

- EVS:**
- Stromrichter für Elektrofahrzeuge
  - Hocheffiziente Konverter
  - SiC & GaN Bauelemente
  - Magnetische Bauelemente

- e<sup>2</sup>n:**
- 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

## **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. Jens Friebe (EVS),  
Prof. Dr.-Ing. Martin Braun (e<sup>2</sup>n),  
Prof. Dr. rer. nat. Clemens Hoffmann (INES)

<https://www.kdee.uni-kassel.de>

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

e<sup>2</sup>n: Tel. +49 561 804 6201 (Frau Kristina Torno)  
E-Mail: kristina.torno@uni-kassel.de  
<https://www.uni-kassel.de/eecs/e2n>

INES: Tel. +49 561 804 6182 (Frau Annette Petrat)  
E-Mail: annette.petrat@uni-kassel.de  
<https://www.uni-kassel.de/eecs/ines>

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

Bilder:  
Universität Kassel, iStockphoto

## **ZWEIJAHRESBERICHT 2021 / 2022**

## INHALTSANGABE

Vorwort	4	<b>FORSCHUNGSAKTIVITÄTEN e<sup>2</sup>n</b>	<b>33</b>
Kompetenzzentrum für Dezentrale Elektrische Energieversorgungstechnik (KDEE)	9	Das Fachgebiet e <sup>2</sup> n	34
Elektrische EnergieVersorgungsSysteme (EVS)	10	ANaPlan Plus	36
Energiemanagement und Betrieb elektrischer Netze (e <sup>2</sup> n)	11	DeV-KopSys-2	38
Integrierte Energiesysteme (INES)	13	Hybrid Grid	40
<b>FORSCHUNGSAKTIVITÄTEN EVS</b>	<b>15</b>	Netzregelung 2.0	41
Das Fachgebiet EVS	16	InterConnect	42
Innovationen für die nächste Generation PV-Kraftwerke	18	Ladeinfrastruktur 2.0	44
MCIB	20	NSON II	45
H2EASY	23	MotiV	46
Kalorimeter für Verlustleistungsmessungen	25	OASES	48
LCL-gefilterter netzgekoppelter Umrichter unter schwachen Netzbedingungen	26	OwnPV-Outlook	49
Teilnahme am International Future Energy Challenge (IFEC) gemeinsam mit der Max-Eyth-Schule Kassel	28	Redispatch 3.0	50
Projekt Elektroboot „eBoot“	30	ResiServD	51
		RobustPlan	52
		SPANNeND	53
		SENERGY NETS	54
		TransHyDE-Sys	56
		EU-SysFlex	57
		RPC2	58
		AGISTIN	59
		SpiN-AI	60
		Aktuelle Entwicklungen in pandapower und pandapipes	62
		Microgrid Labor	64
		Medaillon	66
		MEO	67
		Power and Energy Student Summit (PESS) 2021 and PESS and Power Electronics Student Summit (PELSS) 2022	68
<b>FORSCHUNGSAKTIVITÄTEN INES</b>	<b>71</b>		
Das Fachgebiet INES	72		
DeV-KopSys-2	74		
WAERMER	75		
Monitoring der Energieversorgung des Fraunhofer IEE			
Neubaus	76		
Deine Energiewende	78		
eRowboat	79		

**ABGESCHLOSSENE PROMOTIONEN 81**

Sebastian Sprunck: Charakterisierung der Schaltverluste diskreter Wide Band Gap Leistungshalbleiter und Entwärmung kompakter Bauteile	82
David Pabon Ospina: Long-term voltage stability of electric power systems hosting inverter-interfaced energy sources	83
Maria Nuschke: Frequenzstabilität im umrichterdominierten Verbundnetz	84
Do, Thi Hiep: Development of Feedback-Control for Energy Policy Design to Guarantee Sustainable Solar and Wind Power Investment Growth	85
Benjamin Requardt: Application-Oriented Reactive Power Management in German Distribution Systems Using Distributed Energy Resources	86
Haunan Wang: Application-Oriented Reactive Power Management in German Distribution Systems Using Distributed Energy Resources	87
Daniel Then: Interdependenzen bei Infrastruktur-Investitionsentscheidungen in Multi-Energie-Systemen	88
Andressa Schittler: Electromagnetic Interference Analysis of Fast-Switching-Speed Semiconductors Applied to Power Electronics Converters	89
Alexander Basse: Entwicklung und Analyse Lidar-basierter Kurzzeitmessstrategien zur Bestimmung des Windpotenzials	90
Jonas Pfeiffer: Praktische Anwendung von aktiver Vormagnetisierung in transformatorlosen DC/DC-Konvertern	91
Florian Fenske: Nutzung nichtlinearer Effekte zur elektrischen Steuerung von Netzdrosseln im Impedanzverhalten	92

Eduardo Façanha de Oliveira: Mode Analysis and Optimal Design of GaN-Based Three-Phase Bidirectional Dual Active Bridge DC/DC Converters for E-Vehicles Applications	93
--	----

Manuel Münch: Belastungsreduzierte Wechselrichter	94
---	----

**DOKUMENTATION 97**

Aktuelle Abschlussarbeiten 2021 + 2022 EVS	98
Aktuelle Abschlussarbeiten 2021 + 2022 e <sup>2</sup> n	99
Publikationen 2021 / 2022	101

**MITARbeiterINNEN UND MITARBEITER 109**

## 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 Entwicklung zu einem Zentrum der Energietechnik. Diese Entwicklung wurde mit der Berufung von Prof. Dr. Martin Braun im Jahr 2012 durch das Fachgebiet ‚Energie-management und Betrieb elektrischer Netze‘ (e<sup>2</sup>n) und 2015 mit Prof. Dr. Albert Claudi (Fachgebiet Anlagen und Hochspannungstechnik, AHT) und Prof. Dr. Clemens Hoffmann (Fachgebiet Integrierte Energiesysteme, INES) ergänzt, um den Forschungsschwerpunkt Energiesystemtechnik in Nordhessen zu stärken. Mit der Pensionie- rung von Prof. Claudi ist leider der erforderliche weitere Ausbau des Fachgebiet AHT ins Stocken geraten. Da für das Jahr 2023 die Nachfolge für Prof. Zacharias ansteht und im Jahr 2022 Prof. Jens Friebe mit einer Heisenberg-Professur ausgezeichnet wurde, die er nun an der Universität Kassel angetreten ist, ist jedoch der weitere Bestand und Ausbau des KDEE gesichert.

Die Themen „Nutzung erneuerbarer Energiequellen“ und „Schonung von Ressourcen durch Effizienzsteigerung“ sind aktueller denn je.

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 Ge-staltung des technischen Systems. Durch die Entwicklung von Stell-gliedern, geeigneter Automatisierungstechnik und durch ein Regel-werk für die Interaktion der vernetzten energietechnischen Komponenten soll das Energieversorgungssystem der Zukunft ge-staltet werden.

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 nachhaltigen Lösungen. Ver-brauch und Einspeisung von Energie in das elektrische Netz sind sowohl räumlich als auch zeitlich weitgehend unkorreliert. Gleich-zeitig ist das Europäische Verbundnetz keine „kurze Kupferplatte“, sondern bildet ein flächenhaftes, „elastisches“ System mit einer horizontalen Ausdehnung von mehreren 1000 km. Es gibt zusätzlich auch eine „vertikale“ Ausdehnung durch die lokale hierarchische Ordnung der Übertragungs- und Verteilnetze in verschiedene Span-nungsebenen mit jeweils eigener Netztopologie.

Weiterer Zubau setzt Systemkenntnis und Koordination voraus. Das Ziel einer 100 %-Energieversorgung ist ohne hinreichende Einbin-dung von auch saisonalen Speichern undenkbar. Hierfür sieht sich das KDEE von der Seite der Grundlagenforschung über die Entwick-lung neuer Prinziplösungen für Stellglieder und Systemkomponenten bis zu Fragen der Netzregelung, Qualitätssicherung und damit der technischen und wirtschaftlichen Optimierung der Auslegung und Regelung dezentraler Energiesysteme in der Verantwortung.

Das Streben nach Energiewandlung mit höchster Effizienz zur Reduk-tion von CO<sub>2</sub>-Emissionen und Kostensenkung überträgt sich aus dem Bereich der Erneuerbaren Energietechnik zunehmend auch in andere Bereiche. Neben der Wärmeversorgung durch Kraft-Wärme-Kopp-lung und Wärmepumpen ist ein weiteres wichtiges Beispiel dafür



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



**Prof. Dr.-Ing.**  
**Jens Friebe**



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



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

der Automobilbau – mit oder ohne elektrischen Antrieb. Vermiedene Verluste bedeuten vermiedene Aufwendungen für Kühlung, geringere Masse und größere Reichweiten. Um diese Entwicklung voranzubringen, wirkten das KDEE und seine Fachgebiete auch gleichzeitig im Forschungsverbund Fahrzeugsysteme (FAST) der Universität Kassel mit. Auch in der Industrieautomation, der Beleuchtungstechnik und der Medizintechnik führen Energieeinsparungen zu Kostenvorteilen, so dass hier weitere „spin-offs“ der bisherigen Forschungstätigkeiten zu erwarten sind.

Die geplanten Maßnahmen der Energiewende erfordern eine Vielzahl gut ausgebildeter Ingenieure. Trotzdem ist ein beständiger Rückgang der Neuanfänger in den Ingenieurwissenschaften und insbesondere in der Elektrotechnik zu beobachten. Die begonnenen Aktivitäten in Schulen zum Zweck der Studienwerbung müssen daher in Zukunft noch weiter ausgebaut werden. 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.

Das KDEE ist durch personelle Verknüpfung der Fachgebiete e<sup>2</sup>n 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 des EVS, e<sup>2</sup>n und KDEE fühlen sich der weiteren Stärkung der Zusammenarbeit der Universität Kassel mit anderen wissenschaftlichen Institutionen wie dem Fraunhofer IEE und Industrie-Unternehmen 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 Center of Competence for Decentralized Electrical Energy Supply Technology (KDEE) at the University of Kassel was inaugurated in 2008 by Minister Kühne-Hörmann (CDU) and established as a separate structural unit of the University in January 2009. Since then, a development into a center of energy technology has taken place, initially with the Department of Electrical Power Supply Systems (EVS). This development was complemented with the appointment of Prof. Dr. Martin Braun in 2012 with the department 'Energy Management and Operation of Electrical Networks' (e<sup>2</sup>n) and in 2015 with Prof. Dr. Albert Claudi (Department of Systems and High Voltage Engineering, AHT) and Prof. Dr. Clemens Hoffmann (Department of Integrated Energy Systems, INES) to strengthen the research focus on energy systems engineering in Northern Hesse. With the retirement of Prof. Claudi, the necessary further expansion of the AHT department has unfortunately come to a standstill. However, since Prof. Zacharias is to be succeeded in 2023 and Prof. Jens Friebe was awarded a Heisenberg professorship in 2022, which he has now taken up at the University of Kassel, the continued existence and expansion of the KDEE is assured.

The topics of "using renewable energy sources" and "conserving resources by increasing efficiency" are more timely than ever.

Originally, the focus of interest in the use of renewable energy sources was the provision of active power with maximum efficiency. Many systems engineering issues are now being added. Grids that were dominated by large electrical machines are becoming grids that are increasingly characterized by power electronic energy converters and volatile energy flows. The higher the share of volatile generators in the total installed power, the more questions about securing the stability and quality of the grids come to the fore. Here, the KDEE sees future-proof task areas in the design of the technical system. The energy supply system of the future is to be designed by developing actuators, suitable automation technology and a set of rules for the interaction of the networked energy technology components.

Until 2010, the addition of decentralized electrical energy generators could hardly have any real negative effects due to the still relatively small share in the case of areal distribution. Due to the high growth rate in the expansion of decentralized energy feeders, this situation has changed fundamentally. The consideration of cumulative values, which is often carried out in public, does not lead to meaningful sustainable solutions here in individual cases. Consumption and feed-in of energy into the electrical grid are largely uncorrelated both spatially and temporally. At the same time, the European interconnected grid is not a "short copper plate", but forms an extensive, "elastic" system with a horizontal extension of several 1000 km. There is also a "vertical" extension due to the local hierarchical order of the transmission and distribution networks into different voltage levels, each with its own network topology.

Further expansion requires system knowledge and coordination. The goal of 100% energy supply is unthinkable without sufficient integration of seasonal storage systems. The KDEE consider itself as responsible for this, from the side of basic research to the development of new principle solutions for actuators and system components to questions of grid control, quality assurance and thus the technical and economic optimization of the design and control of decentralized energy systems.

The quest for energy conversion with maximum efficiency to reduce CO<sub>2</sub> emissions and cut costs is increasingly transferring from the field of renewable energy technology to other areas. In addition to heat supply by cogeneration and heat pumps, another important example is automotive engineering – with or without electric drive. Avoided losses mean avoided expenditures for cooling, lower mass and longer ranges. In order to advance this development, the KDEE and its departments also participated simultaneously in the Vehicle Systems Research Network (FAST) of the University of Kassel. Energy savings also lead to cost advantages in industrial automation, lighting technology and medical technology, so that further "spin-offs" of previous research activities can be expected here.



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



**Prof. Dr.-Ing.  
Jens Friebe**



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



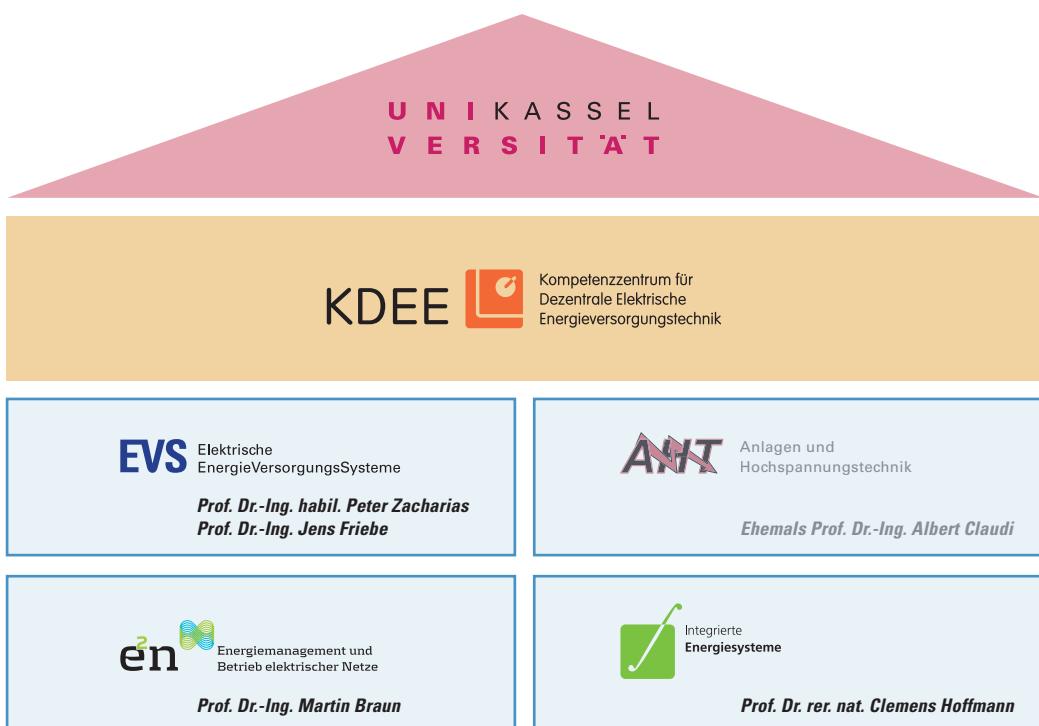
**Prof. Dr. rer. nat.  
Clemens Hoffmann**

*The planned measures of the energy turnaround require a large number of well-trained engineers. Despite this, a steady decline in the number of new entrants to the engineering sciences and in particular to electrical engineering can be observed. The activities started in schools for the purpose of recruiting students must therefore be further expanded in the future. The KDEE offers courses on a wide range of classic and new energy technology topics in order to secure the next generation of engineers for the systems engineering design of the energy supply of the future.*

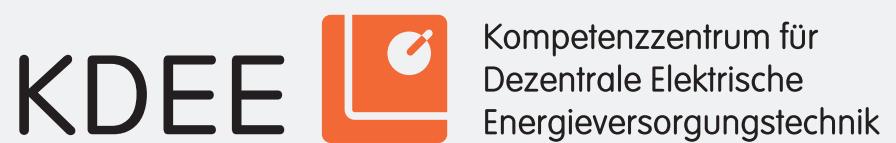
*The KDEE is linked to the Fraunhofer IEE in a close cooperation through personnel linkage of the departments e<sup>2</sup>n and INES, so that the competences of the leading regional research institutions in the subject area of decentralized electrical energy supply can be optimally coordinated in order to jointly advance the energy turnaround in North Hesse, nationally and internationally with this location strength.*

*The staff and students of EVS, e<sup>2</sup>n and KDEE are committed to further strengthening the cooperation of the University of Kassel with other scientific institutions such as Fraunhofer IEE and industrial companies, as well as the international visibility of its performance in the field of sustainable energy supply, and sincerely thank their sponsors and cooperation partners.*

*P. Zacharias M. Braun*



Unter dem Dach der Universität Kassel und des Kompetenzzentrums für Dezentrale Elektrische Energieversorgungstechnik (KDEE) befinden sich die vier Fachgebiete EVS, e<sup>2</sup>n, AHT und INES



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 (e<sup>2</sup>n)** 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 e<sup>2</sup>n 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

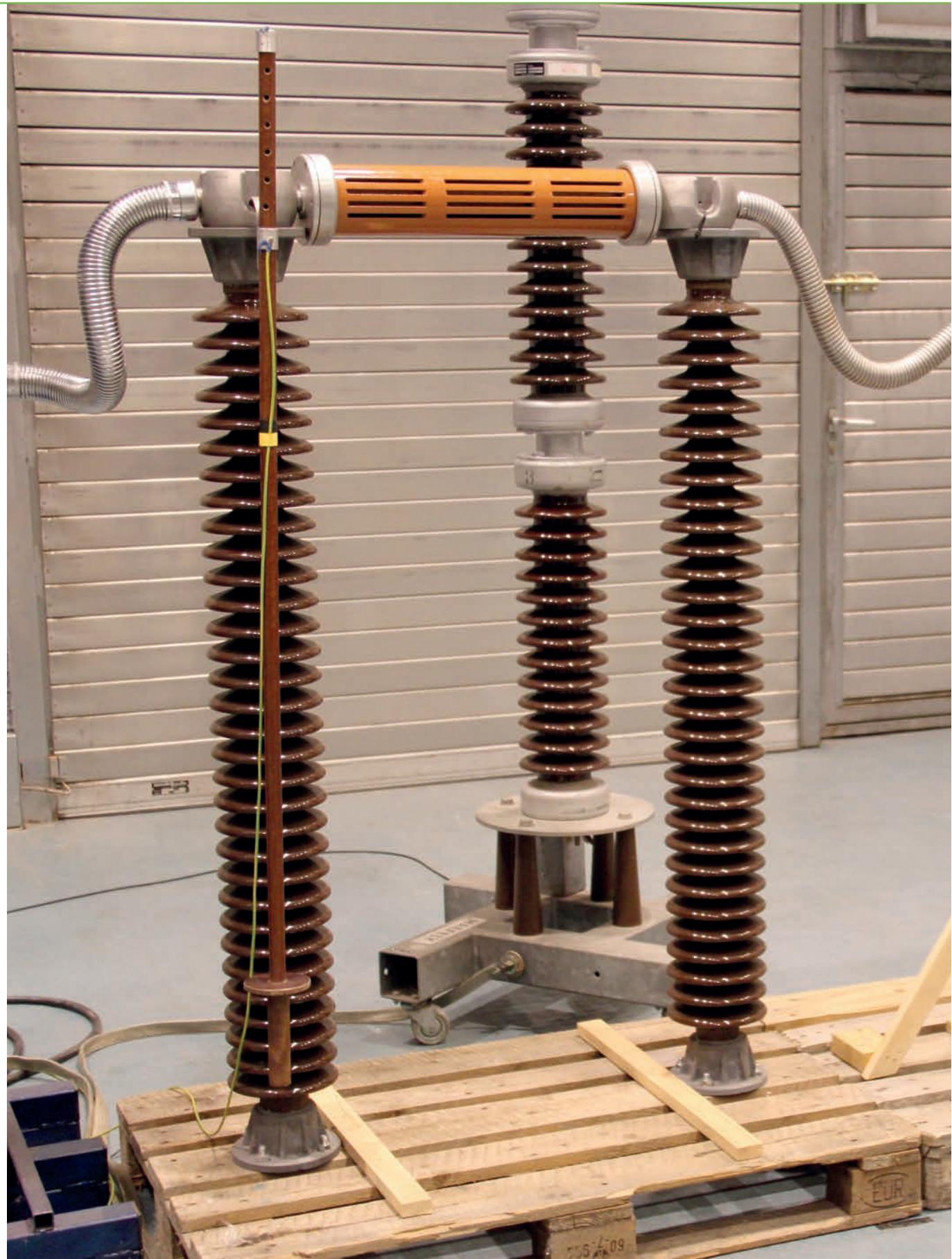
- Regelung und Auslegung von Erzeugern, Verbrauchern, Speichern und Netzbetriebsmitteln zur Bereitstellung von Energie- und Netzdienstleistungen
- Verfahren für Energiemanagement und Netzbetrieb / Automatisierungslösungen in dezentralen Versorgungsstrukturen mit verschiedenen Aggregations- und Anreizkonzepten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

*The department Energy Management and Power System Operation (e<sup>2</sup>n) 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 e<sup>2</sup>n 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

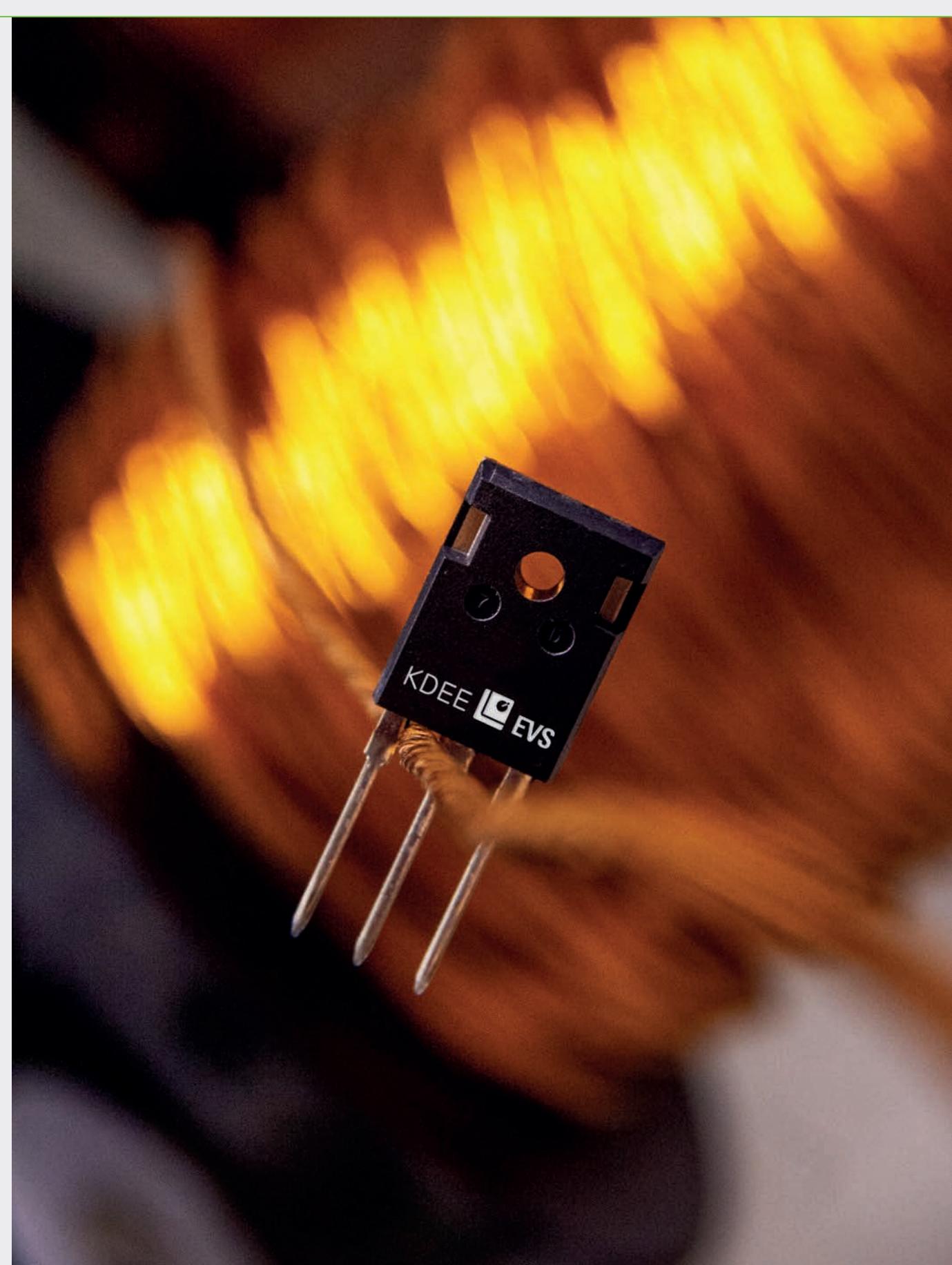
- *Control and design of generation, consumer, storage and grid facilities for the provision of energy and ancillary services*
- *Approaches for energy management and grid operation / automation solutions in decentralized supply structures with different concepts such as aggregation and incentive-based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





Das **Fachgebiet Integrierte Energiesysteme (INES)** erfüllt unter der Leitung von Prof. Hoffmann eine zentrale Rolle als Verbindung zwischen der Universität Kassel und dem Fraunhofer Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik (IEE). Auf der Grundlage eines Forschungs- und Lehrangebotes im Bereich einer „Systemtheorie der Energiewende“ sollen Fachkräfte ausgebildet werden, die in den sich neu entwickelnden Schlüsselfunktionen des zukünftigen Energiesystems Verantwortung übernehmen können. Hierbei unterstützt die Verbindung zum Fraunhofer IEE, in welchem auf der Basis dieser Grundlagenforschung anwendungsrelevante Dienstleistungen, Lösungen und Vorprodukte weiter entwickelt werden können. Diese enge Verknüpfung zum IEE erhöht die Bandbreite der Zusammenarbeit, von der studentischen Abschlussarbeit bis hin zur Promotion.

