovative technology for industrial use.

In particular, they are focusing on determining the measurement uncertainty of such multi-lidar measurements. This is to be estimated by means of theoretical modeling and measurements.

Gefördert durch:



**Gefördert durch: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi),
Förderkennzeichen 0324319B**

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



2019/2020

ABGESCHLOSSENE PROMOTIONEN

Daniel Duckwitz



Zusammenfassung

Die augenblickliche wirksame Momentanreserve stabilisiert elektrische Energiesysteme nach großen Störungen. Sie nimmt mit zunehmender Erzeugung aus erneuerbaren Energien ab, was zu einem erhöhten Risiko von Blackouts führt, wenn keine Maßnahmen ergriffen werden.

Die Bereitstellung zusätzlicher Trägheit wird notwendig sein, um die Versorgungssicherheit auf einem angemessenen Niveau zu halten. Um das Problem der reduzierten Trägheit auf zuverlässige und kosteneffiziente Weise zu lösen, werden in dieser Arbeit zunächst die Anforderungen auf Systemebene systematisch beschrieben, als Grundlage für die nachfolgende Bewertung verschiedener technologischer Lösungen und Regelungssysteme.

Um die Anforderungen an die Trägheit abzuleiten, werden Untersuchungen auf Systemebene für das System-Split-Szenario durchgeführt. Verschiedene Technologien, d.h. Batteriespeicher, Windturbinen und rotierende Phasenschieber. Die Kosten für die Momentanreserve werden für Deutschland auf zwischen 86 Mio. € pro Jahr und 2 Mrd. € pro Jahr geschätzt.

Zwei verschiedene Wechselrichter-Regelungsschemata, die eine emulierte Trägheit bereitstellen, werden entworfen und ausgiebig verglichen: erweiterte Stromregelung und virtuelle Synchronmaschine. Beide können ein System mit 100 % erneuerbarer Erzeugung nach den schwersten Systemspaltungsereignissen stabilisieren.

Potenziell attraktive Richtungen zur Kostenoptimierung werden beschrieben. Zum Beispiel ist der DC-gekoppelte zusätzliche Batteriespeicher in erneuerbaren Kraftwerken eine attraktive Lösung: Er ermöglicht Situationen mit reiner erneuerbarer Erzeugung und ermöglicht zusätzliche Energie-Dienstleistungen, um weitere Erträge zu erzielen.

Erstgutachter: Prof. Dr. rer nat. Clemens Hoffmann,
 Universität Kassel

Zweitgutachter: Prof. Hendrik Lens,
 Universität Stuttgart

Tag der Disputation: 22. März 2019

Summary

System inertia is the instantaneous power reserve that stabilizes power systems after large-scale disturbances. It declines with increasing renewable generation, causing an increased risk of black-out unless action is taken.

Providing additional inertia will be necessary to maintain security of supply at a reasonable level. To solve the problem of reduced inertia in a reliable and cost-efficient way, this thesis first systematically describes requirements on system level as basis for the following evaluation of different technological solutions and control schemes. System-level studies of the system split scenario are conducted to derive requirements for inertia. Different technologies, i.e. battery storage, wind turbines and synchronous condensers are compared with respect to their costs. Cost for the inertia reserve are estimated to be between 86 million € per year and 2 billion € per year for Germany.

Two distinct inverter control schemes that provide emulated inertia are designed and extensively compared: extended current control and virtual synchronous machine. Both can stabilize a system with 100% renewable generation after the most severe system split events.

Potentially attractive directions for cost optimization are described. For example, the DC-coupled additional battery storage in renewable power plants is an attractive solution: It facilitates renewable-only generation situations and allows additional active power services to generate further revenue.

DR.-ING. GUSTAV LAMMERT (e²n)

title

MODELLING, CONTROL AND STABILITY ANALYSIS OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS IN POWER SYSTEM DYNAMIC STUDIES**Erstgutachter:** Prof. Dr.-Ing. Martin Braun,
Universität Kassel**Zweitgutachter:** Prof. Thierry Van Cutsem,
University of Liège, Belgium**Tag der Disputation:** 30. April 2019

Gustav Lammert

Zusammenfassung

In dieser Arbeit werden die Auswirkungen folgender Faktoren untersucht: i) die Fähigkeit zur Niederspannungsüberbrückung und dynamischen Spannungsunterstützung, ii) die aktive Stromrückgewinnungsrate, iii) die lokale Spannungsregelung und iv) die Spannungsregelung auf Anlagenebene von Photovoltaik-Großanlagen auf die kurzfristige Spannungsstabilität und die fehlerbedingte verzögerte Spannungsrückgewinnung sowie die transiente und Frequenzstabilität. Das dynamische Verhalten des Stromversorgungssystems wird mit modernsten Methoden analysiert, wie z. B. Phasormodus-Zeitbereichssimulationen und die Berechnung der kritischen Ausgleichszeit, die die Stabilitätsmarge bestimmt. Darüber hinaus wird das kürzlich entwickelte Maß der Kullback-Leibler-Divergenz angewendet, um die Qualität der Spannungswiederherstellung zu bewerten. Nachteile dieses Maßes werden skizziert und ein neuartiges Maß, der sogenannte Spannungswiederherstellungsindex, wird definiert, der die verzögerte Spannungswiederherstellung systematischer quantifiziert. Die Untersuchungen werden mit einem generischen Photovoltaik-Systemmodell durchgeführt und es werden typische Modellparameter verwendet, die in Zusammenarbeit mit einem Hersteller ermittelt wurden. Die Stabilitätsanalyse wird in DlgSILENT PowerFactory durchgeführt unter Verwendung von: i) einem Ein-Last-Unendlich-Bus-System und ii) einem IEEE-Multi-Maschinen-Spannungsstabilitäts-Testsystem, nämlich dem Nordic Testsystem. Die Ergebnisse zeigen, dass mit einer adäquaten Regelung von Photovoltaikanlagen die dynamische Leistung des Stromsystems deutlich verbessert werden kann.

Summary

This thesis investigates the impact of: i) the low voltage ride-through and dynamic voltage support capability; ii) the active current recovery rate; iii) the local voltage control; and iv) the plant-level voltage control of large-scale photovoltaic systems on short-term voltage stability and fault-induced delayed voltage recovery as well as transient and frequency stability. The power system dynamic performance is analysed using state-of-the-art methods, such as phasor mode time-domain simulations and the calculation of the critical clearing time that determines the stability margin. Moreover, the recently developed Kullback-Leibler divergence measure is applied to assess the quality of the voltage recovery. Drawbacks of this metric are outlined and a novel metric, the so-called voltage recovery index, is defined that quantifies the delayed voltage recovery more systematically. The studies are performed with a generic photovoltaic system model and typical model parameters are used that were determined in collaboration with a manufacturer. The stability analysis is performed in DlgSILENT PowerFactory using: i) a one-load infinite-bus system; and ii) an IEEE multi-machine voltage stability test system, namely the Nordic test system. The results show that with the adequate control of photovoltaic systems, power system dynamic performance can be significantly improved.

kassel university press, ISBN 978-3-7376-0716-2, 203 Seiten
Energy Management and Power System Operation Vol 9
DOI: 10.17170/kobra-202007161458#

DR.-ING. SEBASTIAN WELS (AHT)

Titel

ZUM EINFLUSS VON TEMPERATUR UND FEUCHTIGKEIT AUF DIE ELEKTRISCHE FESTIGKEIT VON THERMOPLASTISCHEM KUNSTSTOFF, SILIKONGEL UND EINEM DARAUS RESULTIERENDEN SCHICHTISOLIERSYSTEM

Sebastian Wels



Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Albert Claudi,
Universität Kassel

Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Zacharias,
Universität Kassel

Tag der Disputation: 12. Juli 2019

Zusammenfassung

Im Fokus dieser Arbeit steht der Einsatz von technischem Kunststoff, Silikongel und dem Isolationssystem aus beiden Isolierstoffen für elektrotechnische Anwendungen. Aktuell findet diese Werkstoffkombination breite Anwendung in der Halbleiterindustrie, wo sie hauptsächlich als Packaging von Hochleistungsmodulen eingesetzt wird. Silikongel wird hier als Vergussmasse des Halbleiters und somit als elektrische Hauptisolierung verwendet. Aus dem technischen Kunststoff wird das Gehäuse hergestellt. Die Entscheidung für ein spezifisches Gehäusematerial erfolgte in der Vergangenheit somit hauptsächlich nach mechanischen Gesichtspunkten.

In der Dissertation wurde eine umfassende hochspannungstechnische Charakterisierung zum Einfluss von Temperatur und Feuchtigkeit auf die elektrische Festigkeit von thermoplastischem Kunststoff, Silikongel und dem resultierenden Schichtisoliersystem erarbeitet. Aufgrund der auf dem Markt verfügbaren Vielfalt an Werkstoffen beschränkt sich diese Arbeit auf zwei thermoplastische Kunststoffe und ein Silikongel. Diese „Einschränkung“ hat zur Folge, dass in der Dissertation grundlegende Testabläufe und Versuchsaufbauten zur Untersuchung vor weiteren Materialien festgelegt wurden. Speziell im Bereich der thermoplastischen Kunststoffe erfordert dies die Entwicklung eines neuartigen Prüfkörpers zur Untersuchung der elektrischen Festigkeit und des elektrischen Alterungsverhaltens.

Summary

The focus of this work is the use of technical plastic, silicone gel and the insulation system made of both insulation materials for electrical applications. The material combination is currently used in the semiconductor industry where it is mainly used as packaging for high-performance modules. Silicone gel is applied as a casting compound for the semiconductor and thus the main electrical insulation. The housing is made of engineering plastics. In the past, the decision for a specific housing material was mainly based on mechanical aspects.

In the thesis, a comprehensive high voltage characterization of the influence of temperature and humidity on the electrical strength of thermoplastic, silicone gel and a resulting layer insulation system was developed. Due to the variety of materials available on the market, this work is limited to two thermoplastics and one silicone gel. This "restriction" resulted in the development of standard test procedures and standard experimental setups which were defined in this thesis. In the field of thermoplastics, this requires the development of a new type of test specimen to investigate the electrical strength and electrical aging behavior.

DR.-ING. WOLFRAM KRUSCHEL (EVS)

Titel

UNTERSUCHUNGEN ZUM EINSATZ LEISTUNGSELEKTRONISCHER SPANNUNGSREGLER IN NIEDERSPANNUNGSVERTEILNETZEN MIT HOHEM ANTEIL DEZENTRALER ERZEUGUNGSANLAGEN

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Zacharias,
Universität Kassel

Zweitgutachter: Prof. Dr. rer. nat. Ludwig Brabetz,
Universität Kassel

Tag der Disputation: 13. September 2019



Wolfram Kruschel

Zusammenfassung

Die steigende Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien stellt das elektrische Energieversorgungssystem vor neue Herausforderungen. Für Verteilnetze mit zunehmender Durchdringung mit dezentralen Erzeugungsanlagen sind besonders Maßnahmen zur Spannungshaltung relevant. Systemkonzepte zur aktiven Spannungsregelung stellen hierbei Alternativen zu konventionellen Netzverstärkungsmaßnahmen dar.

In dieser Arbeit wird daher der Einsatz von leistungselektronischen Spannungsreglern in aktiven Niederspannungsverteilnetzen untersucht. Für ländliche Niederspannungsnetze wird betrachtet, welche theoretischen Potenziale sich hinsichtlich der erreichbaren Aufnahmekapazität durch Einsatz autonomer Konzepte zur Spannungshaltung ergeben. Hierauf aufbauend werden Einsatzszenarien für Längsspannungsregler identifiziert und analysiert.

Als Realisierungsmöglichkeit eines Längsspannungsreglers wird ein auf IGBT-Wechselrichtern basierendes Systemkonzept untersucht. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf dem Einsatz des Betriebsmittels als dezentrale Zusatzkomponente. Zu den betrachteten Aspekten gehören u.a. Konzepte für Hardware, Regelung und Betriebsführung sowie Untersuchungen zu Belastungsprofilen und zur Zuverlässigkeit des Betriebsmittels. Zudem erfolgt eine praktische Erprobung des Systemkonzepts mittels Labortests.

Summary

The increasing generation of electricity from renewable energies presents the electrical energy supply system with new challenges. For distribution networks with increasing penetration with decentralized generation systems, voltage maintenance measures are particularly relevant. System concepts for active voltage regulation represent alternatives to conventional network reinforcement measures.

In this thesis, therefore, the use of power electronic voltage regulators in active low-voltage distribution networks is examined. For rural low-voltage networks, it is considered which theoretical potentials arise with regard to the achievable absorption capacity through the use of autonomous concepts for voltage maintenance. Based on this, application scenarios for series voltage regulators are identified and analyzed.

A system concept based on IGBT inverters is being investigated as a way of implementing a series voltage regulator. The focus here is on the use of the equipment as a decentralized additional component. The aspects considered include concepts for hardware, control and operational management as well as investigations into load profiles and the reliability of the equipment. The system concept is also tested in practice using laboratory tests.

DR.-ING. OLYMPIO CIPRIANO DA SILVA FILHO (EVS)

title

A FAMILY OF HIGH-FREQUENCY ISOLATED SINGLE-PHASE AC-AC-CONVERTERS

Olympio Cipriano da Silva Filho



Zusammenfassung

Eine Familie von hochfrequenten isolierten einphasigen AC/AC-Wandlern wurde untersucht und vorgestellt. Die Topologien basieren dabei auf verschachtelten, strukturierten Induktivitäten, sowie einem DAB-Wandler (Dual Active Bridge). Dies erlaubt eine hohe Leistungsdichte und Stromaufnahme, sowie ein sanftes Schalten – zumindest in einem Teil der Halbleiter. Die Topologie-Familie besteht insgesamt aus neun Schaltungstopologien, von denen drei symmetrisch und sechs asymmetrisch sind, wofür passende Schaltmuster entworfen wurden. Um sowohl das Gesamtvolumen als auch die Verluste der magnetischen Komponenten zu reduzieren, werden Methoden zur Integration und Modellierung der magnetischen Bauteile untersucht. Als Ergebnis wurden zwei integrierte Induktivitäten entwickelt und im symmetrischen Vollbrückenwandler getestet. An der Universität Kassel wurde eine experimentelle Plattform entwickelt, mit der Ergebnisse von fünf Topologien gewonnen wurden.