*The department of Integrated Energy Systems, under the direction of Prof. Hoffmann, plays a central role as a link between the University of Kassel and the Fraunhofer Institute for Energy Economy and Energy System Technology (IEE). On the base of research and teaching in the area of a "system theory of energy transition", specialists are to be trained so they can assume responsibility in the newly developed key functions of the future energy system. The department is supported by the connection to Fraunhofer IEE, in which, on the base of this research, application-relevant services, solutions and pre-products can be further developed. This close relationship with the IEE increases the range of cooperation, from the student thesis to the graduate thesis.*



# 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

Zunehmende Vernetzung (elektrische Energie, Gas, Wasser, Information, Verkehr etc.) bedeutet gleichzeitig das Erfordernis, die wissenschaftlichen Grundlagen der Vernetzung weiter zu entwickeln. Auf diesen beruhen schließlich die komplexen Infrastrukturen der modernen Gesellschaft. Im energetischen Bereich wird diese noch eine zunehmende gezielte Sektorenkopplung erweitert.

Das EVS konzentriert sich auf Energiewandlungsprozesse, die mit leistungselektronischen Mitteln dazu genutzt werden können, aus Primärenergieträgern oder Speichermedien elektrische Energie bereit zu stellen. Die breite Nutzung aller verfügbarer Quellen wird sich in der kommenden Zeit ebenso fortsetzen wie die weitere Vernetzung aller Beteiligter. Dadurch gewinnen vernetzte Interaktionen von Stromrichtern immer weiter an Bedeutung.

Im **Rahmen von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben** zum Beispiel zur

- Hocheffiziente Bereitstellung von Wirk- und Blindleistung für das Netz,
- Dezentraler Spannungsregelung und Power Quality Management,
- Hocheffiziente Energiewandler für elektrische Maschinen und andere Anwendungen,
- Veränderung der Kurzschlussleistung und Beeinflussung der Netstabilität,
- Technologieentwicklung für kompakte Hochleistungswandler,
- Entwicklung hocheffizienter Bordnetze für mobile Anwendungen,
- Integration von Energiespeichern in Netze,
- Entwicklung neuer robuster Stellglieder für den Leistungsfluss in elektrischen Netzen

*Increasing integration (electrical energy, gas, water, information, traffic, etc.) also means the need to further develop the scientific foundations of integration. After all, these are the basis for the complex infrastructures of modern society. In the field of energy application, this will be extended to an increasing targeted sector coupling.*

*The EVS focuses on energy conversion processes that can be used with power electronic means to provide electrical energy from primary energy sources or storage media. The broad use of all available sources will continue in the coming time as well as the further networking of all participants. As a result, networked interactions of power converters are becoming increasingly important.*

As part of **research and development projects**, for example on the

- *Highly efficient delivery of active and reactive power to the grid,*
- *Decentralized voltage control and power quality management,*
- *High efficiency energy converters for electrical machines and other applications,*
- *changing the short-circuit power and influencing the grid stability,*
- *technology development for compact high power converters,*
- *Development of highly efficient on-board electrical systems for mobile applications,*
- *integration of energy storage into grids,*
- *Development of new robust actuators for power flow in electrical networks*



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

**Prof. Dr.-Ing..  
Jens Friebe**

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 weiterentwickelt 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.

*dissertations, diploma, master's and bachelor's theses develop future-oriented methods in order to cope with the changes in the electrical energy supply.*

*Power electronic converters are the most flexible and fastest power management actuators in current and future electrical energy networks. Their design and control require specialized know-how that will be concentrated and developed at KDEE/EVS over the long term. The development impulses come from the efficient use of traditional energy sources as well as from the special requirements of the new renewable energy sources. New energy conversion concepts allow these to be used in general. The provided "raw energy" of the converter usually does not meet the standardized conditions of use in the supply in stationary and mobile applications. Power electronic converters allow processing of this raw energy for the end user with the highest conversion levels. It enables the integration of various energy sources and storage into an overall system.*

Ansprechpartner

KOK YUN FOO, M.SC.; RAOUL MITZE, M.SC.; MANUEL MÜNCH, M.SC.; MAHMOUD SAEIDI, M.SC. (EVS)

Titel

## INNOVATIONEN FÜR DIE NÄCHSTE GENERATION PV-KRAFTWERKE

## INNOVATIONS FOR THE NEXT GENERATION OF PHOTOVOLTAIC POWER PLANTS

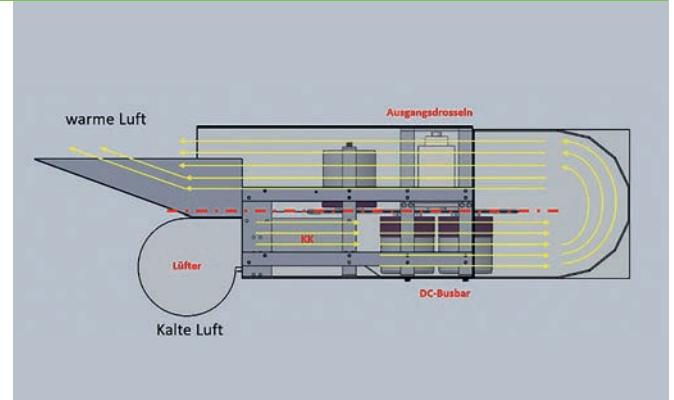
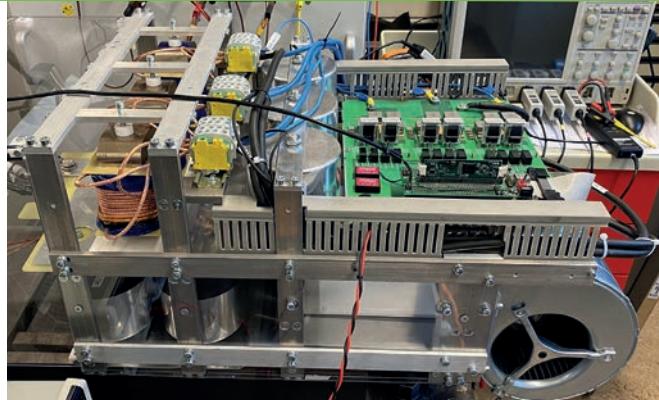


Abbildung 1: Technologiedemonstrator PV-Kraftwerke 2025 (links) – Umlüftung (rechts)

Figure 1: Technology demonstrator PV power plants 2025 (left) – ventilation (right)

### Neue Bauelemente, Systemlösungen und Wechselrichter für eine kostengünstige und netzdienliche Stromversorgung „PV-Kraftwerk2025“

Unter Berücksichtigung der Innovationen für die nächste Generation PV-Kraftwerke wurde die Zielstellung im Rahmen PV-Kraftwerk2025 festgelegt. Darüber hinaus wurde eine ausführliche Untersuchung neuer Bauelemente, Systemlösungen und Wechselrichter für eine kostengünstige und netzdienliche Stromversorgung durchgeführt. Durch die Entwicklung eines angepassten robusten 1700 V SiC Leistungsmoduls (SiC-Modulen von IFX) wurde der Einsatz höhere DC-Panelspannungen (1500 V) bzw. generell in Großanlagen, die überwiegend 1700 V basierte IGBT's enthält, mit SiC-Technologie ermöglicht. Die Schalter auf Basis von Halbleitern mit hohem Bandabstand erlauben ein schnelles Schalten mit geringeren Schaltverlusten, eine Erhöhung der Taktfrequenz und der Halbleitertemperaturen sowie die Verringerung der Ripplebelastung in den passiven Bauteilen (Kondensatoren, Induktivitäten), wodurch deren Volumen reduziert werden kann. Im Zuge des Projektes wurden mit Hilfe von Simulationen und Messungen Schaltungsstrukturen erarbeitet, die einerseits eine Optimierung für die Wide-Bandgap-Bauteile darstellen, auf der anderen Seite aber eine spätere Industrialisierung erlauben.

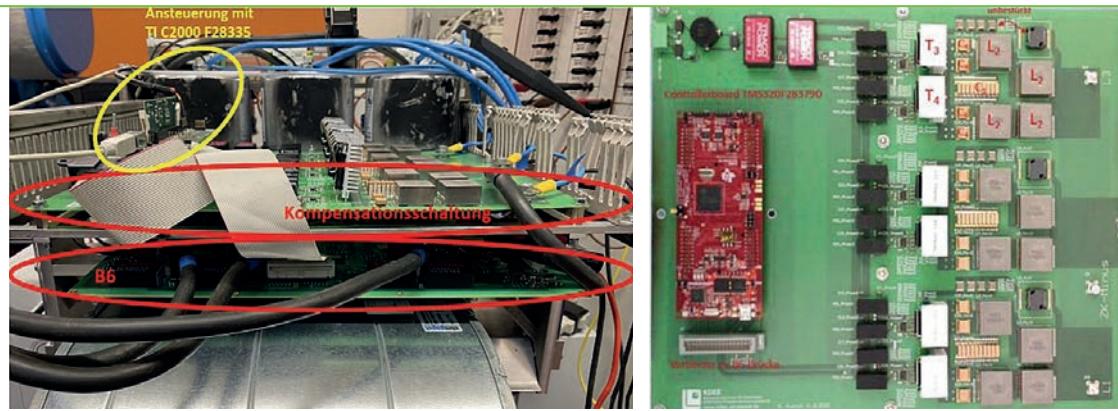
Um das Ziel des Projekts die Entwicklung des 100 kW-Klasse Wechselrichters mit neu entwickeltem Halbleiter (SiC-Modulen von IFX) zu erreichen, wurde ein Technologiedemonstrator diesbezüglich aufgebaut, der unter Betrachtung der Innovationen für die nächste Generation PV-Kraftwerke entwickelt wurde. Aufgrund der thermischen Belastung ist eine Konstruktion vorgesehen, um für alle Bauteile des Demonstrators nur einen Ventilator zur Abkühlung einzusetzen. Die Abbildung 1 zeigt das Funktionsmuster.

### New components, system solutions and inverters for a cost-effective and grid-supporting power supply "PV Power Plant2025"

Consideration of innovations for the next generation of PV power plants were defined as a goal in the PV Power Plant2025 project. Furthermore, a comprehensive investigation on new components, system solutions and inverters for a cost-effective and grid-supporting power supply was carried out. The development of a corresponding robust 1700 V SiC power module (SiC modules from IFX) has enabled the application of higher DC panel voltages (1500 V) or generally in large-scale systems based mainly on 1700 V based IGBT's using SiC technology. The switches based on wide-bandgap semiconductors allow fast switching with lower switching losses, an increase in switching frequency and semiconductor temperatures, and a reduction in the ripple load in the passive components (capacitors, inductors), which means that their volume can be reduced. As part of the project, circuit configurations were developed with the aid of simulations and measurements, which on the one hand represent an optimization for the wide bandgap components, but on the other hand also enable future industrialization.

To achieve the project goal of developing the 100 kW class inverters with newly developed semiconductors (SiC modules from IFX), a technology demonstrator has been built considering the innovations for the next generation of PV power plants. Due to the thermal stress, a design is provided to implement only one cooling fan for all components of the demonstrator. In the figure 1, the prototype has been shown.

Abbildung 2: Kompensationsschaltung bei B6-Stackaufbau Seitenansicht (links) – Topansicht (rechts)  
 Figure 2: Compensation circuit for B6 stack design Side view (left) – Top view (right)



Außerdem arbeitet der Wechselrichter mit der Zusatzfunktion (Kompensationsschaltung) zur Reduzierung des THDs und der Rippelströme. Die hier untersuchte Kompensationsschaltung, in Abbildung 2 dargestellt, erhöht die Qualität der DC/AC-Wandler Ausgangsparameter signifikant. Sie nutzt die erzeugte Oberwellenenergie der Hauptwandlerstufe, um die Stromwelligkeit bei jedem PWM-Zyklus aufzuheben und den THD zu verbessern. Die verwendeten Schalter benötigen nur einen Bruchteil der nominalen Blockierspannung und des Stromes der Hauptwandlerstufe. Dies führt zu einer Reduzierung/Entlastung des Ausgangs-Gegentakt-Filters sowie zu einer deutlichen Einsparung von Halbleitern/Treibertechnik gemessen an der erreichten Stromqualität.

Bei der Inbetriebnahme wurde das Funktionsmuster überprüft. Die Wirksamkeit der Kompensationsschaltung auf Rippelstrom und THD der B6-Brücke wurde erfolgreich getestet. Die Abbildungen 3 und 4 zeigen die Wirkung der Kompensationsschaltung bei der Reduzierung des THDs und des Rippelstroms.

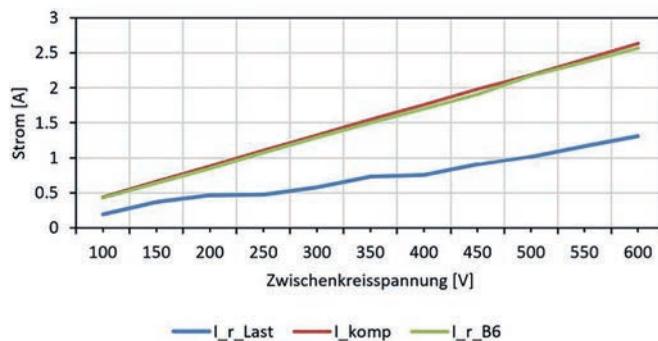


Abbildung 3: Ströme über die Zwischenkreisspannung  
 Figure 3: Currents over DC-Link voltage

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

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

Moreover, the inverter operates with the additional feature (compensation circuit) to reduce THD and ripple currents. The compensation circuit investigated here, shown in Figure 2, significantly increases the quality of the DC/AC converter output parameters. It uses the generated harmonic energy of the main converter stage to cancel the current ripple at each PWM cycle and improve the THD. The switches implemented require only a fraction of the rated blocking voltage and the rated current of the main converter stage. This leads to a reduction of the output filter as well as to a significant reduction of the semiconductor/driver technology regarding the achieved current quality. Prototype was tested during implementation. The effectiveness of the compensation circuit on ripple current and THD of the B6 bridge was successfully evaluated and tested. Figures 3 and 4 show the effect of the compensation circuit in reducing THD and ripple current.

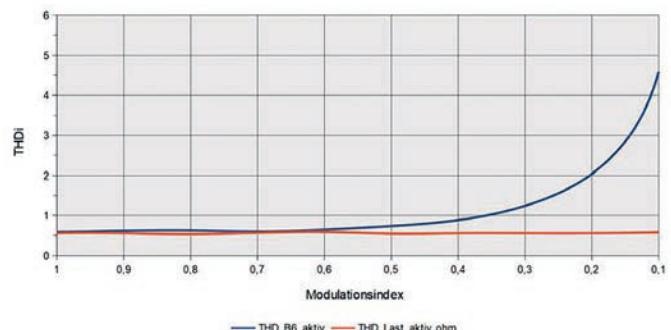
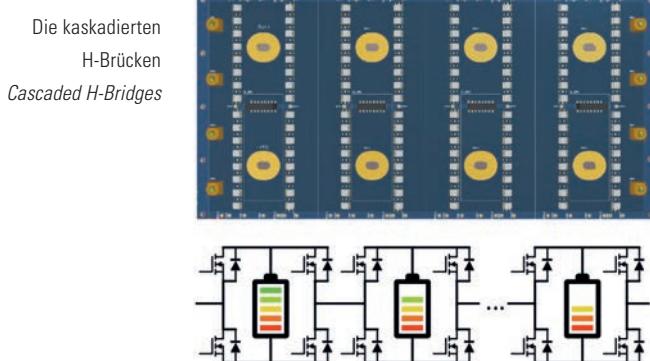


Abbildung 4: THD über Modulationsgrad für B6-Phasenstrom (blau) und kompensierte Laststrom (rot) bei ohmscher Last  $R = 12,66\Omega$  und aktiver Betriebsführung ( $t_{tot} = 1,3\mu s$ )  
 Figure 4: THD versus modulation depth for B6 phase current (blue) and compensated load current (red) with resistive load  $R = 12.66\Omega$  and active operation control ( $t_{tot} = 1.3\mu s$ )

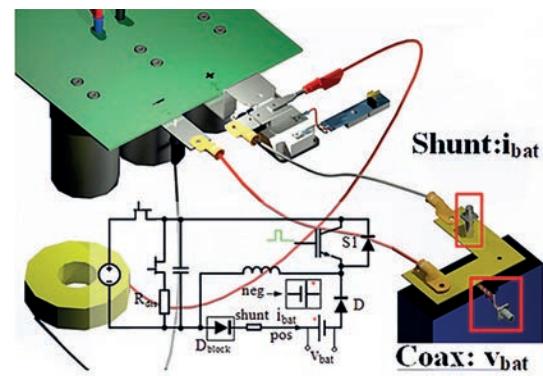
## MODULARE LEISTUNGSELEKTRONIK ZUM BATTERIEMANAGEMENT AUF DER EBENE EINZELNER ZELLEN (MCIB)

Im Projekt **MCIB** wurden leistungselektronische Topologien für kostengünstigere und leistungsfähigere Batteriespeichersysteme erforscht und entwickelt. Im vorgeschlagenen Lösungsansatz wurde eine Mehrpunkt-Schaltungstopologie auf Basis der kaskadierten Vollbrücken eingesetzt (siehe Abb.1). Der Hauptvorteil der kaskadierten H-Brücken liegt darin, dass das Laden und Entladen einer Batteriezelle oder die Ladungsbilanz zwischen den Batteriezellen in Sekunden oder Minuten anstatt in Millisekunden wie bei dem Kondensatorsspeicher stattfinden müssen, damit sich die Schaltfrequenz bzw. -verluste deutlich verringern und die Herausforderung an die Ansteuerung erleichtern lässt. Einerseits sind die H-Brücken für die Regelung des Leistungsflusses verantwortlich. Andererseits ermöglichen sie auch die Funktionalitäten der Batterie-Management-Systeme, z. B. der aktiven Ladungsbilanz, die die gleichzeitige Verwendung von Zellen mit großem Unterschied in den Kapazitäten oder aus unterschiedlichen Herstellern erlaubt. Mit dieser skalierbaren Struktur wird die Zuverlässigkeit des Batteriespeichersystems erhöht, weil das Versagen einer Stufe nie zu dem Ausfall des gesamten Systems führen würde. Für die gezielte Anwendung einphasiger AC-Netzeinspeisung wurde ein Demonstrator mit insgesamt 132 Stufen aufgebaut. Mit der hohen Stufenanzahl wurde der Aufwand der Filtertechnologie und strombegrenzenden Bauteile wegen der niedrigen Zellspannung (2,9~3,6 V) auch erheblich reduziert. Zur Gewährleistung der oben genannten Vorteile und zur Ausschließung der potenziellen Gefahren, wurden vielfältige detaillierte Untersuchungen im Fachgebiet KDEE EVS durchgeführt.



title  
**MULTILEVEL BATTERY CONVERTER WITH  
CASCADED H-BRIDGES ON THE CELL LEVEL**

In the **MCIB** project, power electronic topologies for more cost-effective and more powerful battery storage systems have been researched and developed. In the proposed solution approach, a multi-level topology based on the cascaded full bridges was used (see fig.1). The main advantage of cascaded H-bridges is that the charging and discharging of the battery cell or the charge balancing between the battery cells must take place only in seconds or minutes instead of milliseconds as with the capacitor storage, which significantly reduces the switching frequency so that the switching losses and relieves the control challenge. On the one hand, the H-bridges are responsible for controlling the power flow. On the other hand, they also enable the functionalities of the battery management systems, such as active charge balancing, which allows the simultaneous use of cells with a large difference in capacities or from different manufacturers. With the scalable structure, the reliability of the battery storage system is increased, as the failure of one stage would never lead to the failure of the entire system. A demonstrator with a total of 132 stages was built for the targeted application of the single-phase AC grid injection. With the high number of stages, the efforts for filter technology and current-limiting components are also significantly reduced due to the low cell voltage (2.9~3.6 V). To ensure the advantages mentioned above and to avoid potential risks, a variety of detailed research has been carried out in the department KDEE EVS.



Der Messaufbau des Einzelpulstests  
Measurement setup of the single pulse test

### Überspannungsbetrachtung in dem Kommutierungsvorgang

Überspannungen an einzelnen Transistoren können beim Ausschalten wegen schneller Absenkung des Stroms durch Kommutierungsininduktivität verursacht werden. Daher stellen sich die Fragen, wie viele Induktivität durch die Batteriezelle im Kommutierungskreis eingeführt werden könnte und ob das Verhalten der Batteriezelle hinsichtlich dieser Überspannung bei verschiedenen Betriebsbedingungen dramatisch unterschiedlich sein könnte. Um diese Fragen beantworten zu können, wurde die Batteriezelle mit einer Nennka-

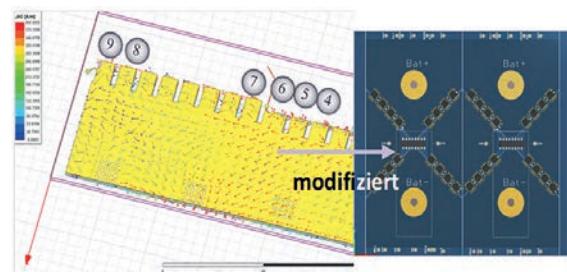
### Overvoltage considerations in the commutation loop

Overvoltage on individual Mosfets can be caused by the commutation inductance due to rapid current drop during the switch-off transient. Therefore, questions arise as to how much inductance could be introduced by the battery cell itself in the commutation loop and whether the behavior of the battery cell with respect to this overvoltage could be dramatically changed under different operation conditions. To answer these questions, the battery cell with a rated capacity of 272 Ah was stressed under

pazität von 272 Ah unter insgesamt 72 Kombinationen von Betriebsbedingungen mit Hilfe des Einzelpulsversuches gestresst (Stromspitze: 136, 272, 408, 544 A; Stromrichtungen: positiv, negativ; Ladezustand: 20 %, 50 %, 80 %; Umgebungs- und Zelltemperatur: 5, 20, 50 °C). Die festgelegte Induktivität der Zelle liegt im Bereich von 4 bis 7 nH.

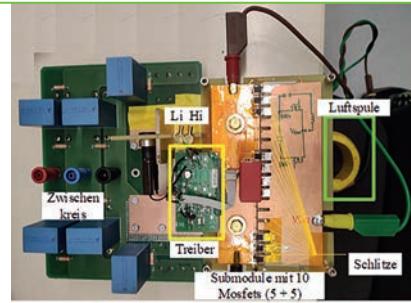
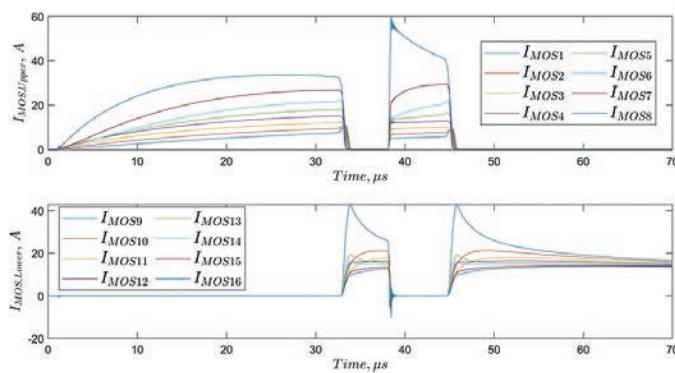
### Untersuchung der Stromaufteilung mit Hilfe von Experimenten und FEM-Simulation

Zur Reduzierung der Durchlassverluste in den H-Brücken wurden mehrere Mosfets parallel-geschaltet. Aber durch die Parallelschaltung einer Vielzahl von Mosfets könnte eine ungleichmäßigen Stromaufteilung sogar Beschädigung der betroffenen Mosfets verursacht werden. Aufgrund des extrem niedrigen Durchlasswiderstands ( $0.85 \text{ m}\Omega$ ) von den eingesetzten Mosfets sind keine galvanisch nicht getrennte Strommessungen möglich. Um die Stromaufteilung in der Leiterplatte untersuchen und das Layout flexibel und bequem modifizieren zu können, wurde die FEM-Simulationsmethode (Ansys Q3D) in Verbindung mit der Schaltungssimulation (Ansys Simplorer) bzw. die sog. „Co-Simulation“ verwendet. Dabei wurde das Simulationsmodell durch die Messungen mit Rogowski-Spule validiert.



FEM- Modell der Leiterplatte in Q3D

FEM-Model of PCB in Q3D

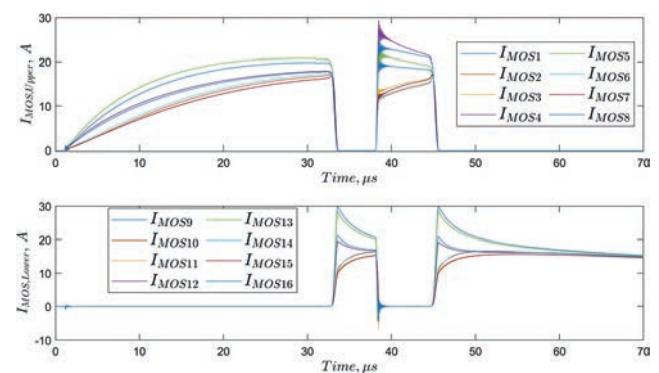


Validierung des FEM-Modells  
Validation of FEM-Model

*a total of 72 combinations of operating conditions using a single pulse test (peak current: 136, 272, 408, 544 A; current direction: positive, negative; state of charge: 20 %, 50 % 80 %; ambient and cell temperature: 5, 20, 50°C). The measured cell inductance lies in a range from 4 to 7 nH.*

### Investigation of the current distribution through experiments and FEA-simulation

*To reduce the conduction losses in the H-bridges, several Mosfets are connected in parallel. However, the parallel connection of a number of Mosfets could lead to uneven current distribution and even cause damage to the involved Mosfets. Due to the extremely low on-resistance of the Mosfets adopted ( $0.85 \text{ m}\Omega$ ), non-galvanically isolated current measurements are not allowed. To investigate the current distribution in the printed circuit board and for the flexibility and convenience of the PCB layout modifications, the FEA software (Ansys Q3D) was used in conjunction with the circuit simulation tool (Ansys Simplorer), also known as "Co-simulation". The simulation model was also validated by the measurements using the Rogowski coil.*

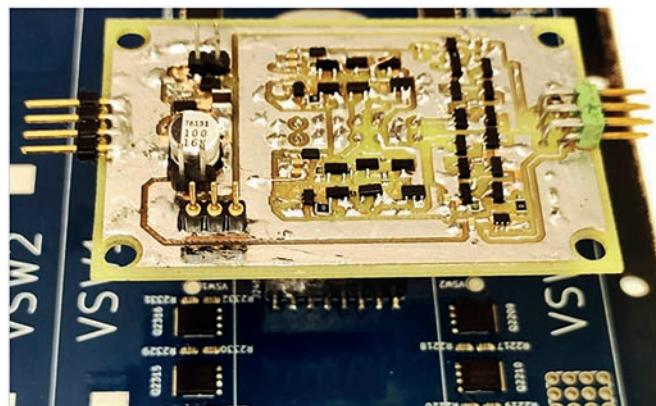


Simulationsergebnisse: altes (links) und verbessertes PCB-Layout (rechts)

Simulation results: old (left) and improved PCB layout (right)

## Durchführbarkeit des diskreten Gate-Treibers hinsichtlich der Kosten

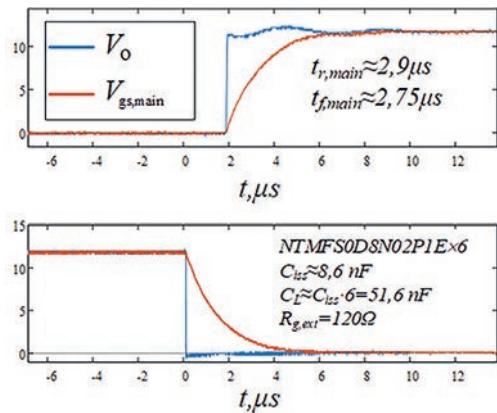
Der Ausgangspunkt ist die lange Lieferzeit des integrierten Treibers, dass eine alternative Lösung für den Gate-Treiber vorbereitet werden soll. Aber bei dem diskreten Treiber ist es unmöglich, den gleichen Funktionsumfang eines integrierten Treibers aufgrund der Kosten, des Wirkungsgrads und der Komplexität zu erreichen. Ein diskreter Treiber mit beschränkten Funktionen und mit einem Pegelwandler von 3,3 auf 12 V und einem zweistufigen CMOS-Puffer (Source:1,5 A und Sink: 2,5 A) wurde entwickelt. Obwohl die günstigsten Komponenten ausgewählt wurden, ist der gesamte Preis 20 Cent teuer als der von dem integrierten Treiber im Einsatz bei einer Bestellung mit der Stückzahl von 3000.



Der Gate-Treiber für eine Vollbrücke  
Gate-Driver of a single H-Bridge

## Feasibility of the discrete gate driver in terms of cost

The starting point of this study is the long delivery time for the integrated drivers, so the solution using a discrete gate driver needs to be considered and evaluated. But to achieve the same scale of functionalities of an integrated driver by using discrete components is impossible when considering the cost, efficiency, and complexity. A discrete driver with limited functions and consisting of a level-shifter from 3.3 V to 12 V and a two-stage-CMOS buffer (Source:1.5 A, Sink: 2.5 A) has been developed. Although the most cost-effective components have been selected, the total price is still 20 cents higher than the price of the integrated driver in use considering an order of 3000 parts.



Der Ein- und Ausschalttransient  
TurnOn- and TurnOff-Transients

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

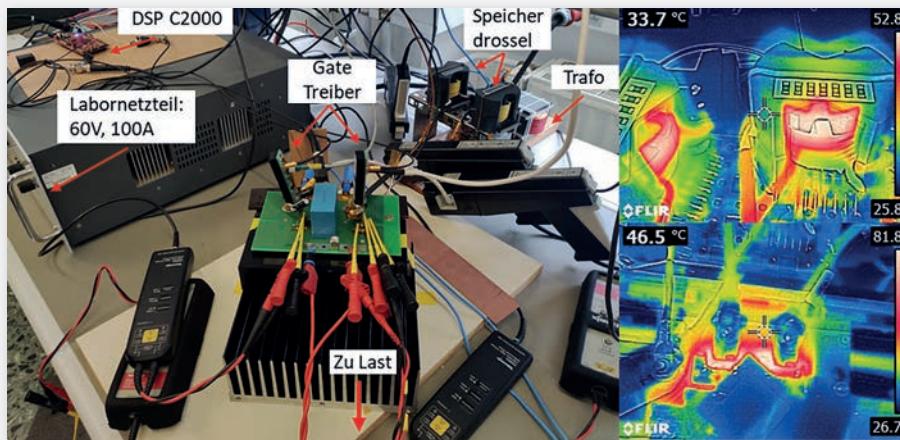
Bundesministerium für Bildung und Forschung unter dem  
Förderkennzeichen ME1KMU19/013

## H2-INTEGRATION IN ELEKTRISCHE ANTRIEBSSYSTEME (H2EASY)

**Entwicklung von multiphasen DC/DC-Wandler mit neuartigen magnetischen Komponenten zur Minimierung von Rückwirkungen auf Batterie und Brennstoffzelle**

## H2 INTEGRATION IN ELECTRIC DRIVE SYSTEMS (H2EASY)

**Development of multiphase DC/DC converters with novel magnetic components to minimize feedback on battery and fuel cell**



2-Phasen-Demonstrator, der im ersten Jahr des Projekts gebaut wurde (links), und die gemessene Temperatur bei einer Eingangsleistung von 3,6 kW für die Speicherdrösseln (oben rechts) und die Schalter (unten rechts)

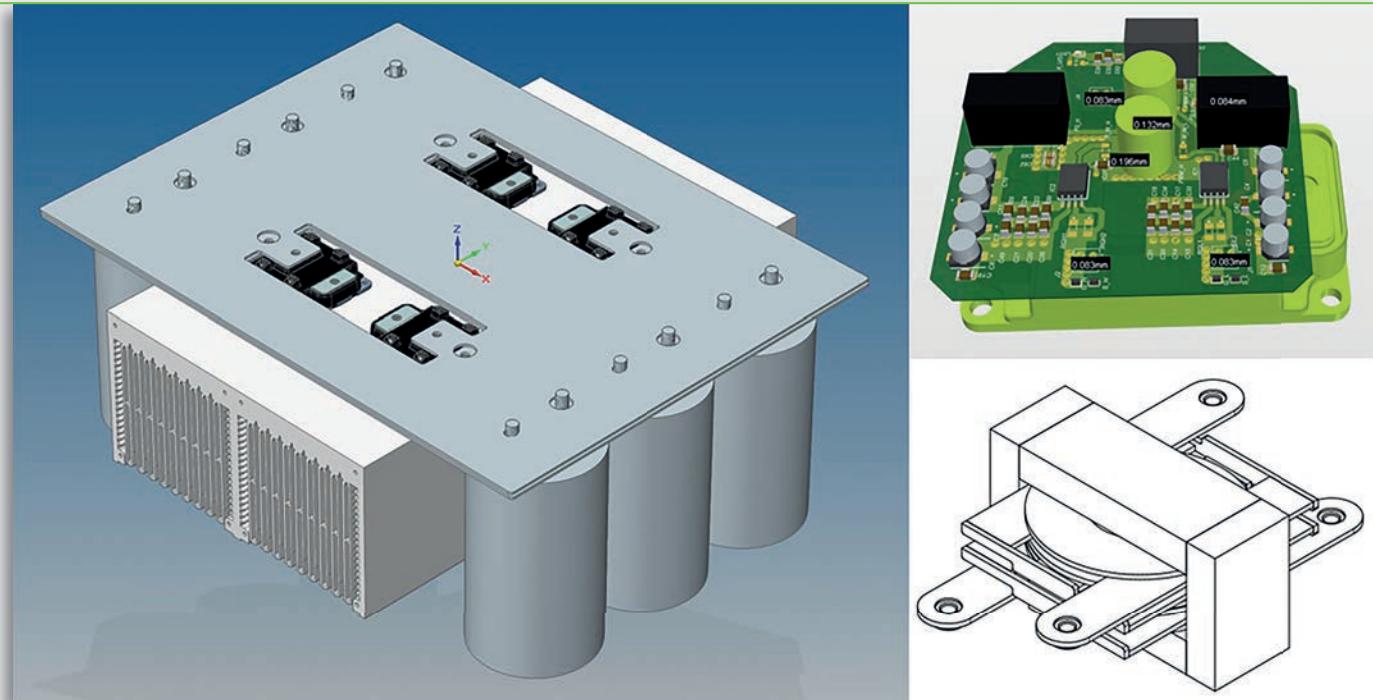
2 phase demonstrator build in the first year of the project (left), and the temperature measured for the input of 3,6 kW for the inductors (upper right) and switches (lower right)

Eine der Herausforderungen bei der Entwicklung von Elektrofahrzeugen auf Basis von Wasserstoff besteht in der langsamen Dynamik der Brennstoffzelle und der Minimierung des Stromrippels. Diese Aspekte können, wenn sie nicht angemessen durch eine geeignete Konverter-Topologie und Filter angegangen werden, die Wirksamkeit und Lebensdauer des Gesamtsystems beeinträchtigen. In den meisten Fällen wird durch passive Komponenten oder die Schaltfrequenz Einfluss auf das Stromrippel genommen. Während erst genanntes vor allem Einfluss auf das Gewicht und Volumen des Konverters nimmt, hat zweiteres vor allem Auswirkungen auf die Schaltverluste der Halbleiter.

Das Hauptziel des Projekts H2Easy ist es, einen Technologiedemonstrator eines Bordnetzwandlers der 100 kW-Klasse zu entwickeln. Der Wandler soll durch ein verbessertes Störverhalten gegenüber dem Brennstoffzellen-Stack und der Batterie bei gleichzeitigen verringerten Gewicht und Volumen überzeugen. Umgesetzt werden soll dies vor allem durch eine Trennung von DC- und AC-Fluss in den induktiven Hauptkomponenten. Vorteil dieser Idee ist es, die entsprechenden Bauteile gemäß ihrer Aufgabe optimal auszulegen. Erreicht wird dies über eine magnetische Kopplung mehrere Phasen und einer interleaved arbeitenden Ansteuerung der Halbleiter. Diese Konfiguration trägt zusätzlich zur Verkleinerung der Größe aller kapazitiven Komponenten bei und bietet Modularität und Skalierbarkeit für das endgültige Produkt.

*One of the challenges in developing hydrogen-based electric vehicles is the slow dynamics of the fuel cell and minimizing current ripple. These issues, if not adequately addressed by appropriate converter topology and filters, can compromise the effectiveness and lifetime of the overall system. In most cases, passive components or switching frequency influence current ripple. While the former mainly influences the weight and volume of the converter, the latter mainly impacts the switching losses of the semiconductors.*

*The main objective of the H2Easy project is to develop a technology demonstrator of an on-board converter in the 100 kW class. The converter is to convince by an improved interference behavior compared to the fuel cell stack and the battery with simultaneous reduced weight and volume. This is to be implemented primarily by separating the DC and AC flows in the main inductive components. The advantage of this idea is that the corresponding components can be optimally designed according to their task. This is achieved by magnetic coupling of several phases and interleaved control of the semiconductors. This configuration also helps to reduce the size of all capacitive components and provides modularity and scalability for the final product.*



Entwicklung des zweiten Demonstrators: 3D-Modell des 4-Phasen-Prototyps (links), 3D-Modell für die Gate-Treiber (oben rechts) und technische Zeichnung eines Koppeltransformators (unten rechts)

*Development of the second demonstrator: 3D model of the 4-phase prototype (left), 3D model for the switch drivers (upper right) and technical draw of the coupled transformer (lower right)*

Offiziell wurde das Projekt am 1. November 2021 begonnen und hat eine Laufzeit von drei Jahren. Zu Beginn des Projekts wurde der Fokus auf die Entwicklung der optimalen Konvertertopologie, und dem Design der magnetischen Komponenten gelegt. Dies geschah größtenteils auf simulativer Basis, aber mit den erworbenen Kenntnissen wurde auch ein 2-Phasen-Demonstrator als Beleg für die Machbarkeit des Ansatzes aufgebaut. Der Prototyp wurde dabei mit einer Eingangsleistung von 3,6 kW (30 A pro Phase bei 60 V Eingangsspannung) betrieben. Während der Tests erreichte die Gerätetemperatur nicht mehr als 82 °C sowie 55 °C für die Magnetika (Abbildung auf Seite 23). Die Ergebnisse zeigen zudem, dass aufgrund des geringen Stromrippeis vor allem die Wicklungsverluste der magnetischen Komponenten in den Fokus rücken.

Im weiteren Verlauf des Projekts ist ein zweiter Prototyp, nun mit 4 Phasen und 80 kW Nennleistung im Bau. Das 3D-Modell des geplanten Prototyps sowie ein Gate-Treiber und Koppeltransformator sind in der Abbildung oben dargestellt. Regelstrategien und Mechanismen zur Stromsymmetrie zwischen den Phasen werden in Zukunft diskutiert und die Optimierung der magnetischen Bauteile vorangetrieben.

*The project retrospectively started on November 1, 2021 and has a duration of three years. At the beginning of the project, the focus was on developing the optimal converter topology, and the design of the magnetic components. This was largely done on a simulative basis, but with the knowledge gained, a 2-phase demonstrator was also built as evidence of the feasibility of the approach. This involved running the prototype at an input power of 3.6 kW (30 A per phase at 60 V input voltage). During the tests, the device temperature did not reach more than 82 °C as well as 55 °C for the magnetics (Fig. page 23). The results also show that due to the low current ripple, the main focus is on the winding losses of the magnetic components.*

*As the project progresses, a second prototype, now with 4 phases and 80 kW rated power, is under construction. The 3D model of the planned prototype and a gate driver and coupling transformer are shown in the figure above. Control strategies and mechanisms for current symmetry between phases will be discussed in the future and optimization of the magnetic components will be advanced.*

Gefördert durch:



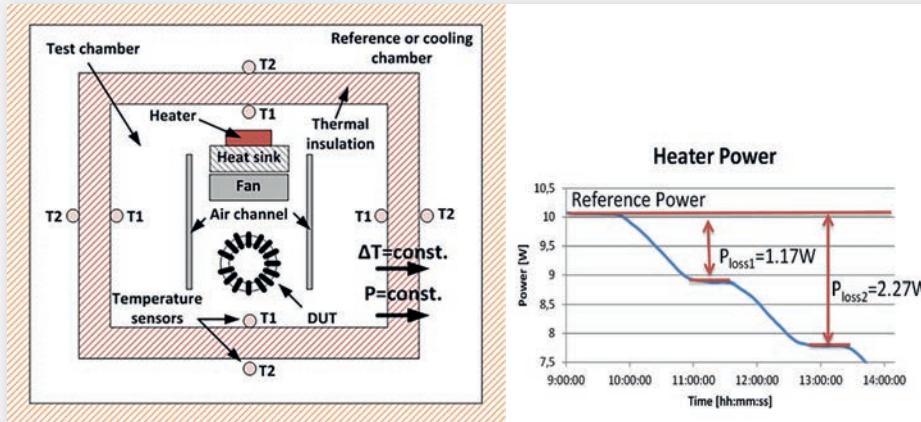
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



**Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur  
unter dem Förderkennzeichen 03B10110C**

## KALORIMETER FÜR VERLUSTLEISTUNGSMESSUNGEN

## CALORIMETRIC MEASUREMENT SETUP FOR POWER LOSS MEASUREMENTS)



Schematischer Aufbau des Kalorimeters (links) / Messprinzip (rechts)

Schematic structure of the calorimeter (left side) / measurement principle (right side)

Eine Herausforderung bei der Dimensionierung von neuartigen Komponenten ist es anfallende Verlustleistungen exakt zu bestimmen. In der Regel ist dies nur durch detaillierte Simulationen möglich, was jedoch bei komplexen Schaltungen oder auch nichtlinearen magnetischen Bauteilen eine anspruchsvolle und zeitaufwendige Aufgabe ist. Eine messtechnische Untersuchung bzw. Validierung angenäherter Simulationen bleibt daher unerlässlich.

Die Kalorimetrie beruht dabei nicht auf der Messung der Ein- bzw. Ausgangsgrößen des Prüflings, sondern auf der Messung der Leistung einer nicht vom Prüfling beeinflussbaren Heizung. Das Kalorimeter besteht aus einer äußeren (Klimaschrank) und inneren Box (Eigenkonstruktion). In beiden Boxen wird eine vorgegebene Temperatur erzeugt, sodass ein Temperaturgefälle von innerer Box in die äußere Box entsteht. Haben die Temperaturen konstante Werte (Steady State) erreicht, wird in der inneren Box der Prüfling zugeschaltet und durch einen Regler die entsprechende Heizleistung dieser Box reduziert. Der Regler stellt diese so ein, dass der ohne Prüfling eingestellte Steady State nun mit Prüfling wieder erreicht wird. Die Differenz aus den beiden Heizleistungen für die 2 Fälle der inneren Box ergibt gleich die Verlustleistung des Prüflings. Dadurch muss lediglich die Messung der Leistungen (Gleichspannung/-strom) der inneren Box sehr genau sein. Durch die Nutzung eines Klimaschranks bleibt zudem die äußere Temperatur sehr konstant, sodass ein guter Steady State erreicht werden kann.

Um eine gute und schnelle Bedienung des Kalorimeters zu ermöglichen, wurde mit Hilfe eines Raspberry Pi und der grafischen Programmiersoftware Node-RED eine einfache Steuerung aufgebaut. Zusätzlich konnte dank des Klimaschranks die Messgenauigkeit und auch der Messbereich deutlich erhöht werden, da in Vorgängermodellen mindestens Raumtemperatur als Referenztemperatur eingestellt werden musste.

*One challenge in the dimensioning of new types of components is to precisely determine the power losses that occur. As a rule, this can only be done by detailed simulations, which, however, is a demanding and time-consuming task for complex circuits or even nonlinear magnetic components. A metrological investigation or validation of approximated simulations therefore remains essential.*

*Calorimetry is not based on the measurement of the input or output quantities of the device under test, but on the measurement of the power of a heater which cannot be influenced by the device under test. The calorimeter consists of an outer (climatic chamber) and inner box (own construction). A given temperature is generated in both boxes, so that a temperature gradient is created from the inner box to the outer box. When the temperatures have reached constant values (steady state), the test specimen is switched on in the inner box and the corresponding heating power of this box is reduced by a controller. The controller adjusts this so that the steady state set without the test specimen is now reached again with the test specimen. The difference between the two heating powers for the 2 cases of the inner box equals the power loss of the DUT. Thus, only the measurement of the power (DC voltage/ current) of the inner box must be very accurate. Furthermore, by using a climatic cabinet, the outer temperature remains very constant, so that a good steady state can be achieved.*

*To enable a good and fast operation of the calorimeter, a simple control system was built using a Raspberry Pi and the graphical programming software Node-RED. In addition, thanks to the climatic chamber, the measurement accuracy and also the measurement range could be significantly increased, since in previous models at least room temperature had to be set as the reference temperature.*

Ansprechpartner

AHMAD ALI NAZERI, M.SC. (EVS)

Titel

# LCL-GEFILTERTER NETZGEKOPPELTER UMRICHTER UNTER SCHWACHEN NETZBEDINGUNGEN

title

# LCL-FILTERED GRID-CONNECTED CONVERTER UNDER WEAK GRID CONDITIONS

Das europäische Verbundnetz ist trotz steigender Herausforderungen der letzten Jahre, sowie harter Bewährungsproben (z. B. starker Netzfrequenzabfall am 08. Januar 2021) als ein stabiles Netz anzusehen. Gerade aber bei schwachen Netzen bzw. langen und stark belasteten Verbindungswegen ist die Netzsynchronisation von am Netz angeschlossener Leistungselektronik teilweise eine Herausforderung.

Die traditionelle PI-Regelung kann im dq-Rahmen parallel zur Multi-Resonanz-Regelung im  $\alpha\beta$ -Rahmen mit der Vorwärtsregelung der Netzspannung für dreiphasige netzgekoppelte Spannungszwischenkreiskonverter verwendet werden. Ein Multi-Resonanz-Regler (MR-Regler) für die  $\alpha$ - und  $\beta$ -Achse wird dabei für die Oberwellenkompensation eingesetzt. In der Arbeit von Ahmad Nazeri wurde ein Proportional-Resonanz-Regelungsschema mit Multi-Resonanz-Regler im  $\alpha\beta$ -Rahmen untersucht und weiterentwickelt. Diese Form der Netzsynchronisation ermöglicht die automatische Anpassung der Netzspannungsfrequenz  $\omega^*$ , die vom Phasenregelkreis (Phase-Locked-Loop / PLL) für die Netzfrequenzanpassung erhalten wird. Der Resonanzregler wird dabei mit zwei Integratoren mit einer Verstärkung  $n$ -ter harmonischer Ordnung von  $K_{in}$  realisiert.

Das Gesamtsystem und die vorgeschlagenen Regler wurden in einem in MATLAB/Simulink implementierten System pro Einheit entworfen und experimentell auf einem dreiphasigen CoolSiC-MOSFET eines 7,5-kW-Wechselrichters sowie digital auf dem 32-Bit-Fließkomma-DSP TMDSDOCK28379D implementiert. Der zeitdiskrete PI-Regler im dq-Rahmen wurde mit der Rückwärts-Differenz-Approximation implementiert, während der MR-Regler mit der Vorwärts- und Rückwärts-Euler-Methode diskretisiert wurde. Der PMR-Regler wurde mit Hilfe der vorgewölbten bilinearen (Tustin-)Transformation diskretisiert, um eine ähnliche Charakteristik zwischen dem kontinuierlichen und dem zeitdiskreten Bereich zu gewährleisten. Die PI-MR- und PMR-Regler wurden unter Verwendung der direkten Form-II-Transformation (DFII<sub>lt</sub>) implementiert.

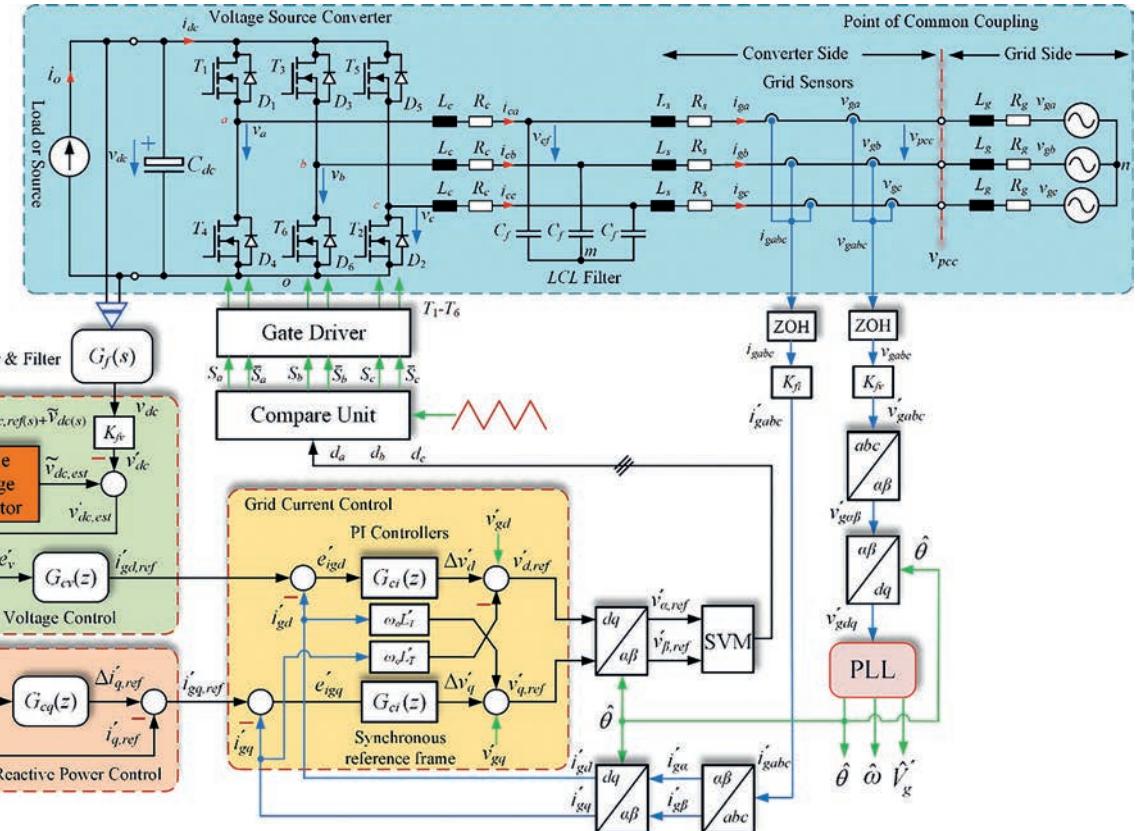
Der abgebildete zeitliche Verlauf zeigt das experimentelle Einstufigverhalten des PI-MR-Reglers (links), während rechts die experimentelle diskrete Implementierung des modifizierten PMR-MR-Reglers unter hochgradig nichtlinearer Last abgebildet ist. Es ist eine deutliche Verbesserung des Laststromes erkennbar.