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Zacharias,
Universität Kassel

Zweitgutachter: Prof. Dr. rer. nat. Ludwig Brabetz,
Universität Kassel

Tag der Disputation: 11. November 2019

Summary

A family of high-frequency isolated single-phase AC/AC converters is presented. The topologies are based on interleaved structured inductors and a DAB-converter (Dual Active Bridge). This enables high power density and current handling as well as smooth switching in a part of the semiconductor. The topology family consists of nine circuit topologies, three of which are balanced and six of which are asymmetric. For this one can use the proposed partial actuator scheme. In order to reduce the total volume as well as the losses of the magnetic components, methods for integrating and modeling the magnetics are investigated. As a result, two integrated magnetics are developed and tested in the symmetrical full bridge converter. An experimental platform was developed at the University of Kassel with which results of five topologies were obtained.

DR.-ING. JAN-HENDRIK MENKE (e²n)

title

A COMPREHENSIVE APPROACH TO IMPLEMENT MONITORING AND STATE ESTIMATION IN DISTRIBUTION GRIDS WITH A LOW NUMBER OF MEASUREMENTS**Erstgutachter:** Prof. Dr.-Ing. Martin Braun,
Universität Kassel**Zweitgutachter:** Prof. Dr. Sebastian Lehnhoff,
OFFIS e.V., Oldenburg**Tag der Disputation:** 19. Dezember 2019

Jan-Hendrik Menke

Zusammenfassung

Diese Dissertation befasst sich mit der Überwachung und Zustandsabschätzung elektrischer Netze, insbesondere auf der Ebene der Verteilnetze. Dieses Thema wird relevant, da die heutigen Verteilnetze nicht immer für den aktuellen Ausbau der dezentralen Einspeisung ausgelegt sind, was bspw. zu Engpässen im Netz führen kann. Werden Engpässe durch ein geeignetes Monitoring erkannt, können sie durch Maßnahmen wie z. B. Leistungsreduktion dezentraler Einspeiser, behoben werden. Aus wirtschaftlichen und technischen Gründen kann die Netzüberwachung jedoch nicht mit einer ähnlich hohen Messdichte wie in Übertragungsnetzen realisiert werden.

Für den Einsatz im Echtzeit-Netzbetrieb werden daher zwei neue Überwachungsmethoden vorgestellt, die für eine geringe Messdichte ausgelegt sind. Zum einen wird eine heuristische Überwachungsmethode vorgestellt, die ohne Pseudomessungen auskommt und Spannungsbeträge sowie Leitungsauslastungen schätzt. Zum anderen wird eine Überwachungsmethode vorgestellt, die auf künstlichen neuronalen Netzen basiert. Mit entsprechendem Training kann die Methode Netzgrößen, z. B. Netzspannungen oder Leistungsflüsse, mit hoher Genauigkeit schätzen. Verschiedene Erweiterungen des Verfahrens erlauben die Schätzung des kompletten Netzzustandes.

Für die Planung der Messinfrastruktur wird ein Konzept vorgestellt, um geeignete Messstellen für den Einsatz einer der Monitoring-Methoden zu bestimmen. Es werden mehrere mögliche Messkonfigurationen mit zu erwartenden Schätzgenauigkeiten und prognostizierten Investitionsbedarfen vorgestellt.

Summary

The dissertation addresses the monitoring and state estimation of electrical grids, especially at the distribution grid level. This topic becomes relevant because today's distribution grids are not always designed for the current expansion of decentralized feed-in, which can lead to congestion within the grid. If congestion is detected by suitable monitoring, it can be resolved by measures, e.g., curtailment of generator power. For economic and technical reasons, however, grid monitoring cannot be implemented with a similarly high measurement density as in transmission grids.

Two new monitoring methods, which are designed for low measurement density, are therefore presented for use in real-time grid operation. First, a heuristic monitoring method is presented, which does not require pseudo-measurements and estimates voltage magnitudes and line loadings. Second, a monitoring method based on artificial neural networks is presented. With appropriate training, the method can estimate grid variables, e.g., voltage magnitudes or line loadings, with high accuracy. Various extensions of the method allow the estimation of the complete grid state.

For measurement infrastructure planning, a concept is presented to determine suitable measurement locations for the use of one of the monitoring methods. Several possible measurement configurations are presented with expected estimation accuracies and projected capital expenditures

*kassel university press, ISBN 978-3-7376-0872-5, 193 Seiten
Energy Management and Power System Operation Vol 11
DOI: 10.17170/kobra-202007291503*

METHODEN ZUR KENN LINIENBASIERTEN ZUSTANDSÜBERWACHUNG VON METALLOXID-VARISTOREN

Stefan Jörres



Zusammenfassung

Die Dissertation thematisiert das kennlinienbasierte Alterungsverhalten von Metalloxid-Varistoren und dessen messtechnische Bestimmung. Ziele der Untersuchungen bestehen in der systematischen Aufnahme und Darstellung der unterschiedlichen Degradationsmechanismen in Abhängigkeit praxisrelevanter Belastungsarten. Die Daten helfen bei der Entwicklung eines Zustandsüberwachungssystems für Überspannungsschutzgeräte im Bereich von Niederspannungsenergieversorgungsanlagen.

Zur Untersuchung des Alterungsverhaltens von Varistoren wird eine vollautomatisierte skalierbare Messmethode entwickelt und qualifiziert, die im Gegensatz zu standardisierten Prüfverfahren eine höhere Datentiefe aufweist. Mithilfe einer neuen Darstellungsform lassen sich die unterschiedlichen Degradationsmechanismen bestimmen und zuordnen. Ergebnisse zeigen, dass die bisherige Messung der charakterisierenden Varistorspannung, zur Bestimmung einer Alterung, nur unzureichende Interpretationen zulässt. Neben den Untersuchungen zum Alterungsverhalten wird in dieser Arbeit die Auswahl und Entwicklung einer geeigneten Sensorik zur permanenten Zustandsüberwachung von Überspannungsschutzabteiern vorgestellt. Für die Detektion schädigender Einflüsse wird ein magnetfeldbasiertes Messsystem entwickelt, welches für den speziellen Einsatz an Überspannungsschutzgeräten ausgelegt wird. Dieses misst zeitaufgelöst Ableitströme und stellt die Daten in einer Cloud-Anwendung bereit. Das Messsystem umfasst einen Messumformer auf Luftspulenbasis, welcher anhand von Simulationsergebnissen konstruiert und anschließend evaluiert wird. Durch eine Erweiterung können zusätzlich hochfrequente Spannungsimpulse, wie sie in den EMV-Richtlinien beschrieben werden, qualitativ aufgenommen und ausgewertet werden.

Nicht zuletzt ist das Ziel dieser Arbeit, die oftmals makroskopische Sichtweise der Degradation von Zinkoxid-Varistoren im Bereich des Überspannungsschutzes mit hinreichenden mikroskopischen Zusammenhängen und Ursachen zu vereinen. Die gewonnenen Erkenntnisse zur Überwachung von Überspannungsschutzgeräten helfen aus aktuellem Anlass internationalen Normungen bei der Anpassung und Weiterentwicklung ihrer Regularien.

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Albert Claudi,
Universität Kassel

Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Zacharias,
Universität Kassel

Tag der Disputation: 15. Mai 2020

Summary

This thesis investigates the characteristic aging behavior of metal oxide varistors and their currently available measurement methods with the main aim to systematically study and depict the various degradation mechanisms depending on practical stresses. The results of this work will be important to inform and shape the future development of condition monitoring systems for the use on surge protective devices in low-voltage networks.

In order to be able to study the aging behavior of varistors, a fully automated and scalable measuring method was developed and optimized, which, in contrast to conventional testing methods, produces an increased data depth. Using a new form of data presentation, this allows different aging and degradation mechanisms to be determined and assigned. In contrast, current data shows that conventional methods measuring the characteristic voltage of varistors are inefficient and inadequate to determine aging behaviours. In addition, the selection and development of a suitable sensor for permanent condition monitoring of surge arresters will be discussed and presented in this work. To detect potentially harmful influences, a magnetic field-based measuring system, which was designed for special use on surge protective devices, was developed. The system thereby measures surge currents in a time-resolved manner and provides the data in a cloud application. The measuring system is composed of transducer-based on air coils, which are constructed using simulation results and subsequently evaluated. The use of an extension enables additional rapid voltage transients to be qualitatively recorded and evaluated, as outlined in the EMC guidelines.

Finally, the aim of this work is to combine the rather macroscopic view of the degradation of zinc oxide varistors in the area of surge protection with sufficient microscopic causal consequential relationships. The findings and knowledge gained from this work will help international standards to adapt and further develop novel regulations.

DR.-ING. STEFAN ENGEL (INES)

title

SEMA – SOCIAL ENERGY MANAGEMENT

Erstgutachter: Prof. Dr. rer. nat. C. Hoffmann,
Universität Kassel

Zweitgutachter: Prof. Dr. Andreas Ernst,
Universität Kassel

Tag der Disputation: 21. Februar 2020



Stefan Engel

Zusammenfassung

Entwicklung und Evaluierung eines Spiel-Anreiz-Konzepts für Social Communities zur Optimierung der Energieeffizienz und der verbesserten Nutzung fluktuierender Erneuerbarer Energien

Zu den beiden wichtigsten Zielen der Energiepolitik der Bundesregierung gehören der Ausbau der Erneuerbaren Energien sowie die Senkung des Primärenergieverbrauchs insbesondere beim Wärmebedarf von Gebäuden. Die wesentlichen Herausforderungen, die hierbei bestehen, sind zum einen Lösungen zu finden, um auf die mit dem Ausbau Erneuerbaren Energien einhergehenden Schwankungen in der Stromerzeugung durch fluktuierende Erneuerbare Energien zu reagieren, und zum anderen die Notwendigkeit, den Wärmeverbrauch von Bestandsgebäuden signifikant zu senken.

Mit sema – Social Energy Management – wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Plattform zur Optimierung des individuellen Energieverbrauchs entwickelt, die spiel-orientierte Anreizkonzepte mit einer Social Energy Community verbindet. Die Plattform wurde im Rahmen eines Feldtests erprobt. Um die Analyse und Einordnung der Ergebnisse zu unterstützen, wurde der Feldtest durch zwei ergänzende Befragungen begleitet.

Summary

Supporting the expansion of renewable energies and reducing primary energy consumption, especially heating in buildings, can be considered the two most important goals of the German government's energy policy. Main challenges to these goals are, on the one hand, to find solutions to deal with fluctuations in electricity generation caused by fluctuating renewable energies and, on the other hand, the need to significantly reduce the heat consumption of existing buildings.

sema – Social Energy Management – a platform for the optimisation of individual energy consumption developed in the framework of this study – aims to combine game-oriented incentive concepts with a social energy community. The platform was tested in a field test, which was accompanied by two supplementary surveys to support the analysis and understanding of the results.

A NOVEL EVALUATION FRAMEWORK FOR ENERGY LOSSES IN LOW VOLTAGE DISTRIBUTION GRIDS

Chenjie Ma



Zusammenfassung

Die Dezentralisierung der Energieerzeugung bedeutet die Integration zahlreicher, räumlich verteilter Energieerzeugungsanlagen in elektrischen Verteilungsnetzen, wodurch Treibhausgasemissionen reduziert und Nachhaltigkeit der Energieerzeugung erhöht werden kann. Für die Erhöhung des Anteils von erneuerbaren Energien ist ein effizienter Netzbetrieb grundlegend. Um die Veränderungen des Gesamtsystems zu beobachten, ist die Entwicklung der Energieverluste essenziell. In dieser Dissertation wird ein neuartiges Framework zur Bestimmung und Bewertung von Energieverlusten in Niederspannungsnetzen entwickelt. Zu Beginn wird ein effizienter Ansatz zur Bestimmung der Netzverluste eingeführt, der auf einer umfassenden Auswertung der relevanten Netzeigenschaften und einem verbesserten Verfahren zur Referenznetzmodellierung basiert. Zudem wird ein neuer Indikator zur schnellen Abschätzung der Veränderung der Netzverluste abhängig von den im Netz installierten dezentralen Einspeisungsanlagen entwickelt. Beide Verfahren werden anhand einer großen Anzahl von realen Mess- und Netzdaten validiert. Für Verteilnetzbetreiber ist dieser neue Ansatz eine praktisch umsetzbare Alternative zu ihren bisherigen Ansätzen hinsichtlich der Ermittlung von Netzverlusten. Die Anwendung des Bewertungsframeworks kann den Netzbetreibern weiterhelfen, die potenzielle Entwicklung der Verluste in ihren Systemen genauer zu bestimmen, zu prognostizieren und besser zu verstehen. So trägt diese Dissertation zur Steigerung der Energieeffizienz und Nachhaltigkeit im zukünftigen Stromversorgungssystem bei.