*The European interconnected grid can be considered as a stable grid despite increasing challenges during the last years, as well as hard tests (e.g. strong grid frequency drop on 08 January 2021). However, especially in weak grids or long and heavily loaded interconnection paths, grid synchronization of power electronics connected to the grid is sometimes a challenge.*

*Traditional PI control can be used in parallel with multi-resonance control in the dq-frame in the  $\alpha\beta$ -frame with the forward regulation of the grid voltage for three-phase grid-connected voltage dc-link converters. A multi-resonance (MR) controller for the  $\alpha$ - and  $\beta$ -axis is used for harmonic compensation in this case. In the work of Ahmad Nazeri, a proportional-resonance control scheme with multi-resonance controller in the  $\alpha\beta$ -frame was investigated and further developed. This form of grid synchronization allows automatic adjustment of the grid voltage frequency  $\omega^*$  obtained from the phase-locked loop (PLL) for grid frequency adjustment. Here, the resonant controller is implemented using two integrators with an  $n$ th harmonic order gain of  $K_{in}$ .*

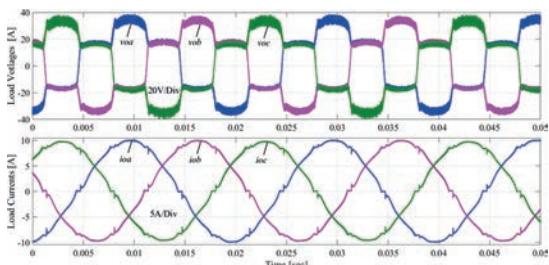
*The overall system and the proposed regulators were designed in a per-unit system implemented in MATLAB/Simulink and experimentally implemented on a three-phase CoolSiC MOSFET of a 7.5-kW inverter and digitally on the 32-bit floating-point DSP TMDSDOCK28379D. The discrete-time PI controller in the dq frame was implemented using the backward difference approximation, while the MR controller was discretized using the forward and backward Euler methods. The PMR controller was discretized using the convex bilinear (Tustin) transform to ensure similar characteristics between the continuous and discrete-time domains. The PI-MR and PMR controllers were implemented using the direct form II transform (DFII<sub>lt</sub>).*

*The plotted time response shows the experimental transient response of the PI-MR controller (left), while the experimental discrete implementation of the modified PMR-MR controller under highly nonlinear load is shown on the right. A significant improvement in the load current can be seen.*

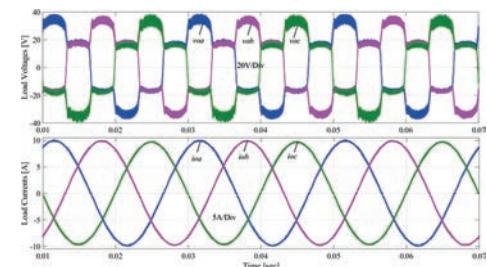


Regelstruktur eines dreiphasigen LCL-gefilterten netzgekoppelten Spannungsquellenumrichters (VSC)

Control structure of a three-phase LCL-fed grid-connected voltage source converter (VSC)



a)



b)

Experimentelles Verhalten des dreiphasigen FU bei stark nichtlinearer Last; (a) PI-Regler, (b) PMR-MR-Regler  
 Experimental behavior of the three-phase VSD under highly nonlinear load; (a) PI controller, (b) PMR-MR controller

Ansprechpartner

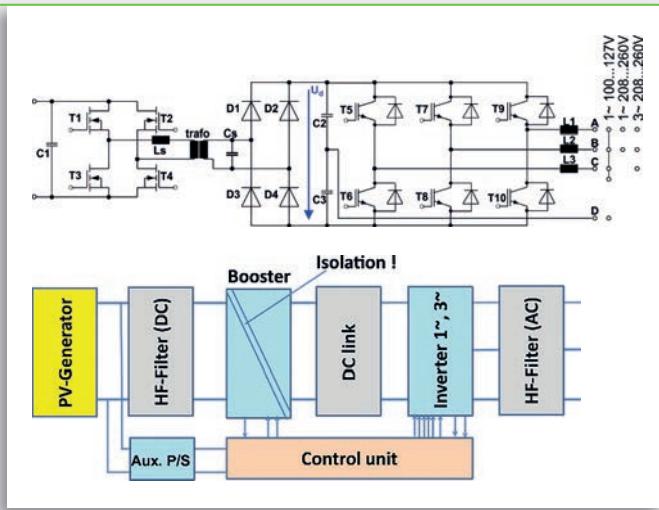
PROF. DR.-ING. HABIL. PETER ZACHARIAS (EVS)

Titel

## TEILNAHME AM INTERNATIONAL FUTURE ENERGY CHALLENGE (IFEC) GEMEINSAM MIT DER MAX-EYTH-SCHULE KASSEL

title

## PARTICIPATION IN THE INTERNATIONAL FUTURE ENERGY CHALLENGE (IFEC) TOGETHER WITH THE MAX-EYTH-SCHULE KASSEL



Planung des Gesamtsystems

Planning of the entire system

Im Studienjahr 2021/22 initiierte das Fachgebiet EVS die Teilnahme von Studenten unterhalb des Bachelorabschlusses gemeinsam mit Schülern der Max-Eyth-Schule Kassel am IFEC-Wettbewerb. Aufgabe war der Bau eines PV-Wechselrichters (1kW) mit der Anschlussmöglichkeit an das 1-phasige oder 3-phäische Netz. Außerdem sollten in Abhängigkeit von Spannung und Frequenz die Lieferung von Blindleistung und Wirkleistung als netzdienliche Leistungen implementiert sein. Die Spannweite der Aufgaben umfasste Schaltungsentwurf, Bauelementauslegungen, Aufbau einer potentialgetrennten Hilfsstromversorgung, Leiterplattenentwurf und -bestückung sowie Regelung und Betriebsführung des netzgekoppelten Geräts und das Gerätedesign. Als Ergebnis wurden 3 Bachelorarbeiten eingereicht. An der Max-Eyth-Schule wurde die Teilnahme im Rahmen des Leistungskurses Elektrotechnik ermöglicht.

### UNIKASSEL VERSITÄT

Luca Satzinger  
Abdulkader Zabarah  
Pascal Mergard  
Jia Liu  
Lars Albert  
Rafael Feierabend

Bsc 4/2022  
Bsc x/2022  
Bsc x/2022  
Bsc x/2022  
Bsc x/2022  
Bsc x/2022



### MES Max Eyth Schule

Paul Hansmann  
Nils Reichert  
Marlon Waitz  
Baris Kara  
Laurenz Dülffer



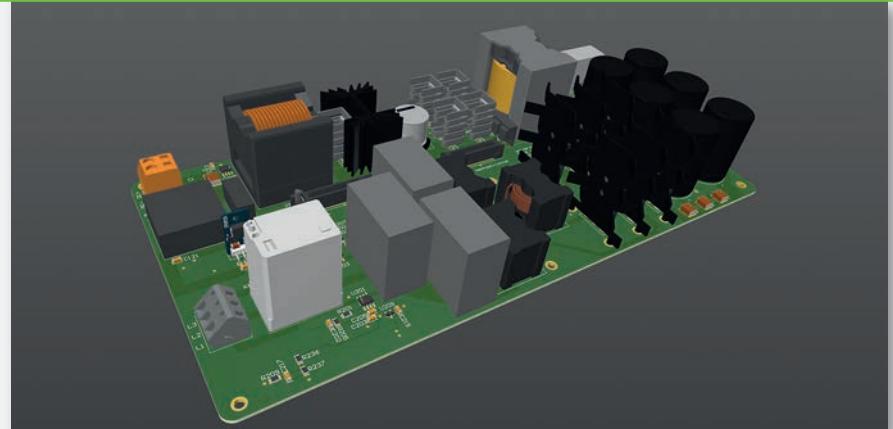
*In the academic year 2021/22, the EVS department initiated the participation of students below the bachelor degree together with pupils of the Max-Eyth-Schule Kassel in the IFEC competition. The task was to build a PV inverter (1kW) with the possibility of connection to the 1-phase or 3-phase grid. In addition, the supply of reactive power and active power was to be implemented as grid-supporting services depending on voltage and frequency. The range of tasks included circuit design, component designs, construction of a potential-separated auxiliary power supply, printed circuit board design and assembly as well as control and operation management of the grid-connected device and the device design. As a result, 3 bachelor theses were submitted. At the Max-Eyth-Schule, participation was made possible as part of the advanced course in electrical engineering.*



Geplantes Gehäuse

Planned housing

3D-Ansicht des konsolidierten IEEE-IFEC-Demonstrators der Uni Kassel  
*3D view of the consolidated IEEE-IFEC demonstrator at the University of Kassel*



Da es unser Team dieses Mal leider nur bis ins Halbfinale geschafft hat, sollte das Projekt dennoch im Rahmen von Abschlussarbeiten zu Ende gebracht werden. Hierzu wurde die Stromregelung, MPP-Tracker und Netzsynchronisation von Herrn Rafael Feierabend, sowie die Wechselrichter-Stufe von Herrn Luca Satzinger erfolgreich aufgebaut und getestet. Im Rahmen der Bachelorarbeit von Herrn Lars Albert wurden beide Teile, sowie die verbleibenden Baugruppen (DC/DC-Wandler und Serien-Resonanz-Konverter) auf einer Platine zusammengefasst.

Um für die eigentliche Wechselrichter-Stufe eine stabile Spannung sicherstellen zu können, wird die schwankende Eingangsspannung der Photovoltaikzellen zunächst über einen DC/DC-Wandler mit integriertem MPP-Tracker angehoben. Nach dem Hochsetzsteller wird eine hochfrequente Wechselspannung für den selbstentwickelten Hochfrequenz-Transformator erzeugt, der die Spannung sowohl galvanisch trennt und zudem um den Faktor 5 anhebt. Zur Steigerung der Effizienz wurde statt einer Rechteck-Spannung ein Serien-Resonanz-Konverter bestehend aus der Streuinduktivität des HF-Transformators und eines geeigneten Kondensators am Ausgang des Wandlers gebildet.

Mit Auslegung der Ein- und Ausgangsfilter sowie der Kühlkörper wurde der Wechselrichter fertig konzeptioniert und es folgte das Design der zusammengefassten Platine. Um die Anforderung an ein möglichst geringes Bauvolumen zu erfüllen, wurde hierfür eine vierlagige Leiterkarte entworfen. Diese und sämtliche Bauteile erhielten ein maßstabsgetreues 3D-Modell, um eine hohe Dichte ohne Bauteilkollisionen zu erreichen. Gerade für die Positionierung der Kühlkörper erwies sich das Modell als sehr vorteilhaft.

Trotz des Ausscheidens des Teams der Uni Kassel konnten somit im Rahmen des Projekts drei Abschlussarbeiten erfolgreich abgeschlossen werden und Know-How im Bereich hochkompakter PV-Wechselrichter mit zahlreichen Zusatzfunktionen gewonnen werden.

*Since our team unfortunately only made it to the semi-finals this time, the project was still to be completed as part of the final project. For this purpose, the current control, MPP tracker and grid synchronization of Mr. Rafael Feierabend, as well as the inverter stage of Mr. Luca Satzinger were successfully built and tested. Within the scope of the bachelor thesis of Mr. Lars Albert, both parts, as well as the remaining assemblies (DC/DC converter and series resonant converter) were combined on one board.*

*In order to ensure a stable voltage for the actual inverter stage, the fluctuating input voltage of the photovoltaic cells is first boosted via a DC/DC converter with integrated MPP tracker. After the boost converter, a high-frequency AC voltage is generated for the self-developed high-frequency transformer, which both galvanically isolates the voltage and also boosts it by a factor of 5. To increase efficiency, a series resonant converter consisting of the leakage inductance of the RF transformer and a suitable capacitor at the output of the converter was formed instead of a square-wave voltage.*

*With design of the input and output filters and the heat sinks, the inverter was finalized and the design of the summarized PCB followed. In order to meet the requirement for the smallest possible construction volume, a four-layer circuit board was designed for this purpose. This and all components were given a true-to-scale 3D model in order to achieve a high density without component collisions. Especially for the positioning of the heat sinks, the model proved to be very advantageous.*

*Despite the withdrawal of the team from the University of Kassel, three final theses were thus successfully completed as part of the project and know-how in the field of highly compact PV inverters with numerous additional functions was gained.*

Ansprechpartner

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

title

**PROJEKT ELEKTROBOOT „EBOOT“**

title

**PROJECT ELECTRIC BOAT "EBOOT"**

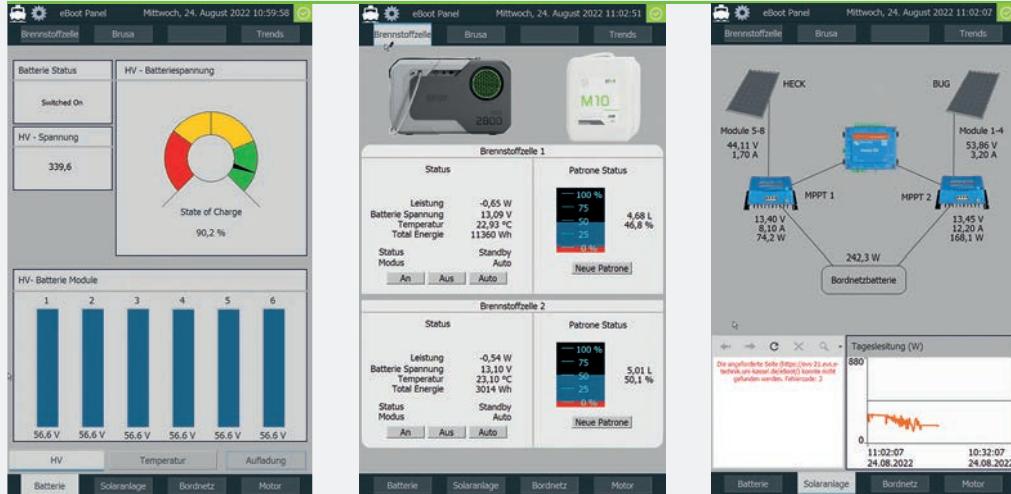
Boot: „SolarElectric-Ahoi!“, NL, Baujahr 2009; L: 10,65 m; B: 2,55 m; T: 0,65m

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. Für die nachhaltige Mobilität an Bord sorgt ein original elektrisches Antriebssystem aus dem VW ID 3, welches mit geringen Getriebeänderungen zur Verfügung gestellt wurde. Im Wasser übersetzt ein optimierter Propeller diese Antriebskraft und sorgt für einen enormen Antriebsschub. Die Photovoltaikanlage und zwei Direktmethanol Brennstoffzellen versorgen über einen DC/DC Wandler die Antriebsbatterie zusätzlich mit Energie. Weiterhin wurde ein Range Extender eingebaut, der zur Reichweiterhöhung dient. Auf dem Boot galt es folgende Haupt-Komponenten miteinander zu verbinden: Photovoltaik-Anlage (880 Wp), Speicherbatterie (30 kWh), Elektroantrieb, 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) was to convert a boat (see pictures, Rapsody R29) of a common boat class to electric propulsion for demonstration purposes. The project was supported by the office Yachtconsulting Michael Meister.*

*The task of KDEE/EVS was to design and build up the communication between the individual components of the propulsion and control system. An original electric drive system from the VW ID 3, which was provided with minor transmission modifications, ensures sustainable mobility on board. In the water, an optimized propeller overrides this propulsive power and provides an enormous propulsive thrust. The photovoltaic system and two direct methanol fuel cells supply the drive battery with additional energy via a DC/DC converter. Furthermore, a range extender was installed to increase the range. The following main components had to be connected on the boat: Photovoltaic system (880 Wp), storage battery (30 kWh), electric drive, on-board power supply and boat control system. For this purpose, in addition to a 12 VDC rail (standard equipment in the boat), a 320 V rail (battery, e-drive) was also set up. The entire control system was implemented realized with the help of a Siemens PLC.*



Entwickelte grafische Bedienoberfläche  
Developed graphical user interface

Durch einen neuen Z-Antrieb mit veränderter Getriebeübersetzung (1:68) der im vergangenen Jahr eingebaut wurde, ist der gegenläufige Duo Propeller optimal an den Elektroantrieb angepasst. Dadurch ist die erforderliche Propellerdrehzahl mit der Leistungsfähigkeit des Elektroantriebs im Wasser optimal ausgeschöpft, auch in Bezug auf die erreichte maximale Geschwindigkeit und Beschleunigung.

Um die Ladezeiten der Antriebsbatterie zu verkürzen ist ein weiteres Ladegerät im Boot integriert worden, damit kann das Boot nun in ca. 2,5 h vollständig aufgeladen werden. Die Ladesituation kann im Boot an die Versorgungslage an Land angepasst werden, da nicht überall ausreichend Leistung zur Verfügung gestellt werden kann.

Eine weitere Veränderung ist die elektronische Steuerung mit dem Aktuator welche im Zusammenspiel mit dem neuen Fahrhebel die nicht mehr über einen Bowdenzug für die Umsteuerung im Getriebe sorgt (Vorwärts, Neutral, Rückwärts) sondern auch die Drehzahlvorgabe elektronisch an die Steuerung umsetzt und weiter gibt.

Im vergangenen Jahr sind auch optisch einige Veränderungen am Boot erfolgt. Die Persenning (Wasserfeste Abdeckung) ist komplett überarbeitet worden. Im Boot ist jetzt eine bessere räumliche Nutzung gegeben, dass Solardach mit der Persenning bildet nun eine Einheit und hat das äußere Erscheinungsbild optisch deutlich aufgewertet.

Nicht zu vergessen ist noch, dass die Rapsody nun auch einen Namen bekommen hat, dass Boot heißt nun „SolarElectric-Ahoy!“

### Ausblick:

In der Saison 2023 wird das Boot mit weiteren Features ausgestattet: Kartenplotter mit Active-Imaging (Abbild der Unterwasserstruktur) im Display und Routenplanung, seitlich angebrachte Kameras zur Unterstützung beim Anlegen, ein autarker DC/DC Wandler, der die Antriebsbatterie während der Liegezeiten nachlädt.

*Due to a new Z-drive with modified gear ratio (1:68) which was installed last year, the counter-rotating duo propeller is optimally adapted to the electric drive. This means that the required propeller speed is optimally exploited with the performance of the electric drive in the water, also in terms of the maximum speed and acceleration achieved.*

*To shorten the charging times of the drive battery, another charger has been integrated in the boat, so that the boat can now be fully charged in approx. 2.5 hrs. The charging situation in the boat can be adapted to the supply situation on land, since sufficient power cannot be provided everywhere.*

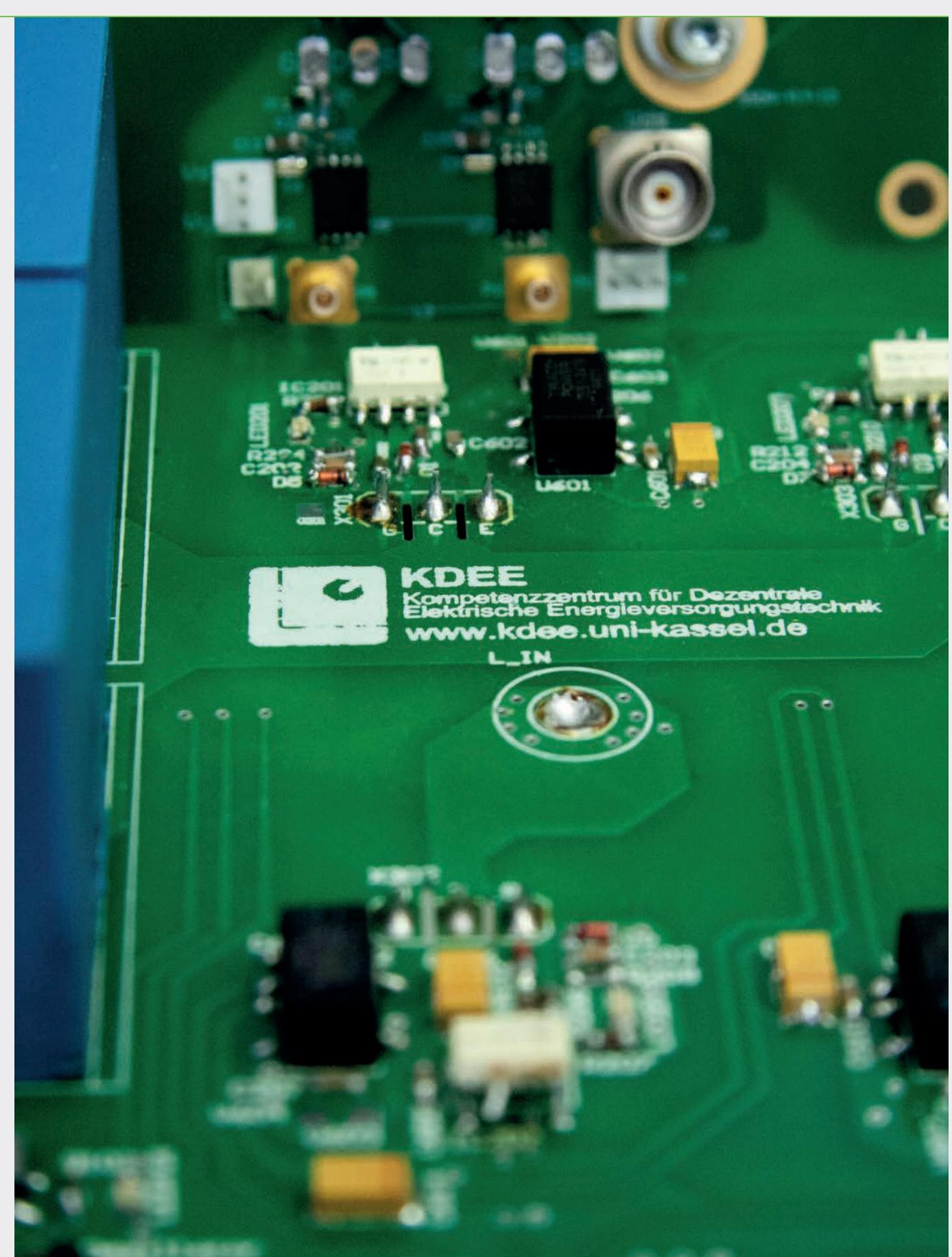
*Another change is the electronic control system with the actuator which, in conjunction with the new drive lever, no longer uses a Bowden cable to control the transmission (forward, neutral, reverse) but also electronically converts and passes on the speed setting to the control system.*

*In the past year also optically some changes at the boat took place. The tarpaulin (waterproof cover) has been completely redesigned. In the boat is now a better spatial use given, that solar roof with the Persenning forms now a unit and has the outer appearance optically clearly upgraded.*

*Not to forget that the Rapsody has now also got a name, the boat is now called "SolarElectric Ahoy!"*

### Outlook:

*In the 2023 season, the boat will be equipped with additional features: chart plotter with active imaging (image of the underwater structure) in the display and route planning, side-mounted cameras to assist with mooring, a stand-alone DC/DC converter that recharges the drive battery during mooring times.*





Energiemanagement und  
Betrieb elektrischer Netze

Ansprechpartner

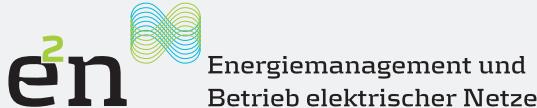
PROF. DR.-ING. MARTIN BRAUN (e<sup>2</sup>n)

Titel

## DAS FACHGEBIET ENERGIEMANAGEMENT UND BETRIEB ELEKTRISCHER NETZE (e<sup>2</sup>n)

title

## DEPARTMENT OF ENERGY MANAGEMENT AND POWER SYSTEM OPERATION (e<sup>2</sup>n)



Das Fachgebiet Energiemanagement und Betrieb elektrischer Netze (e<sup>2</sup>n) 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 resilienteres Systemverhalten im Fehlerfall und für den Netzwiederaufbau
- Wechselwirkungen mit anderen Energieinfrastrukturen (Gas- und Wärmenetze)

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 Zu-

*The Department of Energy-Management and Power System Operation (e<sup>2</sup>n) 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*
- *Interactions with other energy infrastructures (gas and heat networks)*

*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.*

*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.*

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

▪ <b>Berechnung elektrischer Netze</b>	Prof. Dr.-Ing. Martin Braun
▪ <b>Planung und Betriebsführung elektrischer Netze</b>	Prof. Dr.-Ing. Martin Braun
▪ <b>Intelligente Stromnetze</b>	Prof. Dr.-Ing. Martin Braun
▪ <b>Energiewandlungsverfahren</b>	Prof. Dr.-Ing. Martin Braun
▪ <b>Photovoltaik Systemtechnik (Teil 1 und 2)</b>	Prof. Dr.-Ing. Martin Braun
▪ <b>Power System Dynamics</b>	Prof. Dr.-Ing. Martin Braun
▪ <b>Energiemanagement in Gebäuden</b>	Prof. Dr.-Ing. Martin Braun
▪ <b>Seminar Intelligente Stromnetze</b>	Prof. Dr.-Ing. Martin Braun
▪ <b>Softwarepraktikum Netzsimulation</b>	Prof. Dr.-Ing. Martin Braun
▪ <b>Softwarepraktikum pandapower</b>	Prof. Dr.-Ing. Martin Braun
▪ <b>Praktikum Photovoltaik</b>	Prof. Dr.-Ing. Martin Braun und Dipl.-Ing. Bernd Gruß
▪ <b>Energietechnisches Praktikum I/II</b>	Prof. Dr.-Ing. Martin Braun und Dipl.-Ing. Bernd Gruß
▪ <b>(PV-Batterie-)Systeme im Insel- und Netzparallelbetrieb</b>	

sammenarbeit 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.