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Martin Braun,
Universität Kassel

Zweitgutachter: Prof. Dr. rer. nat. Bernhard Sick,
Universität Kassel

Tag der Disputation: 08. Mai 2020

Summary

Decentralization of energy generation in power distribution systems is recognized as an important development strategy to incorporate more small-scale renewable sources, reduce greenhouse gas emissions and increase energy efficiency. Beside integrating more decentralized generators into existing systems, an efficient system operation is equally important to achieve an overall sustainable energy system. In order to keep track of upcoming changes regarding system efficiency, an accurate determination of energy losses in distribution systems is a fundamental step. Therefore, a novel evaluation framework for energy losses in the low voltage grids is developed in this thesis. First, a loss evaluation approach based on a comprehensive assessment of grid features and an advanced reference grid modeling scheme is proposed. Second, a new analytical indicator is introduced for fast estimation of the grid losses under the impact of the installed distributed generators. For distribution system operators, this new evaluation framework demonstrates a practical and technically validated solution, which can be used as an alternative method to the existing approaches regarding the loss evaluation. Applying this comprehensive evaluation framework for energy losses at a large scale can support grid operators to understand the origin of losses and further development trends. The technical progress of energy losses evaluation can greatly contribute to improve energy efficiency and sustainability of current distribution systems.

*kassel university press, ISBN 978-3-7376-0882-4, 146 Seiten
Energy Management and Power System Operation Vol 10
DOI: 10.17170/kobra-202008131566*

DR.-ING. MARKUS KRAICZY (e²n)

titel

**REACTIVE POWER GRID ADEQUACY STUDIES FOR DISTRIBUTION GRIDS
WITH HIGH DISTRIBUTED GENERATION**

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Martin Braun,
Universität Kassel

Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. Thomas Stetz,
Technische Hochschule Mittelhessen,
Elektrotechnik und Informationstechnik

Tag der Disputation: 11. Mai 2020



Markus Kraiczy

Zusammenfassung

Heutzutage können dezentrale Erzeugungsanlagen (DER) Blindleistung zur Spannungsstützung in Wechselstromnetzen bereitstellen. Neben der lokalen Spannungshaltung können DER auch zentrale Blindleistungssollwerte der Verteilnetzbetreiber umsetzen, wodurch zum Beispiel die Einhaltung von Blindleistungsvorgaben an der Übertragungs-/Verteilnetzschnittstelle (ÜNB/VNB-Schnittstelle) verbessert werden kann. Eine Herausforderung ist jedoch die Berücksichtigung der meist stark fluktuierenden Blindleistungsflexibilitätspotenziale der DER im Rahmen von Netzplanungsverfahren. Diese Studie zielt darauf ab, praktikable Netzplanungsverfahren für ein zentrales Blindleistungsmanagement an der ÜNB/VNB-Schnittstelle zu entwickeln, indem steuerbare Blindleistungsquellen auf der Verteilnetzebene, wie DER und Blindleistungskompensationsanlagen, genutzt werden. Die Studie wird für einen realen deutschen Verteilnetzgebiet mit sehr hoher dezentraler Erzeugungsleistung durchgeführt.

Summary

The study aims to develop practicable grid planning procedures for an advanced reactive power management at the transmission-distribution (T-D) interface by making use of controllable reactive power sources at the distribution level, like distributed energy resources (DER) and reactive power compensators. In Germany, also the high voltage level is mainly considered as a part of distribution grid, and the T-D interface is determined at the interface between high voltage and extra high voltage level. A predefined reactive power range at the T-D interface is considered and the term reactive power grid adequacy is subsequently used, to describe the compliance level of the distribution level with the predefined reactive power range at the T-D interface. For this reason, the applicability of common methods in (active power) grid adequacy studies on research questions in reactive power grid adequacy studies are analyzed and discussed. The reactive power grid adequacy study is performed for a real German distribution grid section with very high distributed generation.

kassel university press, ISBN 978-3-7376-0885-5, 235 Seiten
Energy Management and Power System Operation Vol 12
DOI: 10.17170/kobra-202011102116

DR.-ING. FABIAN NIEDERMEYER (e²n)

titel

PERFORMANCE ASSESSMENT OF RESIDENTIAL PV BATTERY SYSTEMS – DEVELOPMENT AND APPLICATION OF TEST PROCEDURES AND KEY PERFORMANCE INDICATORS

Fabian Niedermeyer



Zusammenfassung

Derzeit sind mehr als 120.000 Photovoltaik (PV)-Batteriesysteme in deutschen Haushalten in Betrieb. Sie unterscheiden sich in der Kopplung zwischen PV und Batterie, in den Nennkapazitäten ihrer Komponenten und in ihrem Integrationsgrad. In dieser Arbeit werden Methoden zur einheitlichen Bestimmung der Systemperformance entwickelt und evaluiert. Dazu werden wesentliche Einflüsse auf die Performance analysiert und daraus Anforderungen an die Testverfahren und Key Performance Indikatoren (KPIs) als finale Metriken der Systembewertung abgeleitet. Bereits diese Anforderungsanalyse zeigt, dass der Performancevergleich die Effizienz und Effektivität während des Systembetriebs umfassen muss. Da die Bewertung der Effektivität auf Basis anwendungsunabhängiger Untersuchungen nicht möglich ist, erweist sich eine anwendungsorientierte Bewertung als notwendig. Basierend auf diesen Erkenntnissen wird eine Methode vorgeschlagen, die einen Anwendungstest des Systembetriebs über mehrere Tage mit zusätzlichen anwendungsunabhängigen Untersuchungen kombiniert. Anhand der Ergebnisse des Anwendungstests werden zwei KPIs berechnet, nämlich: (i) die Effizienz als klassische Effizienzkennzahl und (ii) die Effektivität zur Bewertung der Regelung und des Energiemanagements des Systems. Diese Methode wird auf fünf verschiedene Prüflinge angewendet und ihre Vor- und Nachteile werden diskutiert. Es wird deutlich, dass die Methode alle Spezifikationen ausreichend adressiert und in Bezug auf die Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse und die Gültigkeit der KPIs von Vorteil ist.

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Martin Braun,
Universität Kassel

Zweitgutachter: Prof. Dr. rer. nat. Dirk Uwe Sauer,
RWTH Aachen

Tag der Disputation: 21. August 2020

Summary

Presently, more than 120,000 photovoltaic (PV) battery systems are operating in German households. They differ in the coupling between PV and battery, the nominal capacities of their components, and their degree of integration. This thesis develops and evaluates methods for uniform determination of PV battery system performance. Therefore, major influences on system performance are analysed and used to derive requirements regarding the test procedures and key performance indicators (KPIs) as final metrics of the system evaluation. Already this requirement analysis reveals that the performance comparison must cover the efficiency and effectiveness during system operation. As the assessment of effectiveness based on application-independent investigations is impossible, an application-oriented evaluation proves to be necessary. Based on these findings, a method that combines an application test of system operation during multiple days with additional application-independent investigations is proposed. By using the results of the application test, two KPIs are calculated, namely: (i) the efficiency as a classic performance figure and (ii) the effectiveness to evaluate control and energy management of the system. This method is applied to five different devices under test (DUT) and its advantages and drawbacks are discussed. The analysis reveals that the method does sufficiently address all specifications and is beneficial in terms of result comprehensibility and KPI validity.

DR.-ING. DOUGLAS PAPPIS (EVS)

Titel

SHORT CIRCUIT REQUIREMENTS OF POWER CONVERTERS BASED UPON WIDE-BANDGAP SEMICONDUCTORS

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Zacharias,
Universität Kassel

Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. M. Bakran,
Universität Bayreuth

Tag der Disputation: 01. September 2020



Douglas Pappis

Zusammenfassung

Bei der Entwicklung von Leistungselektronik ist die Bewertung und Vorhersage potenzieller Fehlerzustände an Halbleitern von entscheidender Bedeutung, um einen sicheren Betrieb und Zuverlässigkeit zu erreichen. Leistungshalbleiter auf Silizium (Si)-Basis wurden ausgiebig hinsichtlich ihrer Kurzschlussfestigkeit untersucht. Jüngste Verbesserungen bei Wide-Bandgap (WBG)-Halbleitern wie Siliziumkarbid (SiC) und Galliumnitrit (GaN) ermöglichen leistungselektronische Designs mit hervorragender Performance. Im Vergleich zu Si weisen SiC- und GaN-Leistungshalbleiter physikalisch kleinere Chipflächen, höhere maximale interne elektrische Felder und höhere Stromdichten auf. Neben einer Übersicht über verfügbare SC-Schutzmethoden wird auch untersucht, wie man das Auftreten von SC verhindern kann.

SC-Schutzmethoden werden vorgestellt. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass für beide Technologien eine ähnliche Leistung hinsichtlich des Ausfalls nach dem Abschalten (Runaway, Gate) erreicht wird. Abschließend wird die Kurzschlussfähigkeit von kommerziell erhältlichen 650-V-GaN-Bauelementen bewertet.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Bauelemente unter SC-Bedingungen mit höheren Drain-Source-Spannungen (über ca. 50 %) und nominalen Gate-Spannungen eine schlechte Leistung aufweisen.

Summary

In power electronics designs, the evaluation and prediction of potential fault conditions on semiconductors is essential for achieving safe operation and reliability. Silicon (Si) based power semiconductors have been extensively investigated with regards to their short circuit (SC) capability. Recent improvements on Wide-Bandgap (WBG) semiconductors such as Silicon Carbide (SiC) and Gallium nitrite (GaN) enable power electronic designs with outstanding performance. In comparison to Si, SiC and GaN power semiconductors physically present smaller chip areas, higher maximum internal electric fields, and higher current densities. An investigation towards how to prevent SC occurrences besides a review of available.

SC protection methods is presented. In summary, similar performance is achieved regarding failure after turn-off (runaway, gate) for both technologies. Finally, the short circuit capability of commercially available 650V GaN devices is assessed.

In summary, devices present poor performance under SC of higher drain-source voltages (above approximately 50%) and nominal gate voltage conditions.

DR.-ING. SEBASTIAN PFAFFEL (INES)

Titel

UNTERSTÜTZUNG DER BETRIEBSFÜHRUNG VON WINDENERGIEANLAGEN DURCH ZUVERLÄSSIGKEITS- UND PERFORMANCEBENCHMARKS MITTELS UNTERNEHMENSÜBERGREIFENDER ERFAHRUNGSDATENBANKEN

Sebastian Pfaffel



Zusammenfassung

Das 2017 eingeführte Ausschreibungsverfahren hat in der Windbranche zu erheblichem Druck auf die Stromgestehungskosten geführt. Erste Offshore-Windparks sind bereits ohne Förderung geplant. Gleichzeitig scheiden ab Januar 2021 einige tausend Windenergieanlagen aus der Einspeisevergütung aus. Die Gestehungskosten von Windstrom werden durch die Kosten für den Betrieb und die Instandhaltung der Anlagen sowie ihre Performance bestimmt. Beide Faktoren liegen in der Verantwortung der Betriebsführung. Deren tägliche Arbeit gilt es mit zuverlässigen und automatisierten Werkzeugen zu unterstützen.

In dieser Arbeit wird untersucht, wie unternehmensübergreifende Erfahrungsdatenbanken die tägliche Arbeit der Betriebsführung unterstützen können. Als Grundlage dient eine Einführung in das Wettbewerbsbenchmarking und dessen Umsetzung in der Windbranche. In Ermangelung einer einheitlichen Kennzahlensystematik wird diese in Zusammenarbeit mit einem Branchenverband erarbeitet. Hieran anknüpfend wird die Aussagekraft der Kennzahlen und ihre Sensitivität gegenüber verschiedenen Unsicherheitsursachen analysiert.

Als Kern der Arbeit werden eine kennzahlenbasierte Gesamtkritikalität, die monetäre Verfügbarkeit und ein Leistungskennlinien-Health-Value zur Bewertung des Handlungsbedarfs zur Performanceverbesserung an Windenergieanlagen und deren Priorisierung im Anlagenbestand implementiert und mit den Daten des WInD-Pool getestet. Alle drei Ansätze erweisen sich als vielversprechend und auch auf gemischte Anlagenbestände anwendbar. Wichtige Informationen können der Betriebsführung so aggregiert zur Verfügung gestellt werden und ermöglichen eine objektive und effiziente Priorisierung der Arbeiten.

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Kurt Rohrig,
Fraunhofer IEE

Zweitgutachter: Prof. Dr. rer. nat. Clemens Hoffmann,
Universität Kassel

Tag der Disputation: 27. Oktober 2020

Summary

Since Germany's introduction of wind power tenders in 2017, the levelised costs of energy have been under considerable pressure. First offshore wind farms are planned without subsidies. Starting in January 2021, feed-in tariffs for several thousand onshore wind turbines expire. Operational and maintenance costs of wind turbines and their performance drive the cost of wind power. Both factors are within the responsibility of technical managers who can be supported with reliable and automated tools.

This thesis investigates how cross-company knowledge databases can support operational managements' daily work. First, an introduction to competitive benchmarking and its implementation in the wind industry is provided. To date, no standardised set of KPIs and corresponding definitions are available. Thus, the thesis identifies these KPIs and definitions in cooperation with an industry association. The validity of the indicators and their sensitivities to various uncertainty causes are then analyzed.

To provide support to operational managers, KPIs are aggregated to develop a criticality metric. Additionally, the monetary-based availability and the power curve health value were evaluated. All three approaches proved to be promising to identify and prioritise low-performing wind turbines. Operational managers can be provided with aggregated information enabling an objective and efficient prioritisation of their work.

DR.-ING. PHILIPP HÄRTEL (INES)

titel

OFFSHORE GRIDS IN LOW-CARBON ENERGY SYSTEMS

Erstgutachter: Prof. Dr. rer. nat. Clemens Hoffmann,
Universität Kassel

Zweitgutachter: Prof. Dr. ing. Magnus Korpås
Norwegian University of Science Technology

Tag der Disputation: 24. November 2020



Philipp Härtel

Long-term transmission expansion planning in energy systems with cross-sectoral integration using decomposition algorithms and aggregation methods for large-scale optimisation problems

Zusammenfassung

Die vorliegende Dissertation demonstriert die elementare Bedeutung sektorenübergreifender Interaktionen in analytischen Frameworks zur Untersuchung ganzheitlicher Planungsprobleme für dekarbonisierte Energie- und Stromsysteme. Konkret wird ein neuer mathematischer Programmierungsansatz für sektorenintegrierte Energiesysteme entwickelt, der die Modellierung und Optimierung von Investitionsentscheidungen für Übertragungsnetze in treibhausgasneutralen Energieszenarien erlaubt. Neben der Verwendung verschiedener Aggregationsansätze wird gezeigt, dass die Ausnutzung der Problemstruktur mit regionalen und anlagenbezogenen Dekompositionsstufen eine neuartige Lösungsstrategie für die effiziente Optimierung der sonst praktisch unlösbar großen Probleminstanzen sein kann. Die Implementierung einer doppelt stabilisierten Bündelmethode erlaubt die Lösung der gemischt-ganzzahligen Probleme auf einer verteilten Rechenplattform und die Gewinnung hochwertiger primaler Lösungen. Die übergeordneten Forschungsziele adressiert diese Dissertation schließlich mit einer großräumigen sektorenübergreifenden Ausbauplanung und einer langfristigen grenzüberschreitenden Übertragungsnetzausbaustudie für das zukünftig integrierte europäische Energiesystem. Diese analysiert die Auswirkungen der Transportsektorflexibilität auf Investitionsentscheidungen eines Nordsee-Offshore-Netzes sowie deren Wohlfahrtsverteilungseffekte in den direkten und indirekten Nachbarländern. Es wird deutlich, dass integrierte Offshore-Netzinfrastruktur in dekarbonisierten Energieszenarien attraktiv bleibt, und dass die Bewertung der Nettowohlfahrtseffekte neue Strommarktteilnehmer einbeziehen muss. Durch die Abbildung wichtiger Gebotszonen in Europa offenbaren die Ergebnisse zudem, dass sektorenübergreifende Nachfrageangebote hybrider Technologiekombinationen entscheidend für die Preisbildung im zukünftigen Strommarkt sein können.

Summary

This dissertation demonstrates that analytical frameworks need to capture cross-sectoral interactions when analysing large-scale planning problems for low-carbon energy systems. Specifically, a mathematical programming framework is presented featuring a sector-integrated approach toward modelling and optimising transmission investment decisions in low-carbon energy scenarios. Furthermore, besides using aggregated modelling approaches, it is shown that exploiting optimisation problem structures with tailored decomposition stages represents a novel solution strategy to optimise the otherwise intractable large-scale problem instances. The proposed bundle method implementation efficiently solves the mixed-integer problems on a distributed computational platform and recovers high-quality primal solutions. Finally, this dissertation addresses two main research objectives with a large-scale cross-sectoral capacity expansion and long-term cross-border transmission expansion study for the future integrated European system showing the impact of transport sector flexibility on offshore grid investment decisions in the North Sea and the welfare distributional effects in direct and indirect neighbour countries. It is demonstrated that integrated offshore grid infrastructure remains attractive in low-carbon energy scenarios, and that welfare impact assessments need to incorporate new electricity market participants. By covering all major bidding zones in Europe, the results reveal cross-sectoral demand bidding of hybrid technologies crucial for the price formation in future low-carbon electricity markets.

Florian Schäfer



Zusammenfassung

Der zunehmende Anteil erneuerbarer Energiequellen im Stromsystem erfordert neue Planungsmethoden für das Verteilungsnetz. Einerseits müssen flexible betriebliche Maßnahmen in die Planung einbezogen werden. Andererseits müssen auch konventionelle Maßnahmen berücksichtigt werden. In dieser Dissertation wird eine Planungsmethode für vermaschte HS-Netze erarbeitet, die sowohl die betriebliche Flexibilität als auch konventionelle Planungsmaßnahmen über mehrere Jahre berücksichtigt. Das definierte Optimierungsproblem wird durch einen hybriden Optimierungsalgorithmus gelöst, der die Vorteile von heuristischen und mathematischen Programmieransätzen kombiniert. Eine Reduzierung des hohen Rechenaufwands von Zeitreihensimulationen wird durch mehrere Strategien erreicht, die in das open-source Tool pandapower integriert sind. Darüber hinaus werden mehrere Algorithmen des maschinellen Lernens zur schnellen Abschätzung von Knotenspannung sowie Leitungsauslastungen implementiert und verglichen. Das entwickelte hybride Optimierungsverfahren ist eine Kombination aus der Meta-Heuristik Iterated Local Search und einem linearen Optimierungsmodell. Diese Kombination erhöht die Konvergenz und reduziert gleichzeitig die Simulationszeit im Vergleich zu den bestehenden Methoden. Abschließend zeigen zwei Fallstudien die Anwendbarkeit des entwickelten Planungsverfahrens am Beispiel eines realen HS-Stromnetzmodells.

Erstgutachter:

Prof. Dr.-Ing. Martin Braun,
 Universität Kassel

Zweitgutachter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Lutz Hofmann,
 Leibniz Universität Hannover,
 Institut für Elektrische Energiesysteme
 Elektrische Energieversorgung

Tag der Disputation: 11. Dezember 2020

Summary

The increasing share of renewable energy sources in the power system necessitates new planning methods for power systems. On the one hand, flexible operational measures must be included in planning. On the other hand, conventional measures have to be considered. In this thesis, a multi-year planning strategy for meshed high voltage (HV) systems is proposed considering operational flexibility as well as conventional planning measures. The defined optimization problem is solved by a hybrid optimization algorithm combining the advantages of heuristic and mathematical programming approaches. A reduction of the high computational effort of time series simulations is achieved by several strategies, which are integrated into the open-source tool pandapower. Furthermore, several machine learning algorithms are compared. The developed hybrid optimization method is a combination of the Iterated Local Search metaheuristic and a linear optimization model. This combination increases convergence while reducing simulation time in comparison to the existing methods. Finally, two case studies show the applicability of the developed planning framework for a real HV power system model.

*kassel university press, ISBN 978-3-7376-0935-7, 227 Seiten
 Energy Management and Power System Operation Vol 13
 DOI: 10.17170/kobra-202101213009*





DOKUMENTATION

AKTUELLE ABSCHLUSSARBEITEN IN 2019 + 2020 | EVS

2019	Name	Titel	Betreuer
Bachelor	Alas, Ugur	Erweiterung eines Großsignalmessstandes für induktive Bauelemente	Zacharias, Pfeiffer
Bachelor	Armbröster, René	Vergleich und Bewertung von Leistungselektronischen Stellgliedern zur Vormagnetisierung von Drosseln	Zacharias, Fenske
Master	Bollbach, Markus	Untersuchung von Elektrolumineszenz-Erscheinungen in SiC-Leistungshalbleitern	Zacharias, Münch
Master	El Kerdi, Mahmoud	Bereitstellung des Vormagnetisierungsstroms in DC/DC Konvertern mit aktiver Vormagnetisierung	Zacharias, Pfeiffer
Master	Granford, Dayana	Realisierung eines CE-gerechten Solarwechselrichters mit Minimalaufwand an Bauteilen und Vergleich mit kommerziellen Solarwechselrichtern	Zacharias
Master	Hartmann, Steve	Potentialanalyse von aktiver Vormagnetisierung induktiver Bauelemente in einem bidirektionalen Sperrwandler	Zacharias, Pfeiffer
Master	Hintenberg, Niklas	Potentialanalyse von Aktiver Vormagnetisierung in transformatorlosen DC/DC-Konvertern	Zacharias, Pfeiffer
Master	Jenhani, Finas	Analyse einer wirksamen Platzierung eines EMV-Kondensators in Modulnähe	Zacharias, Saeidi
Master	Moradmand Jazi, Mehdi	Untersuchung von DC-Zwischenkreis-PP-Filmkondensatoren auf Teilentladungen	Zacharias, Mitze
Master	Nanneboina, Bala Krishna	Advanced Buck Converters for High PV Applications	Zacharias
Master	Pislugins, Vladislavs	TT-Konverter nach dem Dualthyristorprinzip	Zacharias
Bachelor	Präger, Kevin	Ansteuerung und Inbetriebnahme eines bidirektionalen 12-pulsigen dreiphasen Gleichstromwandlers	Zacharias, Facanha
Master	Rezaei, Maryam	Aufbau und Analyse eines 4-phasigen Tiefsetzstellers im „interleaved“ Betrieb	Zacharias
Bachelor	Schlummer, Mirko	Wirtschaftlichkeit von aktiver Vormagnetisierung in DC/DC-Konvertern	Zacharias, Pfeiffer
Master	Solano, Daniel	Untersuchung von DC-Zwischenkreis-PP-Filmkondensatoren auf Teilentladungen	Zacharias, Infineon Österreich

AKTUELLE ABSCHLUSSARBEITEN IN 2019 + 2020 | EVS

2019	Name	Titel	Betreuer
Master	Soueidan, Amal	Power Cycling Test für Micro-Transfer gedrucktes GaN-HEMT	Zacharias
Master	Tsague Guekeng, Clauvice	3-phasiges Schaltnetzteil mit interleaved arbeitenden Halbbrücken (2 kW)	Zacharias

2020	Name	Titel	Betreuer
Master	Ben Mefteh, Mohamed Amine	Ripple	Zacharias
Master	Djantio, Nadine	4-kanaliger Tiefsetzsteller im Interleaved Modus mit gekoppelten Speicherdrösseln	Zacharias
Master	Döring, Julian	Analyse der Verluste bei vormagnetisierbaren Induktivitäten	Zacharias, Küster
Bachelor	Eichel, Alexander	Untersuchung von DC-Zwischenkreis-PP-Filmkondensatoren auf Teilentladung	Zacharias, Münch
Projekt	Hammerschmidt, Kim	Zeitliche Nachwirkung von Vormagnetisierungen in Ferriten	Zacharias, Küster
Bachelor	Heßler, Paul	Degradierung von Kondensatoreigenschaften in gestaffelten Zwischenkreisen	Zacharias, Mitze
Bachelor	Kenne, Henri Oscar	Möglichkeiten des Einsatzes steuerbarer Transformatoren in Energieverteilnetzen	Zacharias
Master	Knapp, Florian	Erweiterung einer Filteranlage in Bezug auf Regelbarkeit und Betriebsführung mit Nachbildung eines Industrienetzes zur Validierung	Zacharias, Fenske
Bachelor	Qashlan, Ziyad	Vergleich verschiedener orthogonaler Vormagnetisierungsvarianten	Zacharias, Küster, Pfeiffer
Master	Rotolo, Marcel	Simulative Untersuchung eines bidirektionalen kombinierten Lade- und Antriebsumrichters für Elektrofahrzeuge	Zacharias
Bachelor	Schmiedeknecht, Catharina	Weiterentwicklung eines Messstandes zur automatisierten Vermessung magnetischer Bauteile	Zacharias, Küster
Master	Yotcha, Jean Eudes	Realisierung und Test eines steuerbaren Transformators	Zacharias

AKTUELLE ABSCHLUSSARBEITEN IN 2019 + 2020 | en

2019	Name	Titel	Betreuer
Master	Bölling, Christopher	Entwicklung und Anwendung effizienter Methoden im Kontext der zeitreihenbasierten Netzausbauplanung	Braun
Master	Dollichon, Julian	Heuristische Topologie- und Strukturoptimierung im städtischen Verteilnetz	Braun
Bachelor	Sanati Far, Luca	Abschätzung des Potenzials von Phasor-Measurement-Units für Verteilnetz-Monitoring	Braun
Projekt	Thiele, Jakob	Lastganganalyse in Niederspannungsnetzen im Hinblick auf die Entwicklung der Elektromobilität	Braun
Bachelor	Thiele, Jakob	Entwicklung von Ladestrategien für Elektrofahrzeuge aus Basis realer Lastgangdaten von Ortsnetzstationen	Braun
Bachelor	Tönges, Eric	Bemessung der Energieversorgungsqualität in elektrischen Verteilnetzen in Deutschland anhand eines gewichteten System Performance Indicators (SPI)	Braun
Master	Wang, Feiran	Comparison and Optimization of Current Controlled Inverter and Voltage Controlled Inverter Models	Braun

AKTUELLE ABSCHLUSSARBEITEN IN 2019 + 2020 | 

2020	Name	Titel	Betreuer
Master	Banze, Tobias	DaVe- Ein Softwaretool zur automatisierten Generierung von regional-spezifischen Stromnetzen, basierend auf Open Data	Braun
Projekt	El-Hawawsha, Aseel	Application of the Stochastic Optimization on Optimal Power Flow	Braun
Master	Fischer, Frank	Einspeisung von blauem Wasserstoff in eine Erdgaspipeline und die damit einhergehenden Auswirkungen auf ein dafür benötigtes CO2-Pipelinetz	Braun
Master	Jähner, Christian	Auswahl von Netznutzungsfällen aus Zeitreihen zur Netzausbauplanung im Hochspannungs-Verteilnetz	Braun
Master	Li, Jia	Modelling and Comparison of Current Limitation Approaches for Voltage Controlled Inverters	Braun
Bachelor	Mehte, Sebastian	Analyse und zeitreihenbasierte Auswertung von gemischten AC/DC-Systemen in unterschiedlichen Softwareumgebungen	Braun
Master	Stüber, Niklas	Evaluation und Einordnung einer neuen Methode zum Netzmonitoring anhand realer Niederspannungsnetze	Braun
Projekt	Warterkamp, Jan	Kommunikationstechnologien des Smart-Meter-Gateway und die Möglichkeit der Erbringung von Systemdienstleistungen Zukunftsfähige Topologien der leistungselektronischen Netzanbindung bei Ladevorgängen	Braun
Master	Wiemer, Jan	Wechselwirkungen zwischen Spitzenkappung und Freileitungsmonitoring in Netzplanung und Netzbetriebsführung	Braun