**Unsere Forschungsaktivitäten sind in acht Forschungsgruppen gemeinsam mit dem Fraunhofer IEE organisiert:**

- Planung Übertragungsnetze
- Planung Verteilnetze
- Netzwirtschaft
- IT-Systeme Netzführung
- Methoden optimierter Betriebsführung
- Dezentrale Netzautomatisierung
- Energemeteorologie und Geoinformationssysteme
- Netzdynamik

Forschungsprogramm e<sup>2</sup>n  
*Research program e<sup>2</sup>n*



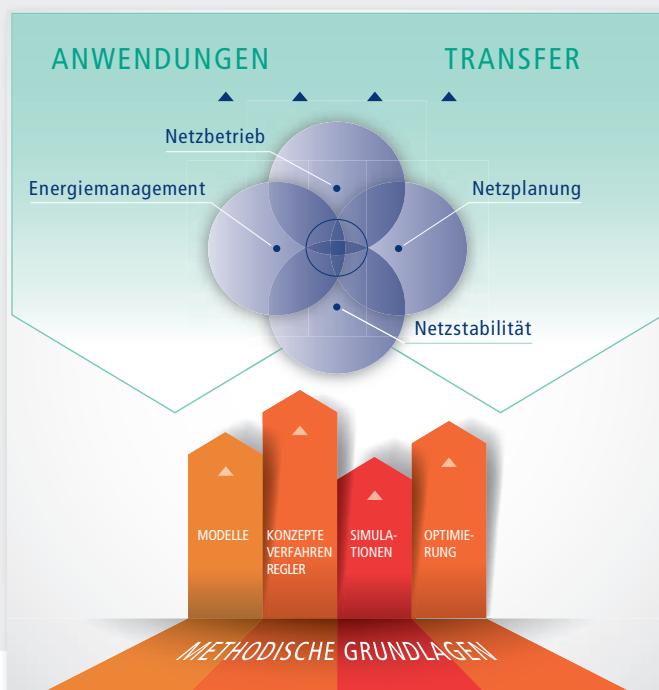
Prof. Dr.-Ing. Martin Braun  
Leiter des Fachgebietes e<sup>2</sup>n

Bereichsleiter Netzplanung und Netzbetrieb  
am Fraunhofer IEE

▪ <b>Berechnung elektrischer Netze</b>	Prof. Dr.-Ing. Martin Braun
▪ <b>Planung und Betriebsführung elektrischer Netze</b>	Prof. Dr.-Ing. Martin Braun
▪ <b>Intelligente Stromnetze</b>	Prof. Dr.-Ing. Martin Braun
▪ <b>Energiewandlungsverfahren</b>	Prof. Dr.-Ing. Martin Braun
▪ <b>Photovoltaik Systemtechnik (Teil 1 und 2)</b>	Prof. Dr.-Ing. Martin Braun
▪ <b>Power System Dynamics</b>	Prof. Dr.-Ing. Martin Braun
▪ <b>Energiemanagement in Gebäuden</b>	Prof. Dr.-Ing. Martin Braun
▪ <b>Seminar Intelligente Stromnetze</b>	Prof. Dr.-Ing. Martin Braun
▪ <b>Softwarepraktikum Netzsimulation</b>	Prof. Dr.-Ing. Martin Braun
▪ <b>Softwarepraktikum pandapower</b>	Prof. Dr.-Ing. Martin Braun
▪ <b>Praktikum Photovoltaik</b>	Prof. Dr.-Ing. Martin Braun und Dipl.-Ing. Bernd Gruß
▪ <b>Energietechnisches Praktikum I/II</b>	Prof. Dr.-Ing. Martin Braun und Dipl.-Ing. Bernd Gruß
▪ <b>(PV-Batterie-)Systeme im Insel- und Netzparallelbetrieb</b>	

***Our research activities are organized in eight research groups together with Fraunhofer IEE:***

- *Transmission System Planning*
- *Distribution System Planning*
- *Network Economics*
- *IT Systems Grid Operation*
- *Methods for Optimized Grid Operation*
- *Decentralized Grid Automation*
- *Energy Meteorology and Geoinformation Systems*
- *Network Dynamics*



Ansprechpartner

DR. LARS-PETER LAUEN: FLORIAN HIRSCHMANN, M.SC. (e<sup>2</sup>n)

Titel

**ANaPlan PLUS**

title

**ANaPlan PLUS**

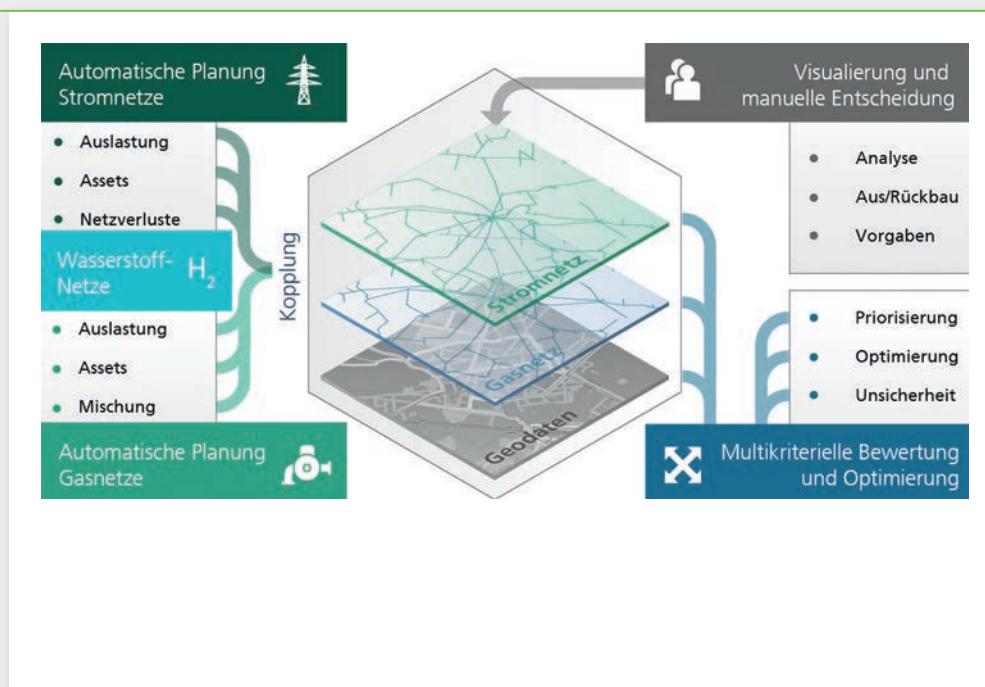
### **ANaPlan Plus: Automatisierte Netzausbauplanung für die kombinierte Betrachtung von Strom- und Gasnetzen unter Einbeziehung von Wasserstoff**

Ziel des Projekts ANaPlan Plus ist die Identifikation von Optimierungspotenzialen im Bereich der Energienetze unter Berücksichtigung neuer Freiheitsgrade aus der sparten- und sektorenübergreifenden Betrachtung. Kernelement ist eine Methodik zur integralen Infrastrukturplanung, um die Anpassung von Versorgungsnetzen für Strom, Erdgas sowie Biomethan und Wasserstoff an komplexe Zukunftsszenarien mit digitaler Unterstützung beherrschbar zu machen.

### **ANaPlan Plus: Automated grid expansion planning for the combined assessment of power and gas grids considering hydrogen**

*ANaPlan Plus aims to identify the optimization potential in energy grids, considering new degrees of freedom from the cross-sectoral view. The core element is a methodology for integral infrastructure planning with digital support. With this, electricity and natural gas supply grids can be adapted to complex future scenarios.*

*In addition to considering grid expansion measures in the individual energy grids, the possibility of conversion measures or a combined expansion of several energy grids will also be considered. For this purpose, the open-source tools pandapower and pandapipes, jointly developed by Fraunhofer IEE and the University of Kassel, as well as the closed-source tool pandaplan will be used and further developed.*



Schema der integralen Infrastrukturplanung im Projekt ANaPlan Plus  
*Scheme of integral infrastructure planning in the ANaPlan Plus project*

Neben der Betrachtung von Netzausbaumaßnahmen in den einzelnen Energienetzen soll auch die Möglichkeit von Umbaumaßnahmen oder einem kombinierten Ausbau mehrerer Energienetze betrachtet werden. Dafür werden die Open-Source-Tools pandapower und pandapipes, die gemeinsam von Fraunhofer IEE und der Universität Kassel entwickelt wurden, sowie das Closed-Source-Tool pandaplan genutzt und weiterentwickelt.

Die Arbeiten der Universität Kassel fokussieren sich insbesondere auf die Erweiterung der im Vorgängerprojekt ANaPlan entwickelten Stromnetzausbauplanung und sollen diese beispielsweise um die Möglichkeit ergänzen, Bodenbeschaffenheiten und andere GIS-basierte Daten bei der Netzausbauplanung zu berücksichtigen.

Eine zusätzliche Erweiterung für die Strom- und Gasnetzausbauplanung stellt die multikriterielle Bewertung dar, bei der mehrere Aspekte wie beispielsweise Ausbaukosten und Versorgungszuverlässigkeit gleichzeitig optimiert werden sollen.

Die im Projekt entwickelten Methoden und Erweiterungen werden an realen Netzdaten der Projektpartner getestet und validiert.

*The work of the University of Kassel focuses on extending the power grid expansion planning developed in the predecessor project ANaPlan and is intended to supplement it, for example, with the possibility of considering ground conditions and other GIS-based data in grid expansion planning.*

*An additional extension for power and gas grid expansion planning is the multi-criteria evaluation, in which several aspects such as expansion costs and supply reliability are to be optimized simultaneously.*

*The methods and extensions developed in the project are tested and validated on real grid data of the project partners.*

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

**Gefördert durch: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz unter  
dem Förderkennzeichen 03EI4032B**

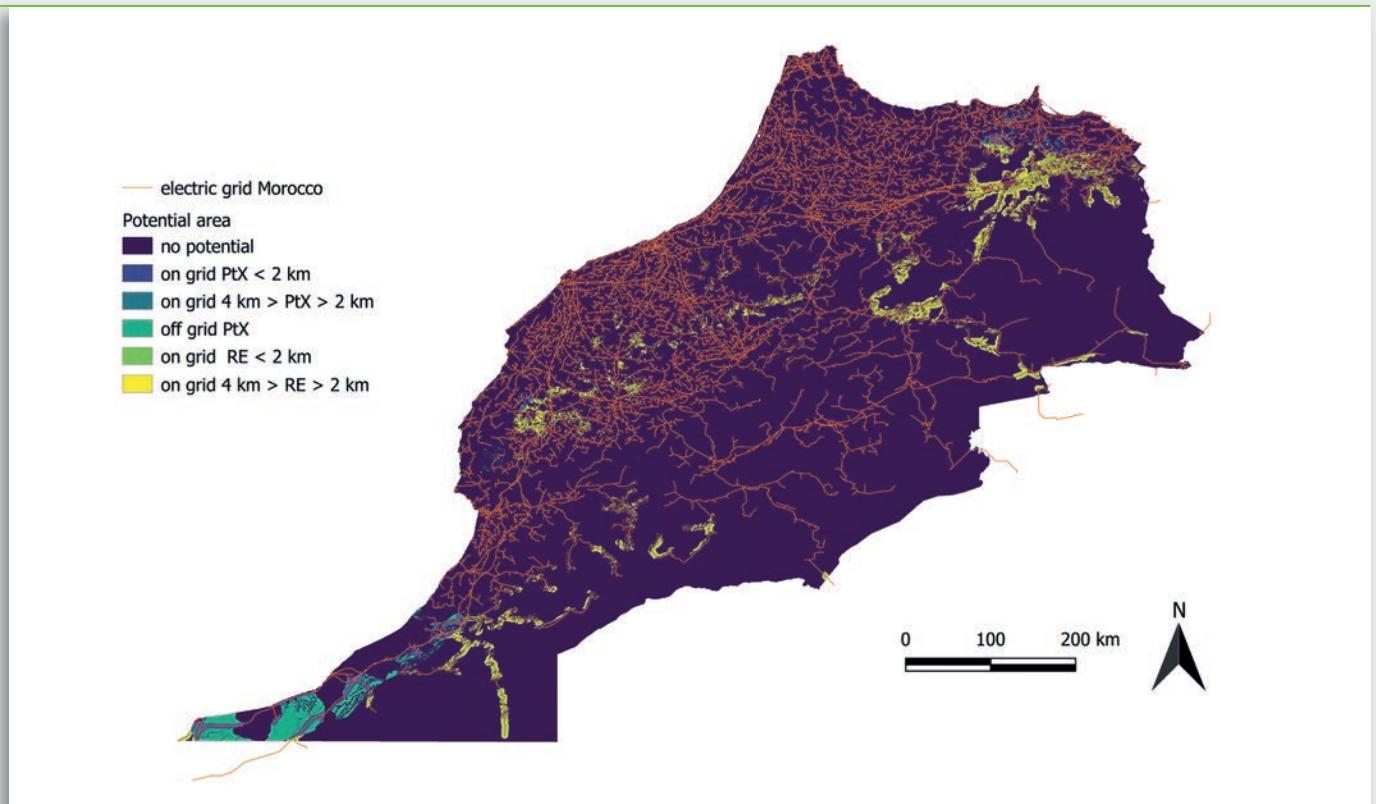
Ansprechpartner

BENEDIKT HÄCKNER, M.SC.; DR. RER. NAT. JAN DOBSCHINSKI (e<sup>2</sup>n)

Titel

**DeV-KopSys-2**

title

**DeV-KopSys-2**

Erste Ergebnisse der neuen Potentialflächenanalyse für das Fokusland Marokko  
*First results of the new potential area identification for the focus country of Morocco*

### **DeV-KopSys-2: Dekarbonisierung Verkehr – Rückkopplungen Energiesystem – global bis regional**

Das wissenschaftliche Ziel des Vorhabens DeV-KopSys-2 ist es, vor dem Hintergrund der Wechselwirkungen der Dekarbonisierung des Verkehrssektors mit anderen Entwicklungen die Rolle einzelner Technologieoptionen (z. B. Elektromobilität, PtX-Kraftstoffe) zur Erreichung der Klimaziele im Verkehr mithilfe modellbasierter Szenarien zu untersuchen. Von besonderem Interesse sind Bandbreiten globaler PtX-Exportpotenziale bis zum Jahr 2045/2050, Rahmenbedingungen des Strom- und Gasmarktes auf europäischer Ebene und der Ausbau der Stromnetze in Deutschland in Hinblick auf Elektromobilität und den Ausbau Erneuerbarer Energien auf regionaler Ebene.

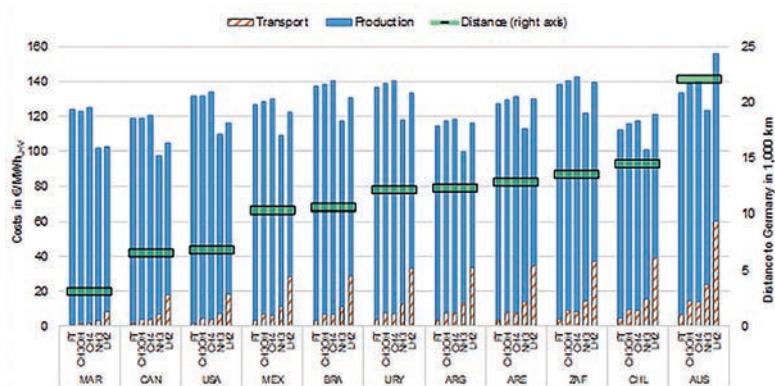
### **DeV-KopSys-2: Decarbonization of transport – energy system feedback – global to regional**

*The scientific objective of the DeV-KopSys-2 project is to investigate the role of individual technology options (e.g. electromobility, PtX fuels) for achieving the climate targets in the transport sector against the background of the interactions of the decarbonisation of this sector with other developments using model-based scenarios. Of particular interest are bandwidths of global PtX export potentials up to the year 2045/2050, framework conditions of the electricity and gas market at the European level and the expansion of the electricity grids in Germany with regard to electromobility and the expansion of renewable energies at the regional level.*

In einem ersten Projektabschnitt wurde eine intensive Datenrecherche zur Erzeugungs- und Verbrauchsstruktur der relevanten Sektoren des Energieversorgungssystems zu den Fokusländern Chile und Marokko durchgeführt. Außerdem wurde und wird die Potentialflächenanalyse für erneuerbare Stromproduktion und evtl. PtX-Produktion umfassend überarbeitet. Anhand dieser Daten wurde das Energiesystemmodell EMPIRE um projektrelevante Funktionalitäten erweitert, was es erlaubt erste, vorläufige Optimierungsresultate zu den beiden Fokusländern zu generieren.

*In the first phase of the project, intensive data research was carried out on the generation and consumption structure of the relevant sectors of the energy supply system in the focus countries Chile and Morocco. Furthermore, the potential area analysis for the generation of renewable electricity or ptx-fuels has been and will be further adapted. Based on this data, the EMPIRE energy system model was extended to include project-relevant functionalities, which made it possible to generate initial, preliminary optimisation results for the two focus countries.*

Kraftstoffproduktions- und Transportkosten nach Deutschland für ausgewählte PtX-Kraftstoffe und Produktionsländer  
*Fuel production and transport costs to Germany for certain ptx-fuels and producing countries*



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
 des Deutschen Bundestages

**Gefördert durch: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz unter  
 dem Förderkennzeichen 16EM5008-1**

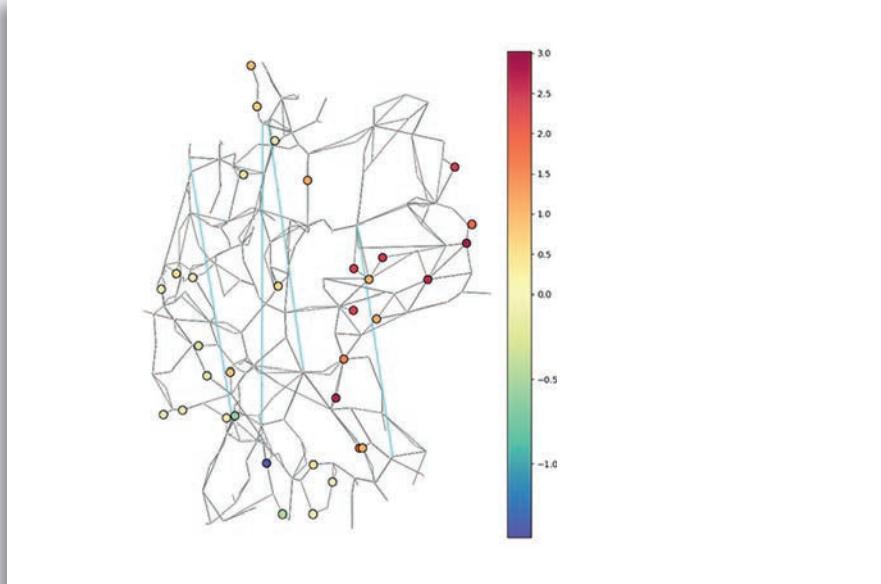
## Hybrid Grid – Anschlussmöglichkeiten von Offshore-Windparks unter Berücksichtigung von Sektorenkopplung

Um Deutschland bis 2045 weitgehend klimaneutral zu gestalten, ist unter anderem ein deutlicher Ausbau der Offshore-Windenergie erforderlich. Zudem wird „grüner“ Wasserstoff – erzeugt via Wasserspaltung mit erneuerbarer Energie (sog. Elektrolyse) – voraussichtlich eine tragende Rolle als Ersatz von kohlenstoffhaltigen Brenn- und Grundstoffen in der Industrie einnehmen. Es stellt sich die Frage, welche Implikationen dies für die Netzinfrastrukturen hat.

Exemplarische Darstellung von Mehr- und Minderproduktionsmengen für verschiedene Elektrolyseure in Deutschland  
*Exemplary illustration of overproduction and underproduction volumes for various electrolyzers in Germany*

Im Projekt „Hybrid Grid“ werden verschiedene Optionen für die Landanbindung von Offshore-Windparks untersucht. Dabei werden Methoden entwickelt, um die Platzierung von Elektrolyseuren, nicht zuletzt in direkter Nähe von Offshore-Windparks, hinsichtlich der Netzauswirkungen zu bewerten. Die Umwandlung von Elektrizität in Wasserstoff wirkt sich auf beide Netzinfrastrukturen aus, sodass Strom- und Wasserstoffnetz nicht unabhängig voneinander betrachtet werden können.

Basierend auf großräumigen Modellen des Stromübertragungs- und Wasserstofftransportnetzes werden in diesem Projekt Netzsimulationen mit pandapower und pandapipes durchgeführt und ausgebaut sowie mathematische Optimierungsmodelle für die Planung und den Betrieb von Strom- und Wasserstoffnetzen (weiter-)entwickelt. Dabei wird auch die Umnutzung bestehender Erdgasnetze zum Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur betrachtet.



## Hybrid Grid – Options for Offshore Windfarm Connections with different energy carriers

*In order to make Germany largely climate-neutral by 2045, a considerable expansion of offshore wind energy is required, among other things. In addition, "green" hydrogen – produced by splitting water with renewable energy (so-called electrolysis) – is expected to play a major role as a substitute for carbon-based fuels and raw materials in industry. This raises the question of what implications this has for grid infrastructures.*

*In the "Hybrid Grid" project, various options of connecting offshore windfarms are investigated. Methods are being developed to evaluate grid impacts related to the placement of electrolyzers, also in the direct vicinity of offshore wind farms. The conversion of electricity into hydrogen affects both grid infrastructures, so that the electricity and hydrogen grids cannot be considered independently of each other.*

*Based on large-scale models of the electricity transmission and hydrogen transport grid, grid simulations with pandapower and pandapipes are carried out and expanded in this project, and mathematical optimisation models for the planning and operation of electricity and hydrogen grids are (further) developed. The conversion of existing natural gas grids for the development of a hydrogen infrastructure is also being considered.*

Ansprechpartner

NILS WIESE, M.ENG. (e2n)

Titel

**NETZREGELUNG 2.0**

Im Forschungsprojekt „**Netzregelung 2.0**“ wurden neue Wechselrichter-Regelungen, sogenannte netzbildenden Regelungsverfahren, entwickelt und bewertet. Diese Regelungsverfahren ermöglichen einen hohen Einsatz an wechselrichter gekoppelten erneuerbaren Erzeugern und Speichern.

Da auf absehbare Zeit noch viele herkömmliche Wechselrichter ans Netz angeschlossen sein werden und momentan als auch zukünftig ein sich verändernder Anteil an Synchrongeneratoren ins Netz einspeisen wird, untersuchte das Fachgebiet unter anderem das Zusammenwirken dieser Einheiten mit netzbildenden Wechselrichtern. Die Untersuchungen haben ergeben, dass mit höherer Durchdringung von netzbildenden Wechselrichtern anstatt konventionellen Wechselrichtern ein Systemsplit besser beherrschbar ist und eine anpassbare Parametrierung aller Einspeiser mit Berücksichtigung höherer Wechselrichter-Durchdringung vorteilhaft ist.

Die Regelungen wurden in Hinblick auf Kurzzeitspannungsinstabilität sowohl simulativ als auch in einem Hardware-Labor untersucht. Die dabei auftretenden Überströme können die Leistungselektronik beschädigen, weswegen mehrere Regelungsansätze zum Schutz der Wechselrichter erarbeitet und bewertet wurden. Dabei konnte die transiente Stabilität im Vergleich zu Synchronmaschinen deutlich verbessert werden und auch unsymmetrische Fehler sind beherrschbar.

Innerhalb des Projekts wurde das Konzept der asymmetrischen Bereitstellung von Momentanreserve entwickelt, sodass Momentanreserve nur in positiver oder negativer „Richtung“ bereitgestellt wird. Damit können auch Erzeuger ohne Energiespeicher als auch Lasten mit entsprechendem Umrichter Momentanreserve bereitstellen, wodurch wahrscheinlich ein großes Potential an Momentanreserve kosteneffizient bereitgestellt werden kann.

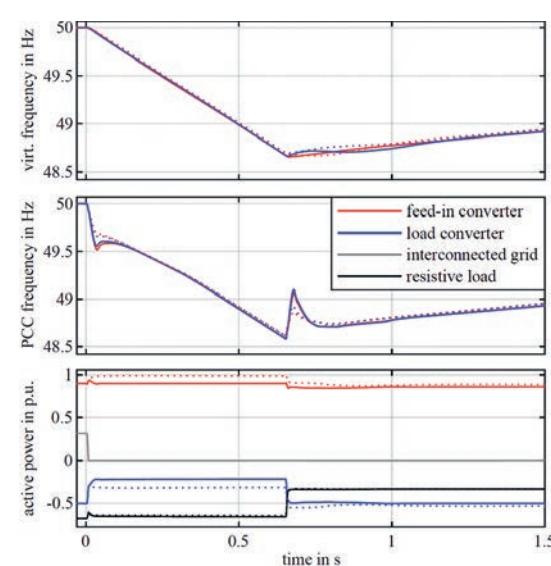
Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

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

title

**NETZREGELUNG 2.0**

Unidirektionale Momentanreserve von Einspeiser und Last bei Frequenzereignis  
*Unidirectional instantaneous reserve of feed-in converter and load during frequency event*

Johannes Heid, Walter Schittek,  
*Asymmetric and Confined Operation of a Generic Virtual Synchronous Machine*

*In the research project „**Netzregelung 2.0**“, new converter control systems, so-called grid-forming control algorithms, were developed and evaluated. These control methods enable a high use of converter-coupled renewable generators and storage systems.*

*Since many conventional converters will still be connected to the grid in the foreseeable future and a changing penetration of synchronous generators will feed into the grid both now and in the future, the department investigated, among other things, the interaction of these units with grid-forming control methods. The investigations have shown that with higher penetration of grid-forming converters instead of conventional converters, a system split can be dealt with better, and an adaptable parameterisation of all generators with consideration of higher converter penetration is advantageous.*

*The controls were investigated with regard to short-term voltage instability using simulations as well as laboratory hardware. The overcurrents that occur can damage the power electronics, which is why several control approaches for protecting the converters were developed and evaluated. The transient stability could be significantly improved compared to synchronous machines, and unsymmetrical faults are also controllable.*

*Within the project, the concept of asymmetric provision of instantaneous reserve was developed, so that instantaneous reserve is only provided in positive or negative "direction". This means that generators without energy storage as well as loads with a corresponding converter can provide instantaneous reserve, which probably means that a large potential of instantaneous reserve can be provided cost-effectively.*

Ansprechpartner

DR. SEBASTIAN WENDE-VON BERG (e<sup>2</sup>n, IEE); ZHENG LIU, M.SC. (e<sup>2</sup>n)

Titel

**InterConnect: SMARTE LIEGENSCHAFTEN  
UNTERSTÜTZEN NETZBETRIEB**

title

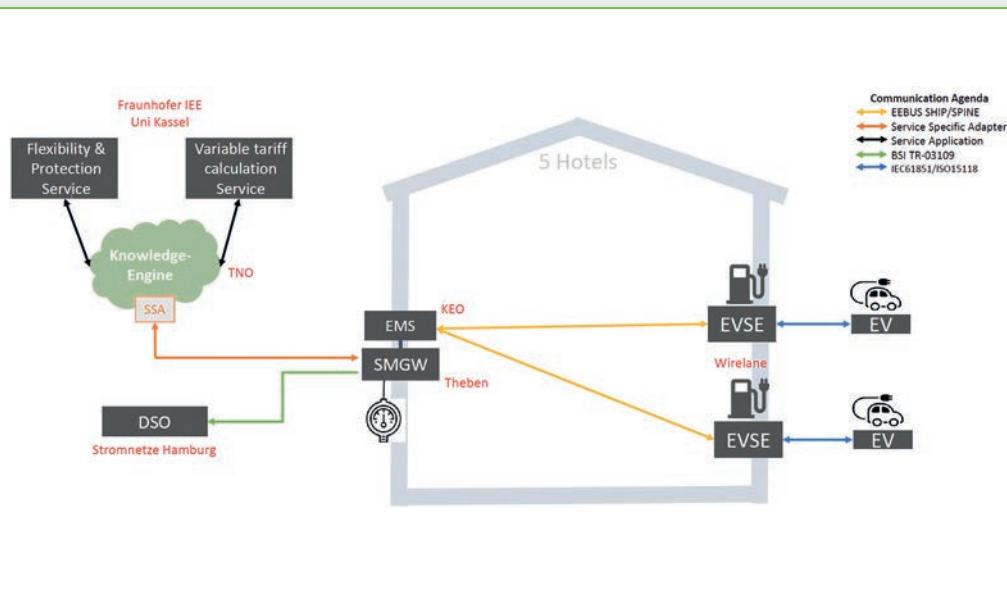
**InterConnect: SMART PROPERTIES SUPPORT  
NETWORK OPERATIONS**

**Aktuelle Schwerpunkte von e<sup>2</sup>n: 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.

**Current focus areas of e<sup>2</sup>n: 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 this information can make the usage of renewable energy more efficient while increasing the security and reliability of the power system.