AKTUELLE ABSCHLUSSARBEITEN IN 2019 + 2020 | ANT

2019	Name	Titel	Betreuer
Master	Alsdorf, Kai Alexander	Untersuchung der mikroskopischen Degradationsphänomene von Metalloxid Varistoren mit Überprüfung der Aussagefähigkeit normativer Zustandskenngrößen	Claudi
Master	Bauernschmitt, Timo	Untersuchung der elektrischen Durchschlagfestigkeit von Polybutylenterephthalat unter dem Einfluss verschiedener Umgebungsbedingungen bei Gleichspannungsbelastung	Claudi, Zacharias
Bachelor	Culp, Niclas	Entwicklung eines standardisierten Prüfschemas zur Bewertung von Straßenleuchten	Claudi, Zacharias
Bachelor	Heid, Johannes	Kennlinienbasierte Untersuchung der elektrischen Degradation von Metalloxid-Varistoren	Claudi, Zacharias
Master	Jäger, Sebastian	Analyse von Spannungsqualitätsmessdaten mittels neuronaler Netze	Claudi, Sick
Bachelor	Lottis, Christian	Untersuchung von potentialfreien Signalisierungs- und Messmöglichkeiten in Basismodulen von Überspannungsschutzableitern	Claudi, Zacharias
Bachelor	Mölle, Bastian	Evaluation und Qualifizierung eines elektrischen Ersatzschaltbildes zur Charakterisierung des Verhaltens nichtlinearer feldsteuernder Isolierstoffe	Claudi, Zacharias
Bachelor	Schülbe, Philipp	Temperatureinfluss auf das elektrischen Verhalten nichtlinearer Isolierstoffe	Claudi, Zacharias
Master	Wehfritz, Alexander	Aufbau einer Testumgebung für UV-Kamerasysteme zur Koronadetektion mittels UV-LEDs	Claudi, Hilmer
Bachelor	Zuber, Daniel	Aufbau und Automatisierung eines Messstandes zur Untersuchung der Degradationsmechanismen von MO-Varistoren	Claudi, Zacharias

AKTUELLE ABSCHLUSSARBEITEN IN 2019 + 2020 | ~~ANX~~

2020	Name	Titel	Betreuer
Bachelor	Döring, Maximilian	Simulationstechnische Optimierung einer 3D-gedruckten Kabelmuffe hinsichtlich Baugröße, mechanischer Stabilität und elektrischer Parameter	Claudi, Zacharias
Bachelor	Hüther, Christian	Engstellen im Schmelzleiter - Analyse der Auswirkung auf das Überstrom-und Kurzschlussverhalten von Schmelzsicherungen	Claudi, Zacharias
Bachelor	Lipphardt, Jan	Erweiterte Qualifizierung einer neuen Messmethodik zur Aufnahme von Varistor-Kennlinien	Claudi, Zacharias
Bachelor	Puchinger, Hendrik	Methoden zur gezielten Auswertung und Darstellung von degradierten Varistorkennlinien	Claudi, Zacharias
Bachelor	Rund, Dominik	Validierung und Optimierung eines Hochspannungsprüfsystems zur elektrischen und thermischen Alterungsmessung von kapazitiven Prüfkörpern	Ziegler, Claudi
Bachelor	Stöcker, Nane	Untersuchung der Frequenzabhängigkeit der dielektrischen Eigenschaften von Silikongel unter dem Einfluss von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit	Claudi, Ziegler
Master	Weide, Manuel	Untersuchung der Änderung der elektrischen Eigenschaften von MOV Keramiken unter feuchter Wärme-Lagerung bei beschleunigter AC- und DC-Alterung	Claudi, Zacharias

AKTUELLE ABSCHLUSSARBEITEN IN 2019 + 2020 | ✓

2019	Name	Titel	Betreuer
Master	Asbaghi, Jihane	Entwurf eines robusten Reglers für einen netzbildenden Wechselrichter auf Basis eines LPV-Modells.	Hoffmann, Braun
Master	Breuer, Benedikt	Wirtschaftliche Potenziale für leistungsgemessene Verbraucher durch neue Geschäftsmodelle in der Energiewirtschaft	Hoffmann, Wetzel
Bachelor	Groß, Fabian	Konzeptionelles Design eines hybriden Ruderboots mit Fokus auf die Elektronik	Rebholz, Hoffmann
Master	Haus, Annika	Akzeptanz gegenüber der Energiewende in Deutschland: Eine empirische Untersuchung	Ernst, Hoffmann
Master	Nanfah Nguemnag, Adrien Paul	Entwicklung der Firmware und Inbetriebnahme einer PFC-Einheit (Vienna Brücke)	Hoffmann, Börcsök
Master	Plaisir, Marie	Techno-ökonomische Analyse von Power-to-Gas als Flexibilitätsoption	Hoffmann, Hahn
Bachelor	Plümacher, Niklas	Auslegung einer Energieversorgung für steuerungs- und leistungselektronische Komponenten zur Anbindung von zweiachsigen Aktoren an Turbinenprüfständen	Hoffmann, Krebs
Bachelor	Quiring, Alexander	Planung und Umsetzung eines Sicherheitskonzepts für ein Leistungs-halbleiter-Testsystem	Hoffmann, Callies
Master	Schmitz, Richard	Analyse der Auswirkungen unterschiedlicher Detailgrade in einem Kraftwerkseinsatzmodell	Hoffmann, Rohrig
Master	Simo, Franck Joel	Betriebsführung, Steuerung und Regelung eines hybriden Wasserfahrzeugs: das e-Rowboat	Böcker, Hoffmann
Master	Varan, Hasret	Die Marktchancen netzstellender Wechselrichter zur Bereitstellung der Momentanreserve und Spannungshaltung	Hoffmann, Rohrig

AKTUELLE ABSCHLUSSARBEITEN IN 2019 + 2020 | ✓

2020	Name	Titel	Betreuer
Master	Anwarzai, Tarek	Untersuchung von Entwicklungspfaden zur Dekarbonisierung des deutschen Gebäudewärmesektors bis 2050	Hoffmann, Maas
Master	Banze, Tobias	DaVe - Ein Softwaretool zur automatisierten Generierung von regional-spezifischen Stromnetzen, basierend auf Open Data	Braun, Hoffmann
Master	Dittmann, Alexander	Untersuchung der Auswirkungen parametrischer Unsicherheiten auf die Ausbauoptimierung eines 100% erneuerbaren, deutschen Energiesystems im Jahre 2050: Methodik und Anwendung einer globalen Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalyse	Hoffmann, Bradke
Master	Eschmann, Jonas	Makroökonomische Folgewirkungen dekarbonisierter Containerschiff-fahrt - Spezifische Kosten und Preiseffekte am Beispiel Europas	Hoffmann, Rohrig
Master	Melcher, Nils	Der strömungsmechanische Einfluss von Wasserstoff auf das Erd-gastransportsystem	Hoffmann, Luke
Master	Modi, Jay	Konzeptionelles Design und Analyse eines Getriebes für ein e-Ruder-boot	Lindner, Hoffmann
Master	Nasr Esfahani, Mehdi	Die Bewertung einer Methodik zur Auslegung von dezentralen Meer-wasserentsalzungsanlagen auf Basis hybrider erneuerbarer Energien	Hoffmann, Rohrig
Master	Stracke, Daniel	Auslegung und Realisierung eines SiC-basierten Vierleiter-Stromrichters für Inselnetze	Hoffmann, Meinhardt
Master	Wiemer, Jan	Wechselwirkungen zwischen Spitzenkappung und Freileitungsmonito-ring in Netzplanung und Netzbetriebsführung	Braun, Hoffmann

PUBLIKATIONEN 2019 / 2020

Autoren	Titel	Konferenz	Jahr
Konferenzbeiträge EVS			EVS
Aganza-Torres, A.; Pfeiffer, J.; Zacharias, P.	Interleaved Buck Converter with Coupled Inductors as Auxiliary Bias-Current Source for Controllable Magnetic Devices	PCIM Europe, Nürnberg	2020
Eichhorst, D.; Pfeiffer, J.; Zacharias, P.	Weight reduction of DC/DC converters using controllable inductors	PCIM Europe	2019
Granford, D.; Zacharias, P.	Miniature Inverter for Feeding into the Grid at Low Power with Minimum Number of Components	NEIS	2019
Nazeri; Zacharias, P.; Ibanez, F. M.; Somkun, S.	Design of Proportional-Resonant Controller with Zero Steady-State Error for a Single-Phase Grid-Connected Voltage Source Inverter with an LCL Output Filter	IEEE Milan PowerTech	2019
de Oliveira, E. F.; Zacharias, P.	A modified 12-Pulse Three-Phase Bidirectional Dual Active Bridge DC/DC Converter for E-Vehicles Applications	PCIM Europe	2019
de Oliveira, E. F.; Zacharias, P.	Comprehensive Mode Analysis and Optimal Design Methodology of a Bidirectional CLLC Resonant Converter for E-Vehicles Application	EPE ECCE Europe	2019
Facanha de Oliveira, E.; Sprunck, S.; Pfeiffer, J.; Zacharias, P.	A GaN-based DC/DC converter for e-vehicles applications	EPE ECCE Europe. Lyon, Frankreich	2020
Pfeiffer, J.; Küster, P.; Erenler, Y.; Quashlan, Z.; Zacharias, P.	Impact of implementation of auxiliary bias-windings on controllable inductors for power electr. converters	EPE ECCE Europe. Lyon, Frankreich	2020
Pfeiffer, J.; Küster, P.; Schulz, I.; Friebel, J.; Zacharias, P.	Review of flux interaction of differnly aligned magnetisc fields in inductors and transformers	Open Access Publikation, IEEE Access	2020
Sprunck, S.; Mitze, R.; Nöding, C.; Zacharias, P.	Thermal Conductivity Measurement Setup for Pad and Paste Thermal Interface Materials	PCIM Europe, Nürnberg	2020
Sprunck, S.; Muench, M.; Zacharias, P.	Transient Current Sensors for Wide Band Gap Semiconductor Switching Loss Measurements	PCIM Europe	2019
Will, L.; Sprunck, S.; Zacharias, P.	Impact of Negative Turn-Off Voltage On Turn-On Losses in GaN E-HEMTs	PCIM Europe, Nürnberg	2020
Yu, X.; de Oliveira, E. F.; Zacharias, P.	Optimal Design Methodology of a Bidirectional Three-Phase CLLC Resonant Converter using Computer-Based Circuit Simulation	PCIM Europe	2019
Zacharias, P.; Aganza-Torres, A.; Münch, M.	Direct Harmonic Compensation for Grid-Connected DC/AC Converter	NEIS, Hamburg	2020

PUBLIKATIONEN 2019 / 2020

Autoren	Titel	Konferenz	Jahr
Konferenzbeiträge EVS			EVS
Zacharias, P.; Aganza-Torres, A.	Comparison and optimization of magnetically coupled and non-coupled magnetic devices in interleaved operation	EPE ECCE Europe. Lyon, Frankreich	2020

Autoren	Titel	Konferenz	Jahr
Konferenzbeiträge e²n			
Banerjee, G.; Klingmann, A.; Valov, M.; Lafferte, D.; Hachmann, C. & Braun, M.	Protection and Dynamic Analysis during Bottom-Up Restoration Process in MV/LV Microgrids	IEEE Sest 2019 – 2 nd International Conference on Smart Energy System and Technologies, Porto	2019
Bolgaryn, R.; Scheidler, A.; Dasenbrock, J. & Braun, M.	Automated Planning of High-Voltage Grids for DER Integration Studies Results of a Study for the German State of Hesse	Cired 2019, Madrid	2019
Bolgaryn, R.; Scheidler, A. ; Braun, M.	Combined Planning of Medium and Low Voltage Grids	IEEE 2019 Powertech, Milan	2019
Braun, M.; Marten, F.; Berg, S. W.-v.; Hammermeister, I.; Kraiczy, M.	Round Table No 4 DSO/TSO Interactions	Cired 2019, Madrid	2019
Braun, M.	Interplan EU-SYSFLEX	2019 IEEE PES General Meeting, Atlanta	2019
Dipp, M.; Menke, J.-H.; Berg, S. W.-v.; Maurus, A.; Kerber, T.; Braun, M.	Monitoring in der Mittelspannungsebene mit Künstlichen Neuronalen Netzen – Eine Validierung der Methodik auf Basis von gemessenen Ortsnetzstationen	16. Symposium Energieinnovation	2020
Dipp, M.; Menke, J.-H.; Berg, S. W.-v.; Braun, M.	Training of Artificial Neural Networks Based on Feed-in Time Series of Photovoltaik and Wind Power for active and Reactive Power Monitoring in Medium-Voltage Grid	INFORMATIK 2019, Kassel	2019
Hachmann, C.; Becker, H.; Haack, J. & Braun, M.	Improving the Resilience of Power System Operation – Contribution of Renewable Energies in Power System Restoration	Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems NEIS 2019, Hamburg	2019
Hammermeister, I.; Liu, Z.; Maurus, A.; Rogg, N.; Kerber, T.; Schwaegerl, P.; Braun, M.	Co-Simulation zur Vorabanalyse eines netzbetreiberübergreifenden Blindleistungsmanagements im Verteilnetz	16. Symposium Energieinnovation, Graz, Österreich, Februar 12–14	2020
Harms, Y.; Meinecke, S.; Stock, D. S.; Braun, M.	Verlustminimierung in gekoppelten HS/HS-Netzen unter Nutzung einer mathematischen Optimierung	16. Symposium Energieinnovation in Graz	2020