Schema: Aufbau der kommerziellen  
Pilotprojekte in Hamburg  
Schemas: setup commercial pilot  
Hamburg

Die Universität Kassel arbeitet in dem Projekt InterConnect eng mit dem Fraunhofer IEE zusammen und ist aktiv an dem Demonstrationsfeldtest „Hamburg Pilot“ beteiligt. An diesem Piloten (siehe Abbildung) beteiligen sich zusätzlich die Stromnetze Hamburg, KEO Connectivity, EEBus, Theben und Wirelane. Ziel ist es, Liegenschaften mit intelligenten Systemen, wie in diesem Fall Ladepunkte für E-Kfz innerhalb eines Hotelkomplexes, zu ertüchtigen und aktiv das Netzgeschehen positiv zu beeinflussen. Hierfür hat die Universität Kassel eine Methode zur Zustandsbestimmung in Mittelspannungsnetzen auf Basis künstlicher Intelligenz entwickelt und es in Zusammenarbeit mit Fraunhofer IEE als ein beeDIP<sup>1</sup> -Service implementiert. Auf dieser Basis können dann Netzkapazitäten und zukünftige Netzzustände bestimmt und analysiert werden. Mithilfe von Flexibilitäten durch Verschieben der Ladevorgänge bei den fünf ausgewählten Hotels lassen sich auch Maßnahmen für das Netzmanagement definieren und dem Netzführer vorschlagen.

Neben der Netzzustandsschätzung und der Optimierung der Liegenschaften, geht es im Projekt um die Harmonisierung der Datenmodelle und Schnittstellen. Die Kommunikation zwischen den bereitgestellten Services und den Projektpartnern ist SAREF-konform gestaltet, um Interoperabilität für weitere Verwendung zu gewährleisten.

Das Projekt startete Ende 2019 und läuft noch bis Ende 2023. Der Feldtest ist für das Jahr 2023 geplant.

*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 Connectivity, EEBus, Theben, and Wirelane are also participating, see Figure. 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 has developed a method for estimating the grid-state of medium-voltage grids based on methods of artificial intelligence and implemented it as a beeDIP<sup>2</sup> service in collaboration with Fraunhofer IEE. On this basis, network capacities and future network conditions can be determined and analysed. With the help of flexibilities by shifting charging processes in the five selected hotels, measures for grid management can also be defined and proposed to the grid operator. In addition to the network state estimation 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 between project partners 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 year 2023.*

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

<sup>1</sup> <https://www.iee.fraunhofer.de/de/geschaeftsfelder/netzplanung-und-netzbetrieb/werkzeuge/beedip.html>

<sup>2</sup> [https://www.iee.fraunhofer.de/en/business\\_units/grid-planning-and-grid-operation/tools-and-models/beedip.html](https://www.iee.fraunhofer.de/en/business_units/grid-planning-and-grid-operation/tools-and-models/beedip.html)



**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.

## Ladeinfrastruktur 2.0: Optimierung des koordinierten Ausbaus und Betriebs der Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge und der Verteilungsnetze

Das Projektziel ist die energie- und netzwirtschaftliche Optimierung der Ladeinfrastruktur von Elektrofahrzeugen. Dabei wird unter anderem das Verhalten intelligenter Ladestrategien untersucht und evaluiert, inwiefern diese Ladestrategien notwendigen Netzausbaubedarf reduzieren können. In dem Projekt 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. Teil der ganzheitlichen Analyse von intelligenten Ladestrategien ist neben der detaillierten Analyse in Bezug auf netzbetriebliche Aspekte mithilfe von modularen Simulationsansätzen deren Integration in die Netzplanung. Dafür werden mehrere Ansätze entwickelt. Einer der Ansätze ist ein hybrider Ansatz zur zeitreihenbasierten Worst-Case Netzplanung, der

Vergleich der durchschnittlichen Netzausbaukosten in einem aus 110 Niederspannungsnetzen bestehenden Netzgebiet für drei verschiedene Ladeverhalten

*Comparison of average grid reinforcement costs in a grid area consisting of 110 low-voltage grids for three different charging behaviors*

Hendrik Maschke, Andrea Schoen, Jan Ulfers, Lukas Mueller, Martin Braun; "Integrating Control Strategies for Electric Vehicle Charging into a Simultaneity-Factor-Based Grid Planning Approach", ETG Kongress 2023 (unpublished)

die Berücksichtigung jeglicher Ladestrategien ermöglicht und Detailanalysen bezüglich ihres zeitlichen Verhaltens und Einfluss auf den Netzausbau erlaubt. Darüber hinaus wird ein auf Gleichzeitigkeitsfaktoren basierender Ansatz entwickelt, der, aufgrund der effizienten Bestimmung der planerisch relevanten Worst Cases, großflächige Analysen des Einflusses von netzunabhängigen Ladestrategien, wie zeitabhängiger Leistungslimits, ermöglicht. Die untenstehende Grafik zeigt die durchschnittlichen Netzausbaukosten, die in einem aus 110 Netzen bestehenden Netzgebiet bei drei verschiedenen Ladeverhalten zu erwarten sind. Ein weiterer Schwerpunkt im Projekt betrifft die Entwicklung von Methoden zur Netzzustandsschätzung und -prognose in der Niederspannung mittels künstlicher neuronaler Netze. Darüber hinaus werden im Projekt zwei Feldtests durchgeführt.

Gefördert durch:

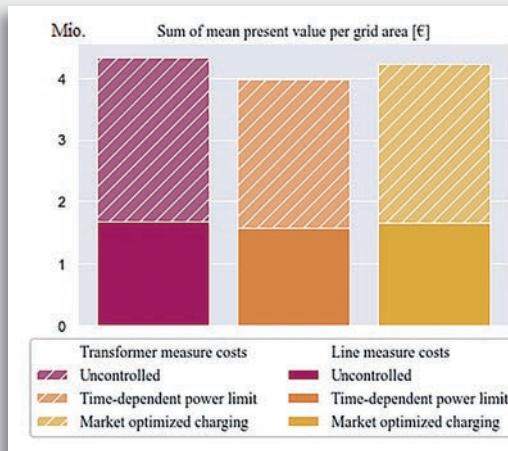


aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

**Gefördert durch: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (ehemals BMWi) unter dem Förderkennzeichen 0350048D, Laufzeit des Vorhabens: 01.12.2018 – 30.11.2023**

## 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 reinforcement can be reduced through the use of intelligent charging strategies. First, the expected charging behavior of electric vehicles is presented in a time-resolved manner based on 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. Part of the holistic analysis of smart charging strategies is not only the detailed analysis with regard to grid operation aspects using modular simulation approaches, but also their integration into*



*grid planning. For this purpose, several approaches are developed within the project. One of the approaches is a hybrid approach for time series-based worst-case grid planning, which enables the consideration of any type of charging strategy and allows detailed analyses regarding their temporal behavior and influence on grid reinforcement. In addition, another approach based on simultaneity factors is developed, which, due to the efficient determination of the relevant worst cases, allows large-scale analyses of the influence of grid-independent charging strategies, such as time-dependent power limits, on grid reinforcement. The figure below shows the average grid reinforcement costs that can be expected in a grid area consisting of 110 grids under three different charging behaviors. Another focus concerns the development of methods for grid state estimation and forecasting for low voltage grids using artificial neural networks. Moreover, two field tests are also part of this project.*

Ansprechpartner

MANUEL VALOIS, M.ENG. (e<sup>2</sup>n)

Titel

**NSON II**

title

**NSON II**

## **NSON II: Kosteneffiziente Anbindung und internationale Integration von Offshore Windenergie in der Nordsee**

Im Forschungsprojekt „NSON-II“ werden neue Konzepte für die kosteneffiziente Anbindung und die internationale Integration der Offshore-Windenergie in der Nordsee untersucht. Um die Ziele der Bundesregierung und der Europäischen Union hinsichtlich des Ausbaus von Offshore-Windparks in den nächsten Jahrzehnten zu erreichen, ist es notwendig, die Anbindungskosten zukünftiger Projekte zu reduzieren, indem neue Alternativen wie die parallele und vermaschte Anbindung von Offshore-Windparks unter Verwendung von HGÜ-Technologien evaluiert werden.

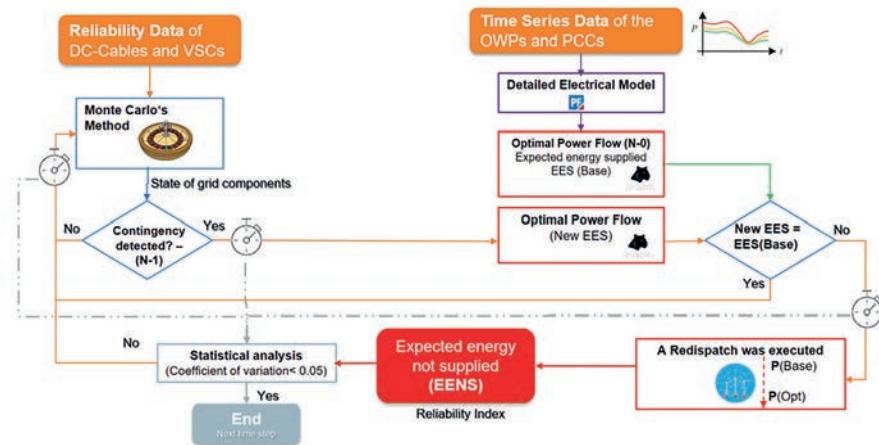
Die Bewertung der Zuverlässigkeit eines Stromversorgungssystems ist eine zwingende Praxis während der Prozesse der Ausbauplanung, Rekonfiguration und Scheduling. Daher entwickelt das Fachgebiet e<sup>2</sup>n im Rahmen dieses Projektes in Zusammenarbeit mit TenneT, Fraunhofer IEE und der Universität Hannover eine Reihe von Optimierungswerkzeugen zur Zuverlässigkeitssbewertung von Hochspannungs-Gleichstrom-Multiterminalnetzen (MT-HVDC-Netzen), die zur Entscheidungsunterstützung bei der Planung eines MT-HVDC-Netzes eingesetzt werden können. Mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulationsmethode können verschiedene MT-HVDC-Topologien auf der Basis der nicht gelieferten Energie verglichen werden, die durch den Ausfall von HGÜ-Kabeln über ein Jahr hinweg entstehen könnte. Das gesamte Simulationsverfahren einschließlich der Netzmodellierung, das Sampling, die Bestimmung der Komponentenzustände und der Berechnung von Zuverlässigkeitssindizes wurde in der Software AMPL umgesetzt.

## **NSON II: Cost-efficient connection and international integration of offshore wind energy in the North Sea**

In the research project "NSON-II", new concepts for the cost-efficient connection and the international integration of offshore wind energy in the North Sea are studied. To meet the targets set by the German government and the European Union regarding the deployment of offshore wind farms over the next decades, it is necessary to reduce the interconnection costs of future projects by evaluating new alternatives like the parallel- and multi-terminal interconnection of offshore wind parks employing HVDC technologies.

The evaluation of the reliability of a power system is an imperative practice during the processes of planning, reconfiguration and scheduling. Hence, within the scope of this project, and with the collaboration of TenneT, Fraunhofer IEE and the University of Hannover, the department e<sup>2</sup>n is developing a series of optimization tools for the reliability assessment of high-voltage direct current multi-terminal (MT-HVDC) grids, which can be utilized to support the decision process while planning an MT-HVDC grid. By using the Monte Carlo simulation method, different MT-HVDC topologies can be compared based on the expected energy not supplied that could result from the failure of HVDC-cables over a year. The complete simulation procedure including the grid modelling, sampling and characterization of states of components and the calculation of reliability indexes was implemented in the software AMPL.

Flussdiagramm der Methode zur Zuverlässigkeitssbewertung von MT-HVDC-Netzen  
Flow diagram of the procedure to evaluate the reliability of MT-HVDC grids



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

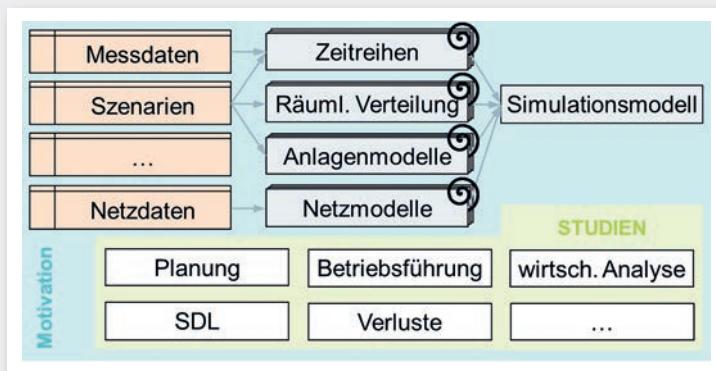
Gefördert durch: Bundesministerium für Bildung und Forschung unter dem  
Förderkennzeichen 03EI4009

## MotiV – Modelltiefe in Verteilnetzen

In Verteilnetzstudien wird modellbasiert der Netzausbau- und Investitionsbedarf im Zuge des Umbaus des Energieversorgungssystems untersucht. Die in den vergangenen Jahren durchgeföhrten Studien unterscheiden sich deutlich hinsichtlich methodischer Herangehensweise und Komplexität der Analysen. Dabei steigt mit zunehmender Detaillierung der Aufwand, sodass sich die Frage stellt, welche Modelltiefe tatsächlich erforderlich und sinnvoll ist, um belastbare Aussagen zum Netzausbaubedarf ableiten zu können.

## MotiV – Modeling complexity in distribution grids

*In distribution grid studies, the need for grid expansion and investment in the course of the energy transition is investigated based on simulations. The studies carried out in recent years differ significantly in terms of methodological approaches and complexity of the analyses. The greater the level of detail, the greater the effort required, so that the question arises as to what model complexity is required and useful to be able to derive reliable conclusions on the need for network reinforcements.*



Darstellung der Vorgehensweise in MotiV

*Illustration of the procedure in MotiV*

Dabei werden unterschiedliche Komplexitätsstufen in den folgenden vier Arbeitsschritten einer Netzstudie untersucht:

- Erstellung von Zeitreihen
- räumliche Verteilung der Anlagen
- Anlagenmodellierung
- Netzmodelle

*Different levels of complexity are examined in the following four steps of a grid study:*

- *creation of time-series*
- *spatial distribution of the prosumers*
- *prosumer modeling*
- *grid models*

Im ersten Arbeitsschritt werden Alternativen zu Jahreszeitreihensimulationen untersucht. Dies beinhaltet vereinfachte Ansätze über Gleichzeitigkeitsfaktoren, Identifizierung von Typzeiträumen sowie der Benennung, welche Datengrundlage (z. B. Wetterjahr) sinnvoll für solche Betrachtungen ist.

Bei der räumlichen Verteilung von Anlagen werden unterschiedliche Komplexitätsgrade in der Datenbereitstellung untersucht. Der Fokus liegt hier auf steuerbaren Verbrauchs- und Erzeugungseinrichtungen wie Wärmepumpen, Elektrofahrzeugen und Photovoltaik-Anlagen. Zur Modellierung dieser werden unterschiedlicher Rahmendaten benötigt wie z. B. bei Wärmepumpen eine Gebäudemodellierung. Hier wird untersucht, mit welcher Datengrundlage eine repräsentative Aussage für Netzplanungsstudien getätigt werden kann.

Im Arbeitsschritt Anlagenmodellierung wird weiterhin untersucht, wie detailliert solche Anlagen modelliert werden sollen. Dieser Arbeitsschritt steht demnach in direkter Korrelation zur Untersuchung der Komplexität der räumlichen Verteilung.

Bei der Netzmodellierung werden vor allem unterschiedliche Möglichkeiten der Wechselwirkung zwischen Mittel- und Niederspannungsnetz untersucht. Hierbei kann man das Niederspannungsnetz in seiner kompletten Modelltiefe an das Mittelspannungsnetz anschließen oder es als einfaches Netzäquivalent umrechnen.

Ziel des Projekts ist es, Handlungsempfehlung für die unterschiedlich betrachteten Arbeitsschritte systematisch zu identifizieren, so dass sie in zukünftigen Netzstudien anwendbar sind.

*In the first step, alternatives to time-series simulation over a whole year are investigated. This includes simplified approaches via simultaneity factors, identification of representative time periods, and finding a data basis (e.g., weather year) that is reasonable for such considerations.*

*For the spatial distribution of prosumers, different levels of complexity in data provision are explored. The focus here is on controllable consumption and generation facilities such as heat pumps, electric vehicles and photovoltaic systems. Different data are required, such as building modeling in the case of heat pumps. Here, it is investigated which data basis can be used to make a representative statement for grid planning studies.*

*In the work step prosumer modeling it is further investigated how detailed such plants should be modeled. This step is therefore directly correlated to the investigation of the complexity of the spatial distribution.*

*In grid modeling, different possibilities of interaction between the medium and low-voltage network are primarily investigated. Here, the low-voltage grid can be connected to the medium-voltage grid in its complete model depth or it can be converted into a simple grid equivalent.*

*The aim of the project is to systematically identify recommended actions for the various steps considered so that they can be applied in future grid calculations studies.*

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

**Gefördert durch: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz unter  
dem Förderkennzeichen 03EI1023B**

Ansprechpartner

MAXIMILIAN KLEEBAUER, M.SC.; DR. JAN DOBSCHINSKI

Titel

**OASES**

title

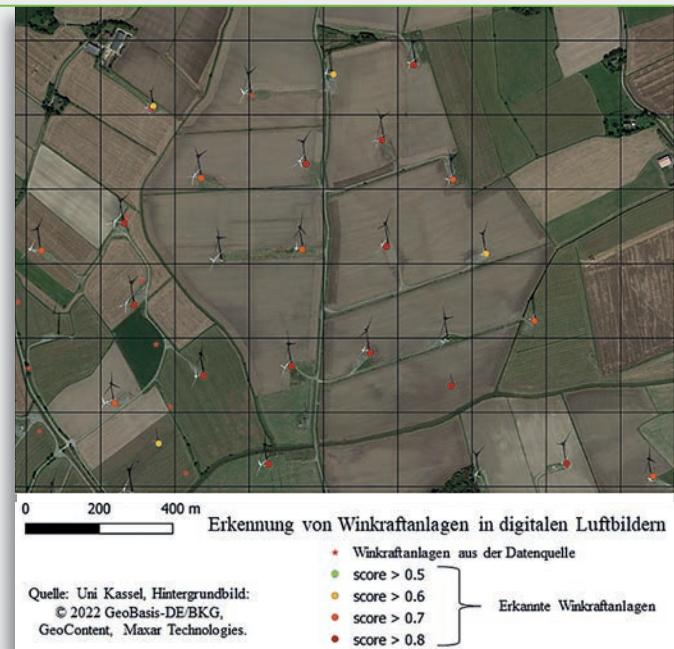
**OASES**

## **OASES: Entwicklung und Demonstration eines nachhaltigen Open Access AU-EU-Ökosystems für die Energiesystemmodellierung**

Das übergeordnete Ziel des „OASES“ Projekts ist die Entwicklung und Demonstration eines nachhaltigen AU-EU-Ökosystems für die Modellierung von Energiesystemen auf der Grundlage von Open-Source-Software und frei zugänglichen Daten. Das Projekt wird benutzerfreundliche Modellierungsabläufe für verschiedene räumliche Maßstäbe entwickeln. Die Arbeitsabläufe werden die im Projekt entwickelten EE-Daten sowie Daten und Werkzeuge aus anderen etablierten Vorhaben nutzen. Die Arbeitsabläufe werden in sechs energiewirtschaftlichen Fallstudien mit unterschiedlichem Umfang demonstriert, die mit dem Code, den Daten, den Tutorials und der Dokumentation des Projekts repliziert werden können. Auf diese Weise ermöglicht das Projekt lokalen Akteuren, die für ihre Bedürfnisse relevanten Analysen von Energiesystemen zu erlernen und selbstständig durchzuführen.

Das Fachgebiet e<sup>2</sup>n der Universität Kassel werden frei zugängliche Tools entwickeln, um

- (1) bereits installierte Windenergie- und Photovoltaik-(PV)-Anlagen mithilfe von Satellitenbildern, digitalen Orthophotos und Machine-Learning-Ansätzen zu erkennen und
- (2) um die Ressourcenbewertung, die räumliche Verteilung neuer Wind- und PV-Anlagen und die Erstellung von Zeitreihen zu unterstützen.



Testanwendung der Erkennung von Windkraftanlagen in digitalen Orthophotos  
*Test application of wind turbine detection in digital orthophotos*

## **OASES: Development and Demonstration of a Sustainable Open Access AU-EU Ecosystem for Energy System Modelling**

*The goal of the "OASES" project is to develop and demonstrate a sustainable AU-EU energy system modeling ecosystem based on open source software and data. The project will develop user-friendly modeling workflows for different spatial scales. The workflows will leverage EE data developed in the project as well as data and tools from other established projects. The workflows will be demonstrated in six energy industry case studies of varying scales that can be replicated using the project's code, data, tutorials, and documentation. In this way, the project enables local stakeholders to learn and independently perform energy system analyses relevant to their needs.*

*The e<sup>2</sup>n department at the University of Kassel will develop freely accessible tools to.*

- (1) *detect already installed wind energy and photovoltaic (PV) systems using satellite imagery, digital orthophotos, and machine learning approaches;*
- (2) *and to support resource assessment, spatial distribution of new wind and PV installations, and time series generation.*

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

**Gefördert durch: Bundesministerium für Bildung und Forschung  
unter dem Förderkennzeichen (BMBF.722 – 03SF0677B) im Rahmen  
der Long-Term Joint European Union – African Union Research and  
Innovation Partnership on Renewable Energy LEAP-RE**

 **LEAP-RE**  
Long-term Joint EU-AU Research  
and Innovation Partnership on Renewable Energy

 **ASES**

Ansprechpartner

DR. LARS-PETER LAUEN; FLORIAN HIRSCHMANN, M.SC. (e<sup>2</sup>n)

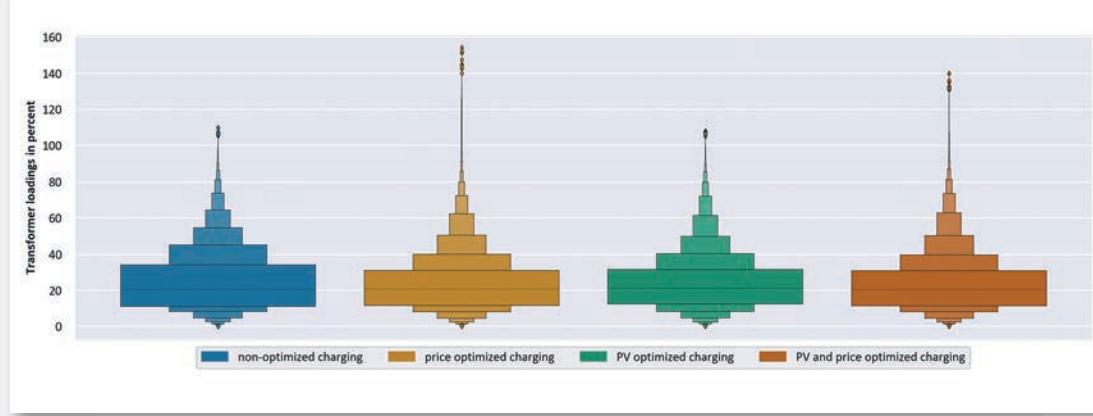
Titel

**OwnPV-Outlook**

title

**OwnPV-Outlook**

Auswirkungen unterschiedlicher Ladeverhaltensweisen von in PV-Eigenstromsystemen integrierten Elektroautos auf die Transformatorauslastung  
*Impacts of different charging behaviors of electric vehicles integrated into PV self-consumption systems on transformer loading*



### OwnPV-Outlook: PV-Eigenstrom als effizientes, nachhaltiges und robustes Element des zukünftigen Energiesystems

Das Projekt OwnPV-Outlook soll die Einbindung und Entwicklung von PV-Eigenstromsystemen in das zukünftige Energiesystem untersuchen und bewerten. Das Projekt dient als Evaluation der möglichen und wahrscheinlichen Ausgestaltung der zukünftigen Rahmenbedingungen, des wirtschaftlich nutzbaren Potenzials und den Auswirkungen von PV-Eigenstromsystemen unter Beachtung der aktuellen politischen Diskussion. Ziel ist es, diese Bandbreite einzugrenzen durch Ermittlung einer energetisch und ökonomisch effizienten und damit nachhaltigen Einbindung von PV-Eigenstrom in das Energiesystem unter Berücksichtigung der technologischen Innovationskraft in den verschiedensten PV-Anwendungsfällen.

Der Fokus des Fachgebiets e<sup>2</sup>n liegt auf der Analyse der Netzauslastung bei verstärktem Zubau von PV-Eigenstromsystemen und der Abschätzung der resultierenden Netzausbaukosten sowie der Auswirkungen auf höhere Spannungsebenen. In ersten Untersuchungen wurden verschiedene Ladeverhaltensweisen von Elektroautos in PV-Eigenstromsystemen mithilfe eines generischen SimBench-Netzes untersucht. Dabei zeigte sich, dass einheitliche Preisanreize zu höheren Netzauslastungen führen können, wohingegen eine Eigenverbrauchsoptimierung das Niederspannungsnetz entlasten kann. Weiterhin wurden die Auswirkungen variabler Netzentgelte untersucht.

Im weiteren Verlauf sollen Wärmepumpen in die PV-Eigenstromsysteme integriert und die Untersuchungen auf reale Netzdaten ausgeweitet werden. Mithilfe der realen Netzdaten der Projektpartner soll auch der Übergang zur Abschätzung der Netzausbaukosten erfolgen.

Gefördert durch:

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

**Gefördert durch: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz  
unter dem Förderkennzeichen 03EI1031B**

### OwnPV-Outlook: PV self-generated electricity as an efficient, sustainable, and robust element of the future energy system

The project OwnPV-Outlook aims to investigate and evaluate the integration and development of PV self-consumption systems into the future energy system. The project evaluates possible and probable designs of future frameworks for PV self-consumption systems, considering economical, technical, behavioral, and regulatory aspects. The aim is to narrow this range by determining an energetically and economically efficient and thus sustainable integration of PV self-consumption systems into the energy system, considering the technological innovation in diverse PV application cases.

The focus of the e<sup>2</sup>n research group is on the analysis of grid utilization in the case of increased expansion of PV self-consumption systems and the estimation of the resulting grid expansion costs as well as the effects on higher voltage levels. In initial studies, different charging behaviors of electric vehicles in PV self-consumption systems were investigated using a generic SimBench grid. This showed that uniform price incentives can lead to higher grid loads, whereas self-consumption optimization can mitigate overloads in the low-voltage grid. Furthermore, the effects of variable grid fees were investigated.

In the further process, heat pumps will be integrated into the PV self-consumption systems and the investigations will be extended to real grid data. With the help of the real grid data of the project partners, the transition to the estimation of grid expansion costs will also take place.



Projektübersicht Redispatch 3.0

Project Overview Redispatch 3.0

### **Redispatch 3.0: Demonstrationsprojekt Redispatch und Vermarktung nicht genutzter Flexibilitäten von Kleinstanlagen hinter intelligenten Messsystemen**

Der Begriff „Redispatch“ beschreibt traditionell den Eingriff in die Erzeugung um Engpässen im Netz entgegenzuwirken. Mit der Einführung des „Redispatch 2.0“ im Oktober 2021 sind Netzbetreiber verpflichtet auch Erzeugungsanlagen und Speicher mit einer Nennleistung > 100 kW in Redispatchmaßnahmen mit einzubeziehen.

In dem Forschungsprojekt „Redispatch 3.0“ wird untersucht, inwiefern Kleinstflexibilitäten zur Vermeidung und Beseitigung von Engpässen über Spanungsebenen hinweg verwendet werden können. Dafür wurden in der ersten Phase des Projekt Anwendungsfälle definiert. In der zweiten Phase werden Basistechnologien entwickelt, die den Redispatch mit Kleinstflexibilitäten ermöglicht. Diese werden dann in den späteren Phasen für die Anwendung in zwei Feldtests erprobt.

Im Fokus des Fachgebiets e<sup>2</sup>n stehen dabei zwei Aspekte: Zum einen soll die in anderen Projekten entwickelte und auf künstlichen neuronalen Netzen basierte Zustandsschätzung zum Einsatz kommen. Ziel ist hierbei, Engpässe in Netzen mit niedriger Messdurchdringung zu erkennen. Zum anderen soll nach einem erkannten Engpass eine optimale Lösung zur Beseitigung des Engpasses gefunden werden. Dabei soll zum einen auf Flexibilitäten zurückgegriffen werden, die sich in dem entsprechenden Netz befinden, und zum anderen auf Flexibilitäten, die von nachgelagerten Netzen in geeigneter Form an den Netzverknüpfungspunkten aggregiert werden. Hierfür werden Optimierungsverfahren, wie bspw. Optimal Power Flow (OPF), in Python und pandapower implementiert.

### **Redispatch 3.0: Demonstration project residpatch and commercialization of non-used flexibility from micro energy systems behind intelligent metering systems**

The term "Redispatch" traditionally describes the intervention in generation to counteract congestions in the grid. With the introduction of "Redispatch 2.0" in October 2021, grid operators are obliged to include in redispatch measures also power plants and storages with a rated power > 100 kW.

The research project "Redispatch 3.0" investigates to what extent micro-flexibilities can be used to avoid and eliminate congestions across voltage levels. To this end, use cases were defined in the first phase of the project. In the second phase, basic technologies are developed to enable the Redispatch using micro-flexibilities. These will then be tested in two field tests in the later phases.

The focus of the Department e<sup>2</sup>n is on two aspects: On the one hand, the state estimation developed in other projects, which is based on artificial neural networks, is to be employed. The goal is to detect congestions in grids with only a few measurements. On the other hand, once a congestion has been detected, an optimal solution for eliminating the congestion is to be found. On the one hand, flexibilities are to be used which are located in the respective grid and, on the other hand, flexibilities which are aggregated by downstream grids in an appropriate way at the points of common coupling. For this purpose, optimization schemes such as, e.g., optimal power flow (OPF), are implemented in Python and pandapower.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

**Gefördert durch: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz unter  
dem Förderkennzeichen 03EI4043J**

Ansprechpartner

DR.-ING. NILS BORNHORST; ERIC TÖNGES, M.SC. (e<sup>2</sup>n)

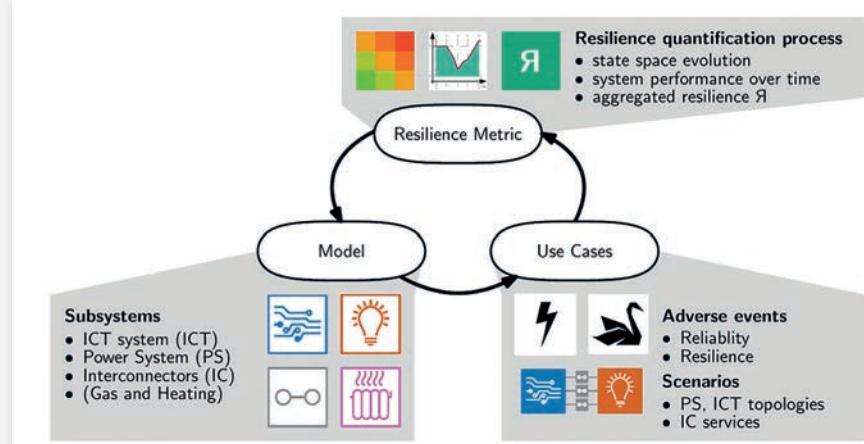
Titel

**ResiServD**

title

**ResiServD**

Überblick über die Projektstruktur:  
 Definition von Metriken zur Resilienzanalyse, Modellierung der Subsysteme sowie Definition und Analyse von Anwendungsfällen  
*Overview over the project structure:  
 Definition of metrics for resilience analysis, modelling of the subsystems, and definition and analysis of use cases*



### **ResiServD: Resilienz in Verteilten, Multimodalen, IKT-basierten Energiesystemen**

Ziel des Projekts ResiServD, Nachfolger des Projekts Multi-Resilienz im Schwerpunktprogramm DFG SPP 1984 „Hybrid and multimodal energy systems“, ist die Analyse und Verbesserung der Resilienz des verteilten, multimodalen und intelligenten Energiesystems. Resilienz beschreibt die Fähigkeit des Systems, mit verschiedenen Herausforderungen umzugehen. Betrachtungsfokus ist das elektrische Energiesystem, das in seinem Betrieb stark von Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) abhängt und das mit dem Gas- und Wärmeversorgungsnetz gekoppelt ist (s. Grafik). Die Modellierung dieses komplexen Systems muss möglichst effizient umgesetzt werden, indem nur die besonders relevanten Aspekte der Resilienz berücksichtigt werden. Deshalb werden in ResiServD folgende methodische Ansätze verfolgt: Beschreibung der Verbindungsglieder als Services, Modellierung der durch IKT ermöglichten Services mittels eines „finite-state automaton“, Modellierung des Energiesystems mittels Optimierungsmodellen, Modellierung der gekoppelten Systeme mittels eines „hybrid automaton“ sowie der Einsatz von Optimierungsmethoden einschließlich Mehrebenenoptimierung zur analytischen Identifikation von resilienzrelevanten Modellierungsparametern sowie von Herausforderungen, die über die Zuverlässigkeitsschätzung hinausgehen (s. Grafik). 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.

### **ResiServD: Service Resilience in Distributed, Multimodal, IKT-based Energy Systems**

*The goal of the project ResiServD, successor of the project Multi-Resilience within the DFG priority programme 1984 "Hybrid and multimodal energy systems", is to assess and improve the ability of the distributed, multimodal and smart energy system to withstand challenges – its resilience. It considers the future electrical power system that strongly depends on information and communication technology and is interconnected to gas and heating systems (see Figure). The modelling of this complex system needs to be as efficient as possible, taking into account only the most relevant aspects in terms of resilience. To solve the challenges at hand, the following methodological approaches are proposed: The description of interconnections as services, the modelling of the ICT-enabled services using a "finite state automaton", the modelling of the power system using optimization models, the modelling of the coupled systems using a "hybrid automaton", and the use of multi-level optimization for the analytical identification of resilience-relevant modelling parameters on the one hand and of the scope of challenges beyond known, high probability events on the other hand (see Figure). 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.*

**DFG SPP 1984**

**Gefördert durch: Deutsche Forschungsgemeinschaft DFG unter der Projektidentifikationsnummer 360352892 des Schwerpunktprogramms DFG SPP 1984 – „Hybrid and multimodal energy systems: System theory methods for the transformation and operation of complex networks“**

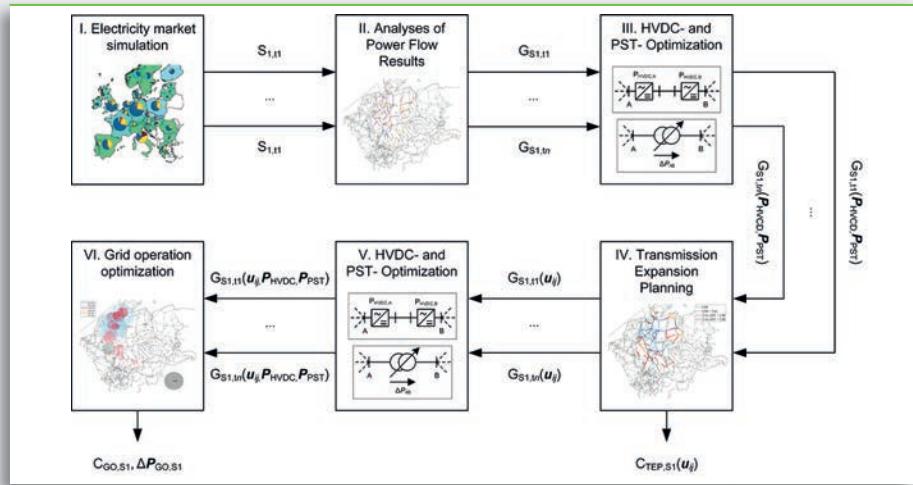
## RobustPlan: Robuste Planung der Übertragungsnetze

Zur Sicherstellung der Versorgungssicherheit des deutschen Stromnetzes und eines zukunftsgerichteten, wirtschaftlichen Netzausbaus wird im Forschungsprojekt RobustPlan untersucht, wie und welche robuste Netzausbauentscheidungen ermittelt werden können. Zur Beurteilung der Robustheit verschiedener Netzausbaumaßnahmen wird eine Kette aus mehreren Forschungsbereichen so zusammenge- schlossen, dass eine Vielzahl von Szenarien gerechnet werden kann. Dazu gehören eine Strommarktsimulation, die Kopplung von Markt- und Netzmodell, eine Netzbetriebsimulation, welche Stellgrößen von beispielsweise HGÜ- und PST-Betriebmittel bestimmt, ein Netz- planungsmodul und ein Netzbetriebsmodul inklusive einer Redis- patch-Rechnung (s. Abbildung).

Über die dargestellte gerichtete Ablaufkette hinaus werden auch die Rückwirkungen zwischen Netzausbaukosten und Netzbetriebskosten untersucht und abgewogen.

## Gerichtete Ablaufkette zur Simulation eines Entwicklungsszenarios inklusive Strommarkt, Netzausbau und Netzbetrieb

*Directed flow chart to simulate a development scenario including electricity market, grid expansion and grid operation*



Der Schwerpunkt des Fachgebiets e<sup>2</sup>n liegt dabei darauf, die Rückkopplung zwischen Regionalisierung/Marktsimulation und Netz mittels einer Schnittstelle iterativ bewerten zu können. Dies umfasst auch Rückkopplungen zwischen dem Einsatz von Flexibilitäten am Strommarkt und deren Opportunitätskosten. Die Modellierung betrieblicher Maßnahmen zur Berücksichtigung dieser Freiheitsgrade in der Netzausbauplanung stellt ein weiteres Kernziel des Fachgebiets e<sup>2</sup>n dar. Bestehende Ansätze zum Einsatz maschinellen Lernens sollen dafür weiterentwickelt und mit den Inputs der Partner zusammengebracht werden. Auch im Bereich der netzplanerischen Freiheitsgrade sollen bestehende Ansätze erweitert und in das im Rahmen von RobustPlan entstehende Optimierungsframework integriert werden. Um den Anlageneinsatz und Netzbetrieb optimal aufeinander abzustimmen, sollen standardisierte Schnittstellen entstehen, die eine kombinierte Optimierung ermöglichen.

In addition to the described sequence procedure, the interactions between grid expansion costs and grid operation costs are also investigated and traded off against each other.

The focus of the department e<sup>2</sup>n comprises being able to iteratively evaluate the feedback between regionalization/market and the grid simulation by means of an interface. This includes interactions between the use of flexibilities on the electricity market and their respective opportunity costs. The modelling of operational measures for consideration in grid expansion planning is another core objective of the department e2n. To this end, existing approaches to the use of machine learning will be further developed and brought together with the inputs of the partners. In the area of grid planning, existing approaches are to be extended and integrated into the RobustPlan optimization framework. In order to optimally coordinate unit commitment and grid operation, standardized interfaces are to be created that enable a combined optimization.

Ansprechpartner

EDUARDO VILCHES, M.SC.; ZHENG LIU, M.SC. (e<sup>2</sup>n)

Titel

**SPANNeND**

title

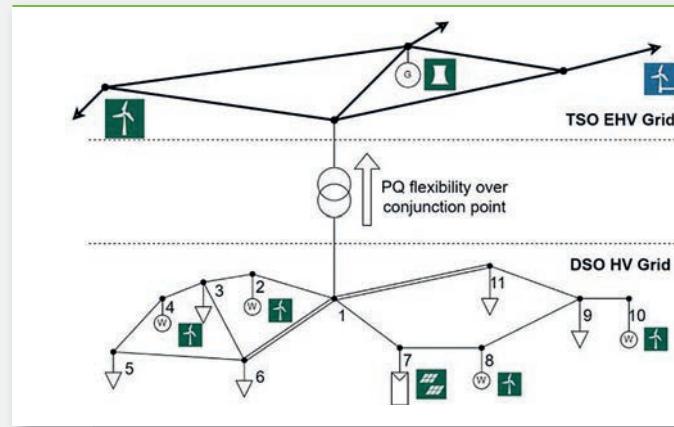
**SPANNeND**

**SPANNeND: Spannungskoordination unter Nutzung von Blindleistung zwischen Netzbetreibern Digital – Optimierung des Redispatch 2.0 Verfahrens unter Nutzung von Blindleistung aus Erzeugungsanlagen im Verteilnetz**

Im Fokus des Projekts SPANNeND steht die Entwicklung und Erprobung einer einheitlichen, robusten und interoperablen Methode zur Nutzbarmachung von Blindleistungspotenzialen aus Verteilnetzen für eine verlässliche Integration in die Verteil- und Übertragungsnetzbetriebsführungsprozesse, siehe Abbildung. 50 Hertz als ÜNB, Avacon und Thüringer Energienetze als VNB sowie energy & meteo systems (Emsys) als Plattform-Anbieter zusammen mit Fraunhofer IEE, Universität Kassel und der TU-Ilmenau forschen zusammen, um mögliche Lösungsansätze zu evaluieren und in geplanten Feldtests umzusetzen.

Das Konzept der Schätzung der ÜNB-DSO-PQ-Flexibilität des HV-Netzes

*The concept of estimating TSO-DSO PQ flexibility of HV grid*



Ziel der Universität Kassel im Fachgebiete e<sup>2</sup>n, ist es ein KI-OPF zu entwickeln, welcher die Flexibilitätsbestimmung mit Berücksichtigung von Unsicherheiten aus Prognosen/Fahrplänen, Anlagen mit lokaler Q-Regelung, regulatorischer/netztechnischer Bedingungen wie z. B. N-1 Netzsicherheit, Schutzkonfigurationen und ggf. Kosten von Q-Beschaffungsprozessen realisieren kann. Der OPF soll in der Lage sein, den Q-Flexibilitätsbereich seitens VNB zu bestimmen als auch bei Q-Bedarf an den Netzverknüpfungspunkten die Q-Vorgaben sowie die Kennlinien Parameter für einzelne Anlage bzw. Netzcluster zu bestimmen. Die Unsicherheit aus day-ahead/kurzfrist Prognosen und Messungen wird durch eine zu entwickelnde KI-basierten Methode bewertet werden und mit dem KI-OPF gekoppelt. Die Funktionalität der entwickelten Methode wird weiterhin in Simulation und Feldtest-Umgebungen zu verifizieren und im Onlinebetrieb der Flexibilitätsplattform zu evaluiieren sein.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

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

**SPANNeND: Voltage coordination using reactive power between grid operators Digital – Optimization of the Redispatch 2.0 process using reactive power from generating plants in the distribution grid**

The SPANNeND project focuses on the development and testing of a uniform, robust and interoperable method for calculating reactive power potential from distribution grids for reliable integration into distribution and transmission grid management processes, see figure. 50 Hertz as TSO, Avacon, and Thüringer Energienetze as DSO as well as energy & meteo systems (Emsys) as platform provider together with Fraunhofer IEE, University of Kassel and TU-Ilmenau are working together to evaluate possible solutions and implement them in field tests.

The goal of the University of Kassel, e<sup>2</sup>n, is to develop an AI-OPF, which can realize the flexibility determination under consideration of uncertainties from forecasts and schedules, plants with local Q-control, regulatory and network conditions such as N-1 network security, protection configurations and possibly also costs of Q-procurement processes. The OPF should be able to determine the Q-flexibility range on the part of the TSO as well as the Q-demands at the grid interconnection points and the characteristic parameters for individual plants or grid clusters. The uncertainty from day-ahead/short-term forecasts and measurements will be evaluated by an AI-based method to be developed and will be coupled with the AI-OPF. The functionality of the developed method will also be verified in simulation and field test context and brought into the online operation of the flexibility platform.

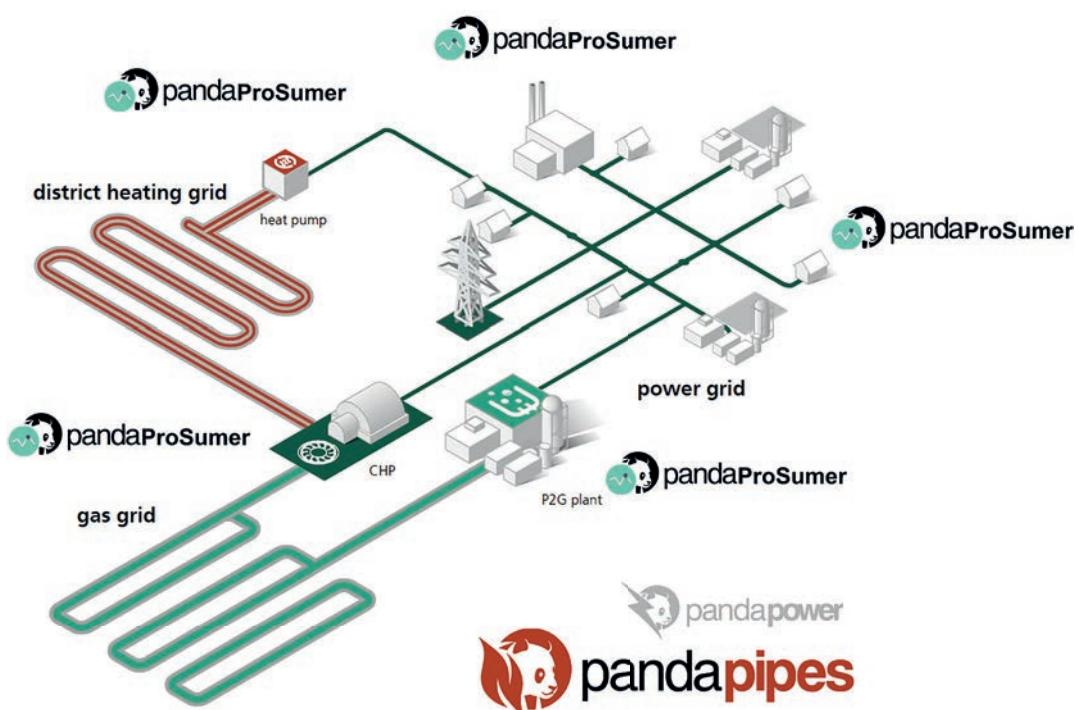
### **SENERGY NETS: Synergien zwischen verschiedenen Energienetzen erhöhen**

SENERGY NETS zielt darauf ab, die technische und wirtschaftliche Fähigkeit von Multi-Energie-Systemen zur Dekarbonisierung der Sektoren Wärme und Kälte, Strom und Gas durch lokal erzeugte erneuerbare Energiequellen sowie die Sektorintegration zu demonstrieren. Zu diesem Zweck wird SENERGY-NETS pandapipes, pandaprosumer und weitere Instrumente und Plattformen weiterentwickeln, die darauf abzielen, die Planung von Fernwärme und Fernkälte sowie von Verteilnetzen unter Berücksichtigung der Sektorkopplung zu optimieren und die Bereitstellung von Flexibilitätsdiensten für Verteiler- und Übertragungsnetzbetreiber zu ermöglichen.

### **SENERGY NETS: Increase the synergy among different energy networks**

*SENERGY NETS aims at demonstrating the technical and economic capability of multi-energy systems to decarbonize the heating and cooling, power and gas sectors through renewable energy sources produced locally as well as sector integration.*

*To do so, SENERGY-NETS will develop pandapipes, pandaprosumer and a set of tools and platforms aimed to optimise the planning of District Heating and Cooling as well as distribution grids with sector coupling consideration and allow the provision of flexibility services to Distribution and Transmission System Operators.*



Zusammenspiel von pandapower, pandapipes und pandaprosumer  
Combination of pandapower, pandapipes and pandaprosumer

Diese Lösungen werden an drei Pilotstandorten in Mailand (IT), Ljubljana (SI) und Paris (FR) implementiert und ihre Replizierbarkeit in zwei weiteren realen Fallstudien getestet, die alternative klimatische, wirtschaftliche und geografische Bedingungen in Västerås (SW) und Cordoba (ES) vorstellen. SENERGY NETS stützt sich auf ein starkes transdisziplinäres Konsortium aus 17 Organisationen in 7 europäischen Ländern, an denen renommierte Experten von Behörden, Infrastrukturanbietern, Forschungseinrichtungen, Unternehmen und Verbraucherverbänden beteiligt sind.

Insgesamt werden sie das notwendige Wissen, die Expertise und die Kapazitäten bereitstellen, um die entwickelten Instrumente und Dienstleistungen zu demonstrieren und zu bewerten, die die Integration von Multi-Energie-Systemen ermöglichen, um dem Stromsystem Flexibilität zu verleihen und letztendlich die Dekarbonisierung des Energiesystems zu ermöglichen.



*These solutions will be implemented on three pilot sites located in Milan (IT), Ljubljana (SI) and Paris (FR) and their replicability will be tested in two additional real case studies presenting alternative climatic, economic and geographic conditions in Västerås (SW) and Cordoba (ES).*

*SENERGY NETS relies on a strong trans-disciplinary consortium involving 17 organisations located in 7 European countries, involving renowned experts from public authorities, infrastructure providers, research institutions, entrepreneurs and consumers associations.*

*Altogether, they will provide the necessary knowledge, expertise and capacities to develop, demonstrate and evaluate developed tools and services enabling the integration of multi-energy systems to provide flexibility to the power system, and ultimately enable the decarbonisation of the energy system.*

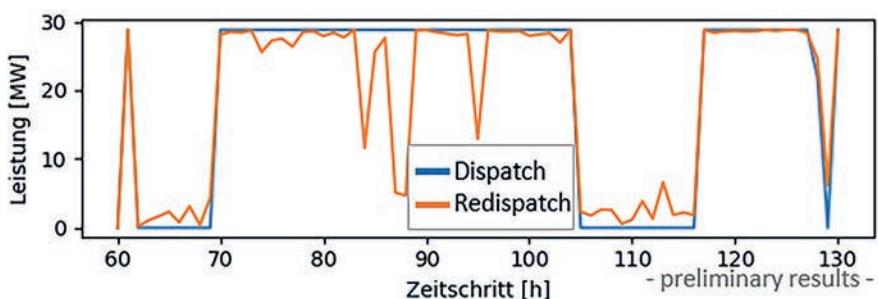


Funded by  
the European Union

This project has received funding from the European Union's programme  
Horizon.2.5 – Climate, Energy and Mobility under grant agreement No. 101075731

Disclaimer: Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union. The European Union can not be held responsible for them.