PUBLIKATIONEN 2019 / 2020

Autoren	Titel	Konferenz	Jahr
Konferenzbeiträge e²n			
Jäger-Waldau, A.; Adinolfi, G; Batlle, A; Braun, M; Bucher, C; Detollenaefer, A; Frederiksen, K. H.B.; Graditi, G; Guerrero Lemus, G; Lindahl, J; Heilscher, G; Kraiczy, M; Masson, G; Mather, B; Mayr, C; Moneta, D; Mugnier, D; Nikoletatos, J; Neubourg, G; Platt, G; Roberts, M. B.	Self-consumption of electricity produced with photovoltaic systems in apartment buildings – Update of the situation in various IEA PVPS countries	IEEE PVSC 47, Virtual Meeting	2020
Jaeger-Waldau, A.; Adinolfi, G.; Battle, A.; Braun, M.; Bucher, C.; Detollenaefer, A.; Frederiksen, K. H.B.; Graditi, G.; Lemus, R. G.; Lindahl, J.; Heilscher, G.; Kraiczy, M.; Masson, G.; Mather, B.; Mayr, C.; Moneta, D.; Nikoletatos, D. M. J.; Neuborg, G.; Platt, G. & Roberts, M. B.	Electricity produced from photovoltaic systems in apartment buildings and self-consumption - Comparison of the situation in various IEA PVPS countries	IEEE PVSC46, Chicago	2019
Liu, Z.; Berg, S. W.-v.; Banerjee, G.; Bornhorst, N.; Maurus, A.; Kerber, T. & Braun, M.	Adaptives statistisches Netzäquivalent mit künstlichen neuronalen Netzen	16. Symposium Energieinnovation	2020
Liu, Z.; Bornhorst, N.; Wende-von Berg, S.; Braun, M.	A Grid Equivalent Based on Artificial Neural Networks in Power Systems with High Penetration of Distributed Generation with Reactive Power Control	NEIS 2020 – Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage, Hamburg	2020
Marinelli, M.; et al.	Electric Vehicles Demonstration Projects – An Overview Across Europe	55 th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Torino, Italy, 2020	2020
Meinecke, S.; Klettke, A.; Sarajlic, D.; Dickert, J.; Hable, M.; Fischer, F.; Braun, M.; Moser, A. & Rehtanz, C.	General planning and operational principles in german distribution	Cired 2019, Madrid	2019
Schaefer, F.; Menke, J. H. & Braun, M.	Comparing Regression and Classification Methods to Approximate Power Flow Results	XXI Power Systems Computation Conference, Porto, Portugal	2020
Schaefer, F.; Menke, J.-H. & Braun, M.	Prediction of Power Flow Results in Time-series-based Planning with Artificial Neural Networks and Data Pre-Processing	CIRE 2020, Berlin	2020
Schaefer, F.; Menke, J.-H. & Braun., M.	Comparison of Meta-Heuristics for the Planning of Meshed Power Systems	IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)	2020
Schaefer, F.; Menke, J.-H.; Marten, F. & Braun, M.	Time series based power system planning including storage systems and curtailment strategies	CIRE 2019, Madrid	2019

PUBLIKATIONEN 2019 / 2020

Autoren	Titel	Konferenz	Jahr
Konferenzbeiträge e²n			
Schaefer, F.; Scharf, M. & Braun, M.	Comparison of electrical storage system operations within a framework for time-series-based power system planning	Internationaler ETG-Kongress 2019, Esslingen	2019
Spalthoff, C.; Sarajilic, D.; Kittl, C.; Drauz, S. R.; Kneiske, T. M.; Rehtanz, C. & Braun, M.	SimBench: Open source time series of power load, storage and generation for the simulation of electrical distribution grids	Internationaler ETG-Kongress 2019, Esslingen	2019
Vogt, M.; Marten, F.; Montoya, J.; Toebermann, J. C.; Braun, M.	A REST based co-simulation interface for distributed simulations	IEEE 2019 Powertech Milan, Mailand	2019
Wenderoth, F.; Toebermann, J. C. & Braun, M.	Retrospective Optimal Power Flow for Low Discriminating Active Power Curtailment	IEEE 2019 Powertech Milan, Mailand	2019
Yang, C.; Liu, Z. & Braun, M.	Performance Analysis of Reactive Power Control Mode of Distributed Generation in Power System	Power and Energy Student Summit PESS 2020, Darmstadt	2020
Autoren	Titel	Journal / Zeitschrift	Jahr
Beiträge in wissenschaftlichen Journals / Fachzeitschriften e²n			
Appen, J. V. & Braun, M.	Sizing and Improved Grid Integration of Residential PV Systems With Heat Pumps and Battery Storage System	IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 34, pp. 562-571, doi: 10.1109/TEC.2019.2892396	2019
Braun M.; Hachmann, C.; Haack, J.	Blackouts, Restoration, and Islanding: A System Resilience Perspective	IEEE Power and Energy Magazine, vol. 18, no. 4, pp. 54-63, doi: 10.1109/MP.2020.2986659.	2020
Hachmann, C.; Lammert, G.; Hamann, L. & Braun, M.	Cold Load Pickup Model Parameters Based on Measurements in Distribution Systems	IET Generation Transmission & Distribution, Vol. 13, pp. 5387-5395	2019
Kaempf, E.; Ernst, B. & Braun, M.	Competitive cross-voltage level procurement of reactive power considering reliable capacity from wind and photovoltaics	WIREs Energy and Environment, Vol. 8, pp. 15.	2019
Kisse, J. M.; Braun, M.; Letzgus, S. & Kneiske, T. M.	A GIS-Based Planning Approach for Urban Power and Natural Gas Distribution Grids with Different Heat Pump Scenarios	Energies, Vol. 13, pp. 4052	2020
Klaes, M.; Narayan, A.; Patil, A. D.; Haack, J.; Braun, M.; De Meer, H.; Rehtanz, C.; Lehnhoff, S.; Lindner, M.	State Description of Cyber-Physical Energy Systems Energy Informatics	Springer Science and Business Media LLC, no. 3, DOI: 10.1186/s42162-020-00119-3	2020

PUBLIKATIONEN 2019 / 2020

Autoren	Titel	Journal / Zeitschrift	Jahr
Beiträge in wissenschaftlichen Journals / Fachzeitschriften e²n			
Lohmeier, D.; Cronbach, D.; Drauz, S.R.; Braun, M.; Kneiske, T. M.	Pandapipes: An Open-Source Piping Grid Calculation Package for Multi-Energy Grid Simulations	Sustainability 12, no. 23 pp. 9899.	2020
Ma, C.; Dasenbrock, J.; Toebermann, J.-C. & Braun, M.	A novel indicator for evaluation of the impact of distributed generations on the energy losses of low voltage distribution grids	Elsevier Applied Energy, pp. 674-683	2019
Ma, C.; Menke, J. H.; Dasenbrock, J.; Braun, M.; Haslbeck, M. & Schmid, K.-H.	Evaluation of energy losses in low voltage distribution grids with high penetration of distributed generation	Elsevier Applied Energy, Vol. 256	2019
Meinecke, S.; Sarajitic, D.; Drauz, S.; Klettke, A.; Lauven, L.; Rehtanz, C.; Moser, A. & Braun, M.	SimBench – A Benchmark Dataset of Electric Power Systems to Compare Innovative Solutions based on Power Flow Analysis	MDPI Energies, Vol. 13, pp. 3290.	2020
Meinecke, S.; Thurner, T.; Braun, M.	Review of Steady-State Electric Power Distribution System Datasets	Energies 2020, Vol. 13, pp. 4826	2020
Menke, J.-H.; Bornhorst, N. & Braun, M.	Distribution System Monitoring for Smart Power Grids with Distributed Generation Using Artificial Neural Networks	Elsevier International Journal of Electrical Power & Energy Systems , Vol. 113 , pp. 472-480	2019
Niedermeyer, F.; Braun, M.	Comparison of Performance-Assessment Methods for Residential PV Battery Systems	Energies 2020, no. 13, pp. 5529, DOI: 10.3390/en13215529	2020
Patil, A. D.; Haack, J.; Braun, M. & De Meer, H.	Modeling interconnected ICT and power systems for resilience analysis	Energy Informatics, Springer Science and Business Media LLC, no. 3, DOI: 10.1186/s42162-020-00120-w	2020
Requardt, B.; Wende-von Berg, S; Braun, M.	Secure and Performant Handling CIM-Based Data Streams in Control Room Software Interaction for Multi Vendor Solutions	Intelligent Information Management, no. 12, pp. 43-62. doi: 10.4236/iim.2020.121004.	2020
Schaefer, F.; Braun, M.	Multi-Year High-Voltage Power System Planning Considering Active Power Curtailment	Energies 2020, no. 13, pp. 4920.	2020
Schaefer, F.; Menke, J.-H. & Braun, M.	Evaluating Machine Learning Models for the Fast Identification of Contingency Cases	IET Generation, Transmission & Distribution	2020
Schaefer, F.; Scheidler, A. & Braun, M.	A Hybrid Optimization Method Combining Network Expansion Planning and Switching State Optimization	IEEE Open Access Journal of Power and Energy, Vol. 7, pp. 234-242	2020

PUBLIKATIONEN 2019 / 2020

Autoren	Titel	Journal / Zeitschrift	Jahr
Beiträge in wissenschaftlichen Journals / Fachzeitschriften e²n			
Then, D.; Hein, P.; Kneiske, T. M.; Braun, M.	Analysis of Dependencies between Gas and Electricity Distribution Grid Planning and Building Energy Retrofit Decisions	Sustainability 2020, no. 12, pp. 5315.	2020
Then, D.; Spalthoff, C.; Bauer, J.; Kneiske, T. M.; Braun, M.	Impact of Natural Gas Distribution Network Structure and Operator Strategies on Grid Economy in Face of Decreasing Demand	Energies 2020, no. 13, pp. 664.	2020
Wenderoth, F.; Drayer, E.; Schmoll, R.; Niedermeier, M. & Braun, M.	Architectural and functional classification of smart grid solutions	Energy Informatic, Vol. 2, pp. 33.	2019

Autoren	Titel	Bücher / Buchbeiträge	Jahr
Bücher und Buchbeiträge e²n			
Kraiczy, M.	Reactive power grid adequacy studies for distribution grids with high distributed generation	kassel university press, ISBN 978-3-7376-0885-5, 235 Seiten, In: Braun, M.; (Hrsg.) Energy Management and Power System Operation Vol 12, DOI: 10.17170/kobra-202011102116	2020
Ma, C.	A novel evaluation framework for energy losses in low voltage distribution grids	kassel university press, ISBN 978-3-7376-0882-4, 146 Seiten, In: Braun, M.; (Hrsg.) Energy Management and Power System Operation Vol 10, DOI: 10.17170/kobra-202008131566	2020
Menke, J.-H.	A Comprehensive Approach to Implement Monitoring and State Estimation in Distribution Grids with a Low Number of Measurements	kassel university press, ISBN 978-3-7376-0872-5, 193 Seiten, In: Braun, M.; (Hrsg.) Energy Management and Power System Operation Vol 11, DOI: 10.17170/kobra-202007291503	2020
Schäfer, F.	Multi-Year Time-Series-Based Power System Planning with Hybrid Optimization and Supervised Learning Methods	kassel university press, ISBN 978-3-7376-0935-7, 227 Seiten, In: Braun, M.; (Hrsg.) Energy Management and Power System Operation Vol 13, DOI: 10.17170/kobra-202101213009	2020

PUBLIKATIONEN 2019 / 2020

Autoren	Titel	Bücher / Buchbeiträge	Jahr
Bücher und Buchbeiträge e²n			
Lammert, G.	Modelling, Control and Stability Analysis of Photovoltaic Systems in Power System Dynamic Studies	kassel university press, ISBN 978-3-7376-0885-5, 235 Seiten, In: Braun, M.; (Hrsg.) Energy Management and Power System Operation Vol 12, DOI: 10.17170/kobra-202011102116	2019
Menke J.H.; Dipp M.; Liu Z.; Ma C.; Schäfer F.; Braun M.	Applications of Artificial Neural Networks in the Context of Power Systems	Sayed-Mouchaweh M. (eds) Artificial Intelligence Techniques for a Scalable Energy Transition. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-42726-9_13	2020

Autoren	Titel	Konferenz	Jahr
Konferenzbeiträge AHT			
T. Raulf; A. Claudi	Evaluation of SDR-receivers for the Detection and Localization of Radio Interferences caused by Corona on Overhead Lines	Proceedings of the 21 st International Symposium on High Voltage Engineering, Budapest, Hungary, August	2019
S. Jörres; A. Claudi; G. Finis; M. Wetter	Condition Monitoring of Surge Protective Devices by Measuring the Magnetic Field of Discharge Currents in Power Distribution Systems	CIRE 2019 Conference, Madrid, Spain	2019
T. Raulf; A. Claudi; R. Zander; C. Fuchs	Evaluation of a Charged Coupled Device Camera for the Detection of Ultraviolet Emissions by Corona Discharges	Proceedings of the 21 st International Symposium on High Voltage Engineering, Budapest, Hungary, August 2019	2019
M. Wetter; G. Finis; C. Sander; S. Jörres	Smart IoT Monitoring System for Surge Protective Devices (SPDs)	11 th Asia-Pacific International Conference on Lightning (APL), Hong Kong, China.	2019
S. Jörres; A. Claudi; G. Finis	Verification of the Aging Impact of MOV Ceramics by Recording Wide-Range V/I Characteristics	Proceedings of the 21 st International Symposium on High Voltage Engineering, Budapest, Hungary, August 2019	2019
S. Jörres; A. Claudi; M. Wetter; G. Finis; C. Sander	Cloud-Based Monitoring for SPDs using Advanced Measuring Methods for Lightning Disturbance	11 th Asia-Pacific International Conference on Lightning (APL)	2019

PUBLIKATIONEN 2019 / 2020

Autoren	Titel	Konferenz	Jahr
Konferenzbeiträge AHT 			
S. Wels; J. Lambrecht; J. Bauer; A. Claudi	Silicone Gel Compounds for Non-Linear Stress Grading Electrical Aspects	Conference on Silicon Insulation, July 2019, Burghausen, Germany	2019
S. Wels; J. Lambrecht; J. Bauer; A. Claudi	Silicone Gel Compounds with Non-Linear Stress Grading for Medium Voltage Applications	Proceedings of the 21 st International Symposium on High Voltage Engineering, Budapest, Hungary, August 2019	2019
S. Wels; A. Claudi; B. Böttge; R. Bernhardt; S. Klengel	Dielectric Strength and Aging Performance of Polybutylene Terephthalate (PBT) under the Influence of Temperature and Humidity	Proceedings of the 21 st International Symposium on High Voltage Engineering, Budapest, Hungary, August 2019	2019
S. Wels; J. Bauer; J. Lambrecht; A. Claudi	Silicone Gel Compounds with Non-Linear Stress Grading	26 th Nordic Insulation Symposium on Materials, Components and Diagnostics	2019
S. Jörres	Methoden zur kennlinienbasierten Zustandsüberwachung von Metallocid-Varistoren	Dissertation, Shaker Verlag, ISBN 978-3-8440-7416-1	2020

Autoren	Titel	Konferenz	Jahr
Konferenzbeiträge INES 			
Do, T.; Hoffmann, C.	Estimation of the Future Electricity Price Surcharge for the Integration of Wind and Solar Power into the Vietnamese Electricity System	Asia Power and Energy Engineering Conference	2019
Nacken, L.; Krebs, F.; Fischer, T.; Hoffmann, C.	Integrated renewable energy systems for Germany – A model-based exploration of the decision space	16 th International Conference on the European Energy Market (EEM)	2019
Prasanna, A.; Holzhauer, S.; Krebs, F.	Overview of machine learning and data-driven methods in agent-based modeling of energy markets.	INFORMATIK 2019	2019

PUBLIKATIONEN 2019 / 2020

Autoren	Titel	Konferenz	Jahr
Konferenzbeiträge INES			
Gaeglitz, P.; Ulfers, J.; Thomsen, G.; Frischmuth, F.; Geiger, D.; Bonin, M.; Horst, D.; Scheidler, A.	Modeling spatial and temporal charging demands for electric vehicles for scenarios with an increasing share of renewable energies.	EGU General Assembly 2020	2020
Holzhauer, S.; Krebs, F.; Nölle, C.	Simulating a Direct Energy Market: Products, Performance, and Social Influence.	Advances in Social Simulation 2015	2020
Holzhauer, S.; Krebs, F.; Schön, A.; Braun, M.	Using Prosumer Flexibility through a Direct Energy Market	NEIS 2020 – Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems Hamburg, 14 – 15 September 2020	2020
Kocheril, G.; Krebs, F.; Nacken, L.; Holzhauer, S.	Open and Integrative Modelling in Energy System Transitions - Conceptual Discussion about Model Reusability, Framework Requirements and Features	Social Simulation Conference 2019	2020

Autoren	Titel	Journal / Zeitschrift	Jahr
Beiträge in wissenschaftlichen Journals / Fachzeitschriften INES			
Rohrig, K.; Berkhout, V.; Callies, D.; Durstewitz, M.; Faulstich, S.B.; Hahn, B.K.M.; Jung, M.; Pauscher, L.; Seibel, A.; Shan, M.; Siefert, M.; Steffen, J.; Collmann, M.; Czichon, S.; Dörenkämper, M.; Gottschall, J.; Lange, B.; Lange, Beate; Ruhle, A.; Sayer, F.; Stoevesandt, B.; Wenske, J.	Powering the 21 st century by wind energy – Options, facts, figures	Applied Physics Reviews	2019
Wagner, J.; Gerz, T.; Wildmann, N.; Gramitzky, K.	Long-term simulation of the boundary layer flow over the double-ridge site during the Perdigão 2017 field campaign	NEIS 2020 – Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems	2019
Gaeglitz, P.; Schicketanz, S.; Pape, C.	Nature conservation as a driver in wind energy scenarios	Energy, Sustainability and Society	2020
Basse, A.; Pauscher, L.; Callies, D.	Improving Vertical Wind Speed Extrapolation Using Short-Term Lidar Measurements	Remote Sensing	2020
Do, T.; Hoffmann, C.	A power development planning for Vietnam under the CO ₂ emission reduction targets	Energy Reports	2020

MITARBEITERINNEN UND MITARBEITER

MITARBEITER DES KDEE/EVS/e²n/AHT/INES

Leitung EVS



**Prof. Dr.-Ing. habil.
Peter Zacharias (EVS)**
Tel.: 0561 804 6344
peter.zacharias@uni-kassel.de

Leitung e²n



**Prof. Dr.-Ing.
Martin Braun (e²n)**
Tel.: 0561 804 6202
martin.braun@uni-kassel.de

Leitung AHT



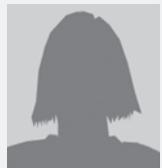
bis Ende März 2020
Prof. Dr.-Ing. Albert Claudi (AHT)
Tel.: 0561 804 6390
aclaudi@uni-kassel.de

Leitung INES



**Prof. Dr. rer. nat.
Clemens Hoffmann (INES)**
Tel.: 0561 804 6344
clemens.hoffmann@uni-kassel.de

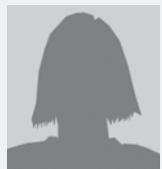
Sekretariate



Frau Anja Clark-Carina (EVS)
Tel.: 0561 804 6344
sekretariat.evs@uni-kassel.de



Frau Kristina Torno (e²n)
Tel.: 0561 804 6201
kristina.torno@uni-kassel.de



Frau Svitlana Dippel (AHT)
Tel.: 0561 804 6420
sdippel@uni-kassel.de



Frau Annette Petrat (INES)
Tel.: 0561 804 6182
annette.petrat@uni-kassel.de

Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter



Dr.-Ing. Alejandro Aganza Torres (EVS)
Tel.: 0561 804 6404
alejandro.aganza@uni-kassel.de



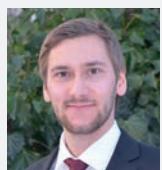
Simon Ruben Drauz, M.Sc. (e²n)
Tel.: 0561 7294-383
uk077872@uni-kassel.de



Gourab Banerjee, M.Sc. (e²n)
Tel.: 0561 804 6217
gourab.banerjee@uni-kassel.de



Dr.-Ing. Daniel Duckwitz (e²n)
Teamleiter
Tel.: 0561 804 6653
daniel.duckwitz@uni-kassel.de



Alexander Basse, M.Sc. (INES)
Tel.: 0561 804 6169
alexander.basse@uni-kassel.de



Marcel Ernst, M.Sc. (e²n)
Tel.: 0561 804 6180
marcel.ernst@uni-kassel.de



Techn. Volker Berge (EVS)
Tel.: 0561 804 6524
vberge@uni-kassel.de



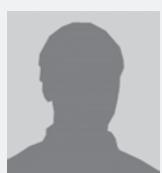
Eduardo Facanha de Oliveira, M.Eng. (EVS)
bis 2020



Dr.-Ing. Nils Bornhorst (e²n)
Teamleiter
Tel.: 0561 804 6381
nils.bornhorst@uni-kassel.de



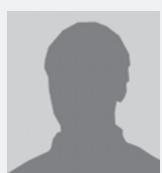
Marc Faßhauer, M.Sc. (EVS)
bis 2020



Henrik Brockhaus, M.Sc. (AHT)
bis Ende März 2020



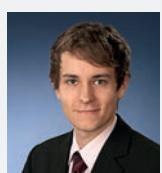
Dipl.-Ing. Florian Fenske (EVS)
bis 2020



Dr.-Ing. Doron Callies (INES)
Teamleiter
doron.callies@iee.fraunhofer.de



Dr.-Ing. Dirk Fetzer (e²n)
bis 2020



Marcel Dipp, M.Sc. (e²n)
Tel.: 0561 804 6432
marcel.dipp@uni-kassel.de



Kai Fischbach, M.Sc. (e²n)
Tel.: 0561 804 6221
kai.fischbach@uni-kassel.de



Hiep Do Thi, MBA, B.Sc. (INES)
Tel.: 0561 804 6227
hiepdt@student.uni-kassel.de



Gabriela Freitas Gomez, B.Sc. (EVS)
bis 2020

MITARBEITER DES KDEE/EVS/e²n/AHT/INES

Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter



Philip Gauglitz, M.Sc. (INES)
philip.gauglitz@uni-kassel.de



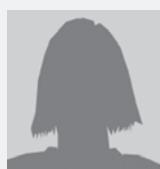
Dipl.-Ing. Geo Kocheril (INES)
Tel.: 0561 804 6103
Geo.kocheril@uni-kassel.de



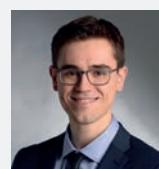
Shankho Gosh, M.Sc. (e²n)
shankho.ghosh@uni-kassel.de



Dr. phil. Friedrich Krebs (INES)
Stellvertretende Fachgebietsleitung INES
Tel.: 0561 804 6141
fkrebs@uni-kassel.de



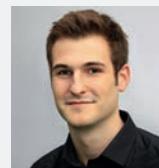
Kira Gramitzky, M.Sc. (INES)
kira.gramitzky@uni-kassel.de



Alexander Klingmann, M.Sc. (e²n)
bis 2020



Dipl.-Ing. Bernd Gruß (e²n)
Tel.: 0561 804 6228
gruss@uni-kassel.de



Jannis Kupka, M.Sc. (e²n)
Tel.: 0561 804 6658
jannis.kupka@uni-kassel.de



Jonas Haack, M.Sc. (e²n)
Tel.: 0561 804 6482
jonas.haack@uni-kassel.de



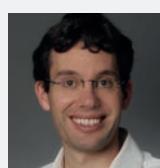
Pierre Küster, M.Sc. (EVS)
Tel.: 0561 804 6345
pierre.kuester@uni-kassel.de



Dipl.-Ing. Christian Hachmann, M.Sc. (e²n)
Tel.: 0561 804 6657
christian.hachmann@uni-kassel.de



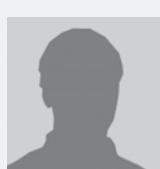
Dr. Gustav Lammert (e²n)
bis 2019



Dr. phil. Sascha Holzhauer (INES)
Teamleiter
Tel.: 0561 804 6513
sascha.holzhauer@uni-kassel.de



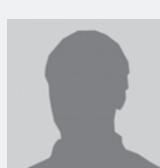
Dr. rer. pol. Lars-Peter Lauven (e²n)
Teamleiter
Tel.: 0561 804 6165
lars.lauven@uni-kassel.de



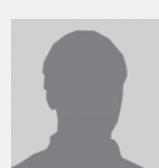
Dr.-Ing. Stefan Jörres, M.Sc. (AHT)
bis Ende März 2020



Zheng Liu, M.Sc. (e²n)
Tel.: 0561 804 6409
zheng.liu@uni-kassel.de

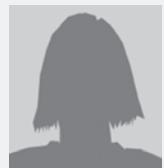


Jolando Kisse, M.Sc. (e²n)
Tel.: 0561 804 6377
jolando.kisse@uni-kassel.de



Daniel Lohmeier, M.Sc. (e²n)
Tel.: 0561 7294-134
daniel.lohmeier@iee.fraunhofer.de

Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter



Inga Löser, M.Sc. (e²n)

Tel.: 0561 804 6256
Inga.loeser@uni-kassel.de



Dr.-Ing. Christian Nöding (EVS)

Stellvertretende Fachgebietsleitung EVS
Tel.: 0561 804 6166
christian.noeding@uni-kassel.de



Maryam Majidi, M.Sc. (e²n)

Tel.: 0561 804 6323
Maryam.majidi@uni-kassel.de



Jens Obst (AHT)

Tel.: 0561 804 6393
obst@uni-kassel.de



Steffen Meinecke, M.Sc. (e²n)

Tel.: 0561 804 6084
steffen.meinecke@uni-kassel.de



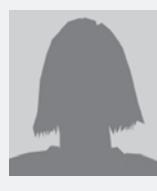
Jonas Pfeiffer, M.Sc. (EVS)

Tel.: 0561 804 6512
jonas.pfeiffer@uni-kassel.de



Dr. Jan-Hendrik Menke (e²n)

bis 2020



Ashreeta Prasanna, M.Sc. (INES)

bis 2020



Raoul Mitze, M.Sc. (EVS)

Tel.: 0561 804 6491
raoul.mitze@uni-kassel.de



Tobias Raulf, M.Sc. (AHT)

bis Ende März 2020



Dipl.-Ing. Manuel Münch, M.Sc. (EVS)

Tel.: 0561 804 6370
manuel.muench@uni-kassel.de



Mahmoud Saeidi, M.Sc. (EVS)

Tel.: 0561 804 6491
mahmoud.saeidi@uni-kassel.de



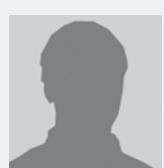
Lukas Nacken, M.Sc. (INES)

Tel.: 0561 804 6522
Lukas.Nacken@uni-kassel.de



Dr. Florian Schäfer (e²n)

bis 2020



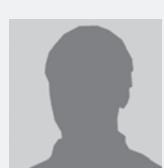
Ahmad Nazeri, M.Sc. (EVS)

Tel.: 0561 804 6345
ahmad.nazeri@uni-kassel.de



Martin Scharf, M.Sc. (e²n)

bis 2020



Khanh-Hung Nguyen, M.Sc. (EVS)

Tel.: 0561 804 6305
uk059103@uni-kassel.de



Walter Schittekk, M.Sc. (e²n)

Tel.: 0561 804 6213
walter.schittekk@uni-kassel.de

MITARBEITER DES KDEE/EVS/e²n/AHT/INES

Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter



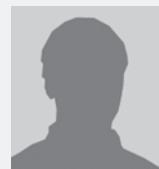
Frau Nicole Schmidt (e²n)
bis 2020



Zhenqi Wang, M.Sc. (e²n)
Tel.: 0561 804 6669
zhenqi.wang@uni-kassel.de



Andrea Schön, M.Sc. (e²n)
Tel.: 0561 7294-267
andrea.schoen@uni.kassel.de



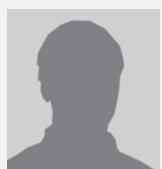
Dr.-Ing. Sebastian Wels (AHT)
bis Ende März 2020



Oliver Schröder (AHT)
Tel.: 0561 804 6394
oliver@uni-kassel.de



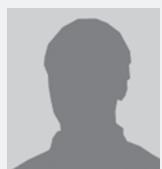
Jiajing Wende, M.Sc. (EVS)
Tel.: 0561 804 6510
jiajing.wende@uni-kassel.de



Techn. Bernhard Siano (EVS)
Tel.: 0561 804 6524
siano@uni-kassel.de



Dr. rer. nat. Sebastian Wende von Berg (e²n)
Teamleiter
Tel.: 0561 804 6381
sebastian.wende-von.berg@uni-kassel.de



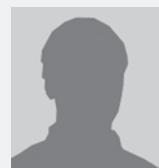
Sebastian Sprunck, M.Sc. (EVS)
bis 2020



Jörg Wiederrecht (EVS)
Tel.: 0561 804 6465
wie@uni-kassel.de



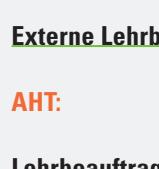
Dr. Leon Thurner (e²n)
leon.thurner @iee.fraunhofer.de



Nils Wiese, M.Sc. (e²n)
Tel.: 0561 804 6206
Nils.wiese@uni-kassel.de



Jan Ulfers, M.Sc. (e²n)
Tel.: 0561 7294-210
jan.ulffers@uni-kassel.de



Externe Lehrbeauftragte

AHT:

Lehrbeauftragte (AHT)

Dr.-Ing. Gernot Finis
Dr.-Ing. Cornelia Vandahl
Dipl.-Ing. Oskar Winter
Frank Gielsdorf
Dr.-Ing. Stefan Wolf



Manuel Valois, M.Sc. (e²n)
Tel.: 0561 7294-150
manuel.valois@uni-kassel.de



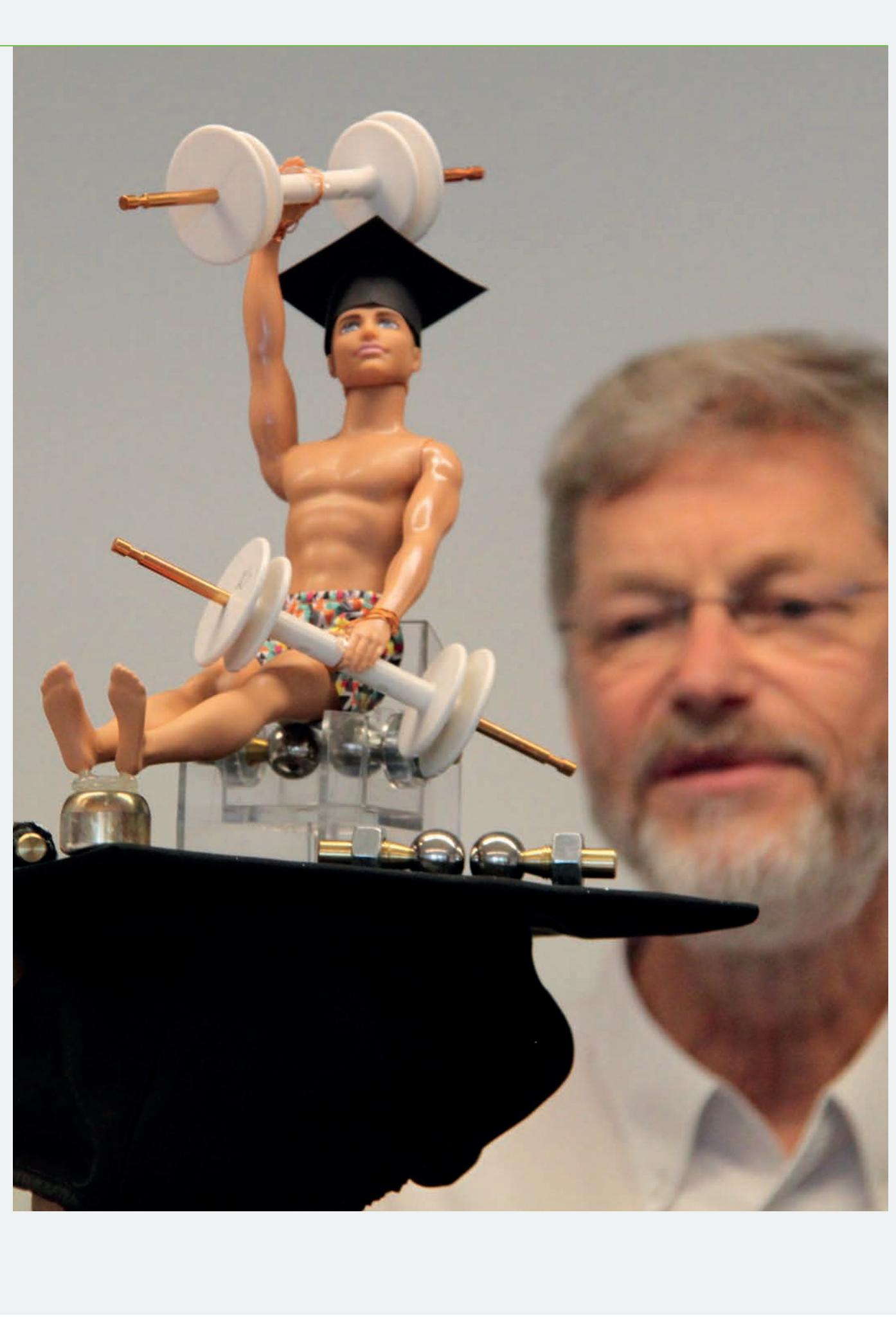
Michael von Bonin, M.Sc. (e²n)
Tel.: 0561 7294-1720
michael.vonbonin@uni-kassel.de

EVS:

Prof. Dr.-Ing. Harald Bradke
Prof. Dr.-Ing. Mike Meinhard



WWW.KDEE.UNI-KASSEL.DE

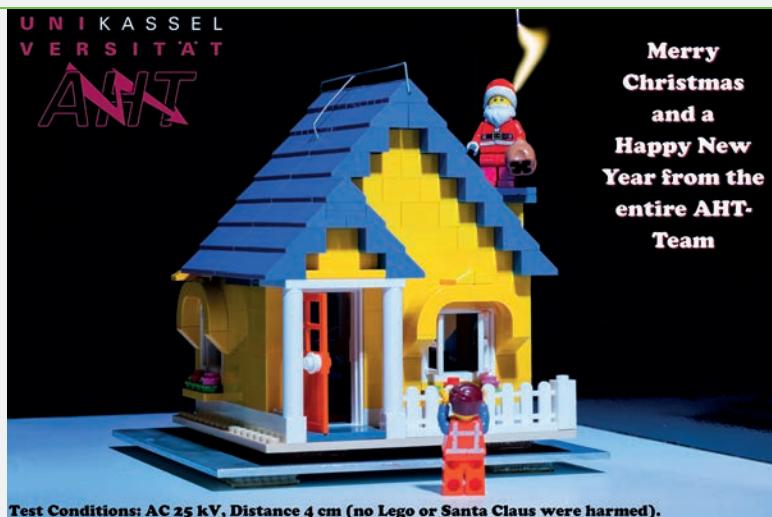


IMPRESSIONEN

IMPRESSIONEN 2019 / 2020



AHT zieht Bilanz



AHT Weihnachtskarte 2019



AHT Feier mit DJ Gute Laune

IMPRESSIONEN 2019 / 2020

Prof. Dr.-Ing. Albert Claudi



AHT Isopropanol

IMPRESSIONEN 2019 / 2020



Dissertation von Sebastian Wels



Team EVS

IMPRESSIONEN 2019 / 2020

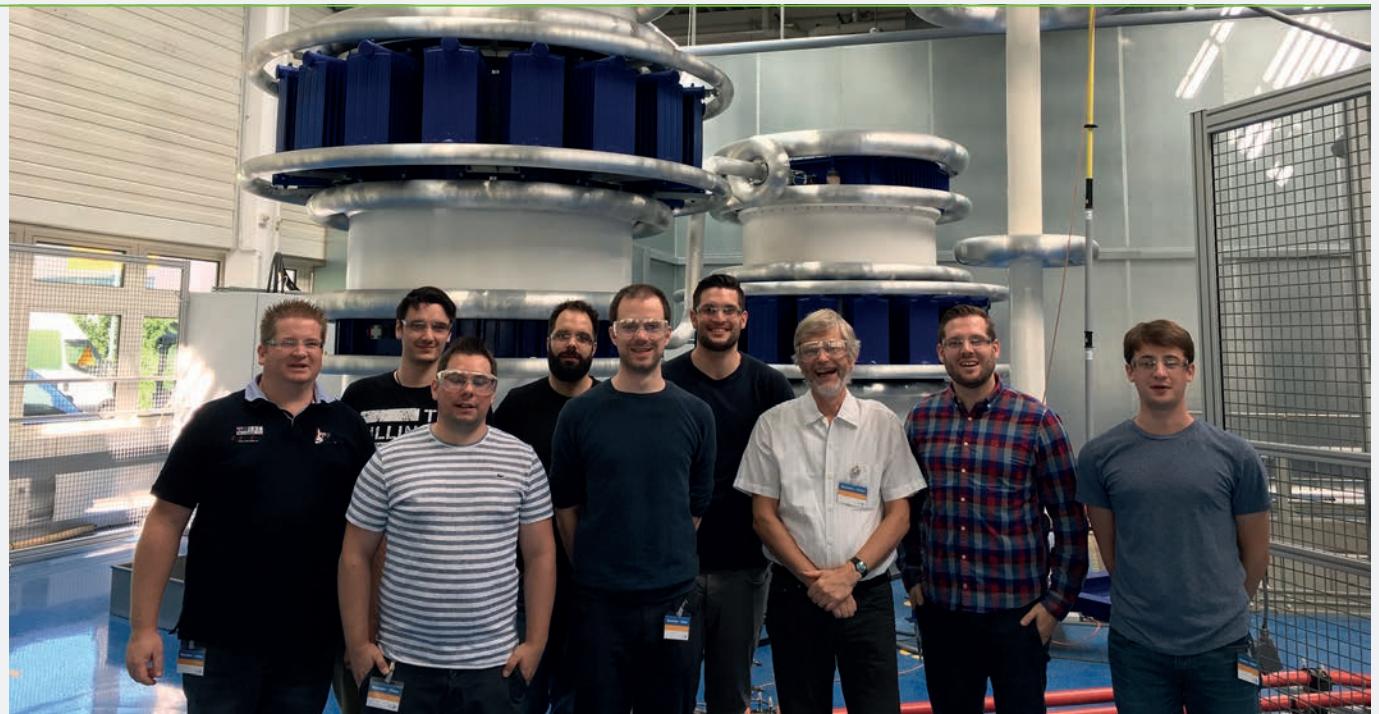
Team e2n mit Bereich Netzplanung und Netzbetrieb des Fraunhofer IEE



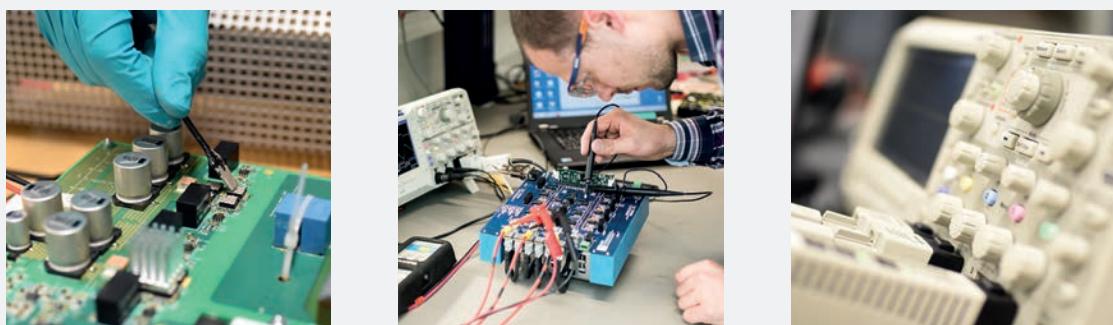
Key-Note-Vortrag auf der NEIS 2019



IMPRESSIONEN 2019 / 2020



Team AHT



www.kdee.uni-kassel.de

Kompetenzzentrum für Dezentrale Elektrische Energieversorgungstechnik (KDEE)

Fachgebiet Elektrische Energieversorgungssysteme (EVS)

Fachgebiet Energiemanagement und Betrieb elektrischer Netze (e²n)

Fachgebiet Anlagen und Hochspannungstechnik (AHT)

Fachgebiet Integrierte Energiesysteme (INES)

Universität Kassel
Wilhelmshöher Allee 71

34121 Kassel, Germany

EVS: Tel. +49 561 804 6344
www.evs.uni-kassel.de

AHT: Tel. +49 561 804 6420
www.uni-kassel.de/eeecs/iee-aht

e²n: Tel. +49 561 804 6201
www.e2n.uni-kassel.de

INES: Tel. +49 561 804 6182
www.uni-kassel.de/eeecs/fachgebiete/integrierte-energiesysteme

Stand: Mai 2021