Beispielhafter Lastgang eines Elektrolyseurs, angepasst durch Redispatch-Maßnahmen  
Exemplary load profile of an electrolyser, modified by redispatch measures



## TransHyDE-Sys: Systemanalyse zu Transportlösungen für grünen Wasserstoff

Wasserstoff wird im zukünftigen Energiesystem eine wichtige Rolle einnehmen, die im BMBF geförderten Wasserstoff-Leitprojekt „TransHyDE“ von verschiedenen Seiten beleuchtet wird. Der Verbund „Systemanalyse“ (TransHyDE-Sys) hat dabei das übergeordnete Ziel, mögliche Entwicklungsperspektiven für den Wasserstofftransport mit Hilfe von modellbasierten Szenarien abzubilden. Hierzu werden zwei komplementäre Ansätze verfolgt: Ein Stakeholder-getriebener Ansatz und ein unabhängiger systemischer Ansatz, der die Infrastruktorentwicklung mit Fokus auf grünen Wasserstoff aus der Perspektive einer volkswirtschaftlichen Kostenminimierung betrachtet.

Die Arbeiten des Fachgebiets e<sup>2</sup>n konzentrieren sich auf die Analyse von systemischen Wechselwirkungen zwischen der Wasserstoff- und der Stromnetzinfrastruktur. Insbesondere werden die Wechselwirkungen zwischen Strom- und Wasserstoffnetz, die durch Anlagen zur Erzeugung von grünem Wasserstoff (Elektrolyseure) und durch wasserstoffbasierte Kraftwerke entstehen, detailliert mit verschiedenen Optimierungsmodellen untersucht. So können die Anlagen je nach Standort und Betriebsweise den Ausbaubedarf im Stromnetz erhöhen oder verringern sowie das Ausmaß, in dem Stromnetzbetreiber in den geplanten Betrieb von Kraftwerken und flexiblen Lasten eingreifen müssen, um zu hohe Netzzbelastungen zu vermeiden. Mit den Optimierungsmodellen kann ermittelt werden, welche Standorte und Betriebsweisen für das Stromnetz in den verschiedenen Szenarien besonders günstig sind, wobei mögliche Restriktionen, die sich aus dem Wasserstoffnetz ergeben, berücksichtigt werden.

## TransHyDE-Sys: System analysis on transport solutions for green hydrogen

Hydrogen will play an important role in the future energy system, which is being examined from various sides in the BMBF-funded hydrogen lead project "TransHyDE". The "System Analysis" (TransHyDE-Sys) consortium has the overarching goal of mapping possible development perspectives for hydrogen transport with the help of model-based scenarios. To this end, two complementary approaches are being pursued: A stakeholder-driven approach and an independent systemic approach that considers infrastructure development with a focus on green hydrogen from the perspective of economic cost minimisation.

The work of the e<sup>2</sup>n department focuses on the analysis of systemic feedback effects between hydrogen and electricity grid infrastructure. In particular, the interactions caused by green hydrogen production plants (electrolyzers) and hydrogen-based power plants are examined in detail using various optimisation models. For example, depending on their location and mode of operation, these units can increase or decrease the need for expansion in the electricity grid. Furthermore, they can increase or decrease the extent to which electricity grid operators must intervene in the planned operation of power plants and flexible loads in order to avoid excessive grid loads. The optimisation models can be used to determine which locations and operating modes are particularly favourable for the electricity grid in the investigated scenarios, taking into account possible restrictions imposed by the hydrogen network.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

Gefördert durch: Bundesministerium für Bildung und Forschung unter dem  
Förderkennzeichen 03HY201T

Ansprechpartner

DR. SEBASTIAN WENDE-VON BERG (e<sup>2</sup>n, IEE)

Titel

**EU-SysFlex**

title

**EU-SysFlex**

### **EU-SysFlex: Pan-Europäisches Energiesystem mit einer effizienten koordinierten Nutzung von Flexibilitäten für die Integration eines hohen Anteils an EE**

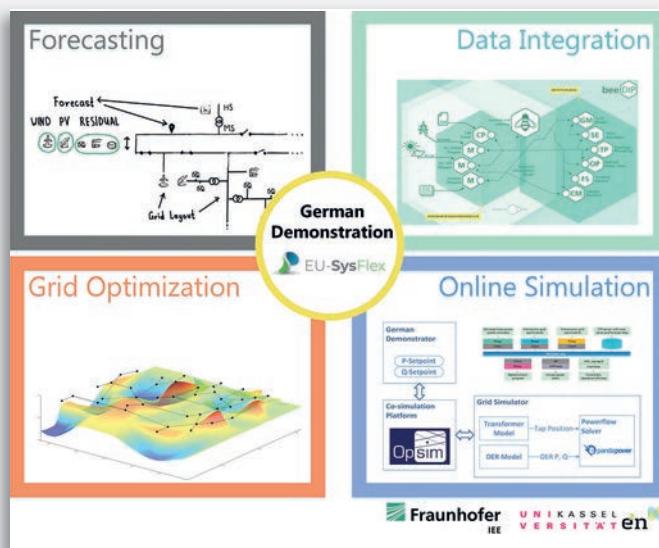
Ziel des Projektes EU-SysFlex war die Entwicklung eines Demonstrators (Projektrahmen siehe Abbildung) zur kombinierten Prognose, Optimierung, Datenintegration und online Netzsimulation für die Bereitstellung von Wirk- und Blindleistungsflexibilitäten aus dezentralen Erzeugungsanlagen. Diese Flexibilitäten aus dem Verteilnetz sollten eingesetzt werden zum Engpassmanagement im Übertragungsnetz unter den aktuellen und zukünftigen gesetzlichen Regelungen für die Netzbetriebsführung. Der Arbeitsschwerpunkt des Fachgebiets e<sup>2</sup>n lag auf der Netzzustandsschätzung, dem Engpassmanagement und der Netzsimulation. In enger Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IEE wurden die o.g. Module für die Netzbetriebsführung in einem Demonstrator beim Verteilnetzbetreiber MITNETZ Strom GmbH in der Netzeitwarte integriert und in einem langfristigen Feldtest verifiziert.

Neben der Umsetzung der Module hat das Fachgebiet e<sup>2</sup>n sich in der Grundlagenforschung zur Netzbetriebsführung im Rahmen des Projektes engagiert. Diese umfassten 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. 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, wurden weitere Vergleiche mit vorhandenen Engpassmanagement-Tools durchgeführt. Diese wurden im Rahmen der NEIS 2022 veröffentlicht.



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

### **EU-SysFlex: Pan-European system with an efficient coordinated use of flexibilities for the integration of a large share of RES**



Übersicht des Projektrahmens des deutschen Demonstrators in EU-SysFlex  
Overview of the project scope of the german demonstrator in EU-SysFlex

The main goal of the project EU-SysFlex was 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 were supposed to be used for congestion management in the transmission grid under the current and future energy law. The focus of the department e<sup>2</sup>n was the development of components for grid state estimation, grid congestion management and grid simulation.

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

In addition to the development tasks, the department e<sup>2</sup>n 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 as well as 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. Investigations on an AI-based grid optimization tool have yielded positive results and shown potential for practical applications. To further evaluate the advantages and disadvantages of the AI-based grid optimization tool, additional comparison with current grid congestion management tools were performed and published on the NEIS conference 2022.

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

Ansprechpartner

ZHENG LIU, M.SC.; MARCEL DIPP, M.SC. (e<sup>2</sup>n)

Titel

RPC2

title

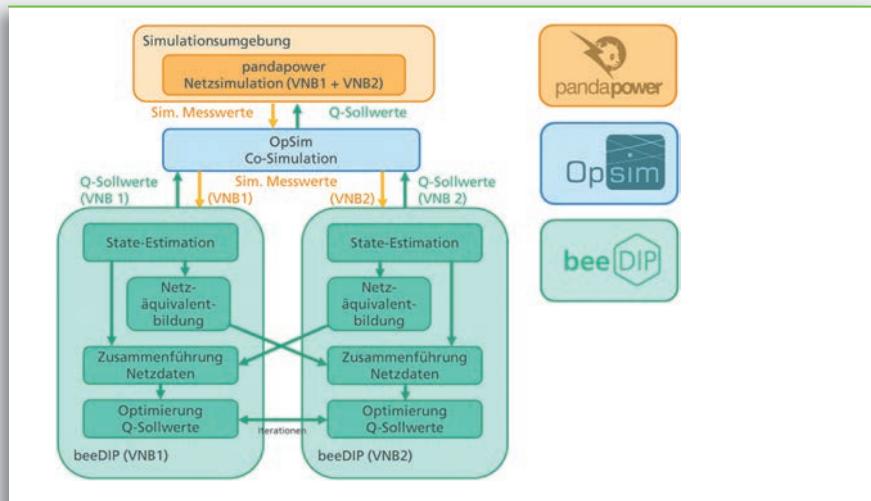
RPC2

## RPC2 – Betriebsführungsmodule für ein optimiertes spannungsebenen- und netzbetreiberübergreifendes Blindleistungsmanagement

Im Rahmen des Forschungsprojekts RPC2 untersucht das Fachgebiet e<sup>2</sup>n in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IEE mögliche Betriebsführungsstrategien für ein optimiertes spannungsebenen- und netzbetreiberübergreifendes Blindleistungsmanagement in der Mittel- und Hochspannungsebene. Die Abbildung zeigt die aufgesetzte System- und Simulationsumgebung. Das erste Modul „State Estimation“ wird zur Schätzung der aktuellen Netzzustände entwickelt. Während die Netzzustandsschätzung in der Hochspannungsebene die Bereinigung von Messfehlern zur Aufgabe hat, soll in der Mittelspannungsebene aus einer geringen Anzahl an Messwerten ein Netzzustandsabbild generiert werden. Hierzu werden Methoden der künstlichen Intelligenz benötigt und eingesetzt. 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 im dritten Modul zusammengeführt. Für den betrachteten Netzzustand werden dann im vierten 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 entwickelten Blindleistungs-Regelungsstrategien konnten erfolgreich mit den Leitwarten der VNBs gekoppelt werden. Die Nachbildung des durchgeführten Feldtests als Simulation ermöglichte zusätzlich eine weitere detailliertere Bewertung der Wirksamkeit dieser neuen Regelung.

## 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

System and simulation environment for optimized reactive power management across voltage levels and grid operators

In the research project RPC2, e<sup>2</sup>n in cooperation with the Fraunhofer IEE is investigating control strategies for optimized reactive power management across voltage levels and grid operators. The figure shows the set-up system and simulation environment.

The first module is developed to estimate the current grid states. While the purpose of state estimation at the high-voltage level is the correction of measurement errors, at the medium-voltage level, a grid state is generated from a small number of measurements. For this, methods of artificial intelligence were needed and applied. 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 their own grid information in the third module. The Q setpoints of the distributed energy resources are then optimized in the fourth module, where information about the grid equivalents is exchanged in each iteration of the optimization procedure.

The developed reactive power control strategies could be successfully coupled with the control center of grid operators. The field test allowed a detailed evaluation of the proposed reactive power management and a combined analysis within a simulated environment allowed for an even more detailed investigation of the results.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

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

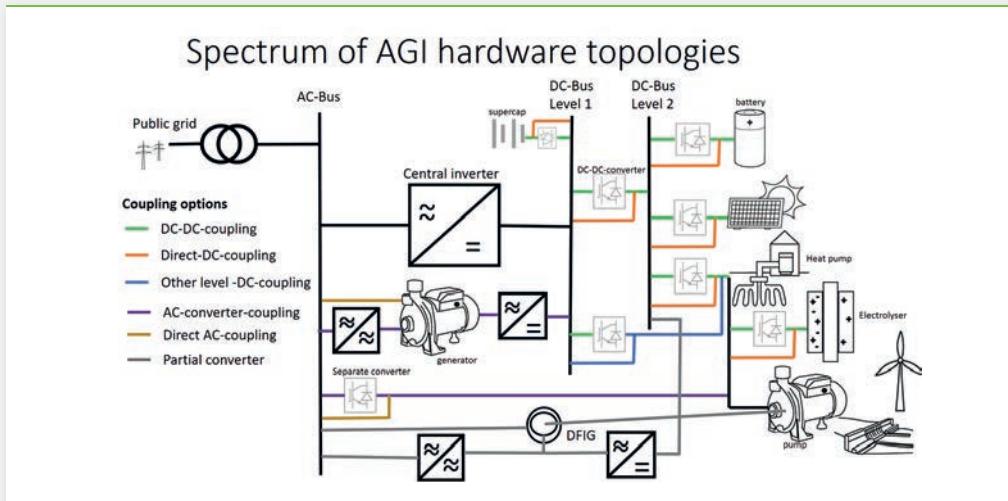
Ansprechpartner

DIPL.-ING. CHRISTIAN HACHMANN (e2n)

Titel

**AGISTIN**

title

**AGISTIN**

Topologische Optionen für gemeinsame Netzkopplung von Erzeugern, Lasten und Speichern

Topological options for common grid coupling of generators, loads and storages

### **AGISTIN: Advanced Grid Interface for innovative Storage Integration**

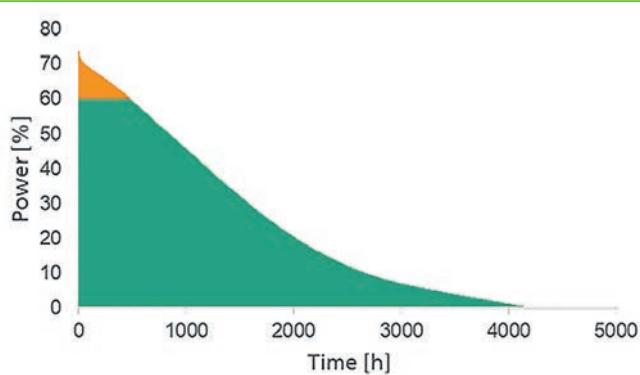
Das Projekt AGISTIN (Advanced Grid Interface for innovative Storage Integration) treibt die Entwicklung von NetzinTEGRATIONSarchitekturen für Energiespeicher mit am gleichen Standort befindlicher erneuerbarer Erzeugung und DC-Endverbrauch voran. Dies schließt den Ansatz der DC-Kopplung ein, der bei aktuellen PV+Speicher Hybrid-systemen unterstützt wird, und erweitert ihn um Endnutzer und Systemintegratoren sowie hybride Netzkopplungs-Ansätze. Mit einer optimierten gemeinsamen Netzkopplung können industrieller Netznutzer von verringertem Hardwareeinsatz, verringerten Kosten, verbesselter betrieblicher Effizienz und Flexibilität im Vergleich zu reinem AC-Parallelbetrieb profitieren.

### **AGISTIN: Advanced Grid Interface for innovative Storage Integration**

*The project AGISTIN (Advanced Grid Interface for innovative Storage Integration) proposes to develop grid integration architectures for energy storage with on-site renewables and emerging DC end uses. This includes the DC coupling approach considered in current PV + storage hybrids, extending it to include end use, grid users and system integrators as well as hybrid grid coupling approaches. With an optimized combined grid coupling, industrial grid users can benefit from the avoidance of additional hardware, reducing costs, improved operational efficiency, flexibility and self-consumption as compared to the mere parallel AC connection approach.*



Gefördert durch die Europäische Kommission im Rahmen des Horizon Europe Work Programme  
2021 – 2022 8. Climate, Energy and Mobility (European Commission Decision C(2021)6096 of 23 August 2021)



Laufzeitkurve einer PV-Anlage: In Deutschland können bis zu 3 % der Jahresenergie (orange) aus erneuerbaren Energien bei der Netzplanung als abgeregelt berücksichtigt werden  
*Duration curve of a PV plant: In Germany, 3 % of the annual energy of renewable energy resources can be assumed to be curtailed during grid planning*

### **SpiN-AI: Spitzenkappung und Netzausbauplanung – automatisiert und intelligent – Potenzialanalysen und Algorithmen**

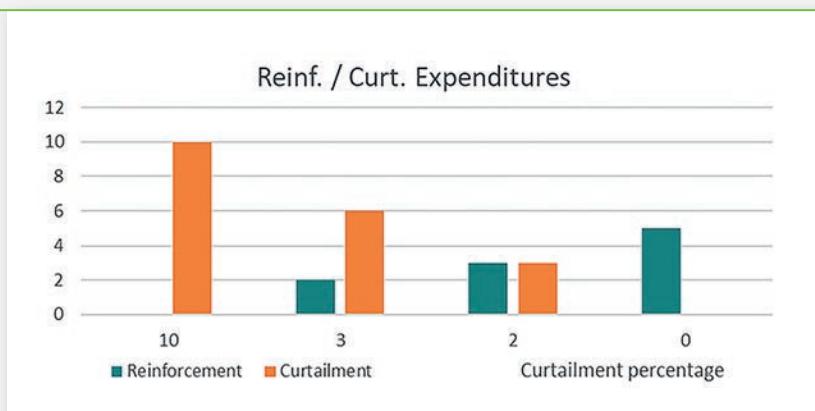
Im Projekt SpinN-AI (Kooperation des Fachgebiets e<sup>2</sup>n und des Fraunhofer IEE) wurden innovative und praxisnahe Methoden zur Spitzenkappung und Minimierung der dabei abgeregelten Energie untersucht und deren Auswirkungen auf die optimalen Investitionen bei der (kurz- und langfristigen) Netzausbauplanung evaluiert.

In SpinN-AI wurden verschiedene Optimierungsalgorithmen auf Basis der Lastflussrechnung, der optimalen Lastflussrechnung und auf Basis der risikobasierten stochastischen Programmierung für unterschiedliche zeitliche Auflösungen untersucht und entwickelt. Dabei wurden historische Einspeise- und Verbrauchszeitreihendaten und

### ***SpiN-AI: Spin-AI – Automated and Intelligent Peak Shaving and Grid Planning – Potential Analysis and Algorithms***

*In the project SpinN-AI (cooperation of the department e<sup>2</sup>n with the Fraunhofer IEE), innovative and practical methods for peak shaving and minimization of the curtailed energy have been investigated, besides evaluating their effects on optimum investments during short and long-term network expansion planning.*

*In SpinN-AI, various optimization algorithms based on power flow, optimal power flow, and risk-based stochastic programming have been studied and developed for several temporal resolutions, using historical feed-in and consumption time series data and scaling factors concerning forecast requirements. To accelerate*



Abregelung vs. Verstärkungsaufwand: Suche nach dem wirtschaftlich optimalen Gleichgewicht zwischen Abregelung und Netzverstärkung

*Curtailment vs. Reinforcement expenditures: searching for the economical optimum balance between curtailment and grid reinforcement*

Skalierungsfaktoren bezüglich prognostizierter Anforderungen verwendet. Um die Optimierung zu beschleunigen, erfolgte die Optimierung in der hochperformanten Skriptsprache Julia, die über eine Python-Schnittstelle mit der Simulationsumgebung verbunden war, die das Team von pandapower bereitgestellt hat. Zusätzlich wurde eine anwendungsnahe und benutzerfreundliche Benutzeroberfläche (SpiN-AI UI) entwickelt und getestet, um die untersuchten Methoden effizient anwenden zu können und den Verteilnetzbetreibern der Pfalzwerke Netz AG und der Energie Netz Mitte GmbH (EAM Netz GmbH) ein operatives Anwendungswerkzeug zur Verfügung zu stellen.

*the optimization, it has been carried out in the high-performance script language Julia connected via a Python interface to the simulation environment that the pandapower team had provided. Additionally, an application-oriented and user-friendly user interface (SpiN-AI UI) has been developed and tested to efficiently apply the investigated methods and to provide an operative application tool for the distribution system operators of Pfalzwerke Netz AG and Energie Netz Mitte GmbH (EAM Netz GmbH).*

Gefördert durch:



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

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Ansprechpartner

GOURAB BANERJEE, M.SC. (e2n, IEE); ROMAN BOLGARYN (IEE)

Titel

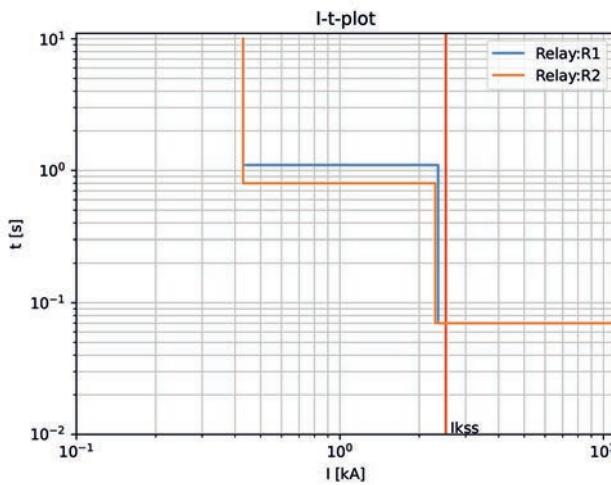
## AKTUELLE ENTWICKLUNGEN IN pandapower UND pandapipes

title

## RECENT DEVELOPMENTS IN pandapower AND pandapipes



I-t-Kurve zur Analyse des Schutzverhaltens von DTOC-Relais  
*I-t curve for the analysis of the protection behaviour of DTOC relays*



pandapower und pandapipes sind Open-Source Python-Bibliotheken, die Simulationen für die Analyse und Optimierung von elektrischen Energiesystemen sowie von Rohrleitungssystemen ermöglichen. Aufgrund der wachsenden Notwendigkeit, das Stromnetz an die Energiewende anzupassen, können diese Bibliotheken verwendet werden, um Arbeitsabläufe in der Analyse, Planung und dem Betrieb von Strom- und Rohrleitungsnetzen zu automatisieren.

Ein neues Modul wurde zu pandapower hinzugefügt, um das Schutzverhalten im Übertragungs- und Verteilungsnetz mit dem neu implementierten Modell des Überstromrelais zu untersuchen. Die implementierten Relaistypen sind Definite Time Over-Current (DTOC) und Inverse Definite Minimum Time (IDMT). Die Ausgaben der Analyse werden als I-t-Diagramm für weitere Analysen bereitgestellt (s. Bild).

Die Implementierung weiterer Schutzgeräte wird fortgesetzt. Hierfür haben wir die Kurzschlussberechnung erweitert, um die Phasoren für den Fehlerstrom und die Phasoren der Spannung unmittelbar nach dem Fehler zu erhalten.

Des Weiteren wurden Netzreduktionsmethoden implementiert, die es ermöglichen, große Stromsysteme mit statischen Netzequivalenten zu repräsentieren, und zwar um die Rechenperformanz zu verbessern. Die implementierten Methoden sind: REI-äquivalent, Ward-äquivalent und Extended Ward-äquivalent. Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit und Verständlichkeit der Daten wurde die Gruppierung

*pandapower and pandapipes are open-source Python libraries that provide simulations for analysis and optimization of electrical power systems and pipe grid systems, respectively. With the growing need to adapt grid planning and operation to the energy transition, these libraries can be used to automate workflows in power system and pipe grid analyses, planning, and operation.*

*A new module has been added to pandapower to study and analyze power system protection behavior in the transmission and distribution grid using the newly implemented overcurrent relay model. The implemented relay types are Definite Time Over-Current (DTOC) and Inverse Definite Minimum Time (IDMT). The outputs of the analysis are provided as the I-t diagram for further analysis. Implementation of further protection devices is ongoing. To enable this, we have enhanced the short-circuit calculation to allow obtaining the phasors for fault current and phasors of voltage immediately following the fault.*

*Furthermore, grid reduction techniques have been implemented that allow the representation of large power systems with static grid equivalents for computational reasons. The implemented methods are REI equivalent, Ward equivalent and Extended Ward equivalent. Grouping functionalities have been added to improve the clarity and comprehensibility of data. More precisely, several*

rungsfunktionalität hinzugefügt. Genauer gesagt können mehrere Elemente in einer Gruppe vereinigt werden, um z. B. einen Abzweig oder ein virtuelles Kraftwerk darzustellen. Als Ergebnis kann eine solche Gruppe mit Hilfsfunktionen auf einmal bearbeitet oder analysiert werden, wie z. B. Änderung der Skalierung im Abzweig, Berechnung der Verluste im Abzweig, Zusammenfassung von Erzeugung und Verbrauch usw.

Wir haben mit der Arbeit an FACTS-Geräten in pandapower begonnen. Bis jetzt haben wir zwei Geräte implementiert: Static Var Compensator (SVC) und Thyristor Controlled Series Compensator (TCSC), gemäß den Anweisungen in der PhD-Arbeit von Ara Panosyan. Temperaturabhängige Leistungsflussberechnung ist eine weitere Verbesserung der Leistungsflussberechnung, die es ermöglicht, aktuelle Wetterbedingungen zu berücksichtigen, anstatt worst-case Wetterbedingungen anzunehmen.

Fokus in der Weiterentwicklung von pandapipes war, die Erhöhung der Anwendbarkeit der Software auf große, realitätsnahe Systeme durch Verbesserungen der Berechnungsleistung. Außerdem wurden neue Komponententypen hinzugefügt, nämlich Druckregler, Stromsteuerung und Kompressor. Diese Verbesserungen werden besonders nützlich sein bei Simulationen von Stadtwärmennetzen. Schließlich wurde ein Konverter vom STANET-Datenformat zu pandapipes hinzugefügt.

Weitere Details zu diesen und anderen Funktionen von pandapower und pandapipes finden Sie in den Tutorials und Dokumentationen der Pakete auf den jeweiligen GitHub-Repositorien, Webseiten und Dokumentationsseiten:

<https://www.pandapower.org/>  
<https://www.pandapipes.org/>

<https://github.com/e2nIEE/pandapower>  
<https://github.com/e2nIEE/pandapipes>

<https://pandapower.readthedocs.io/en/latest/>  
<https://pandapipes.readthedocs.io/en/latest/>

*elements can be united in a single group e.g. to represent a feeder or a virtual power plant. As a result, such a group can be modified or analyzed at once using helper functions, such as modifying scaling of the feeder, calculating the feeder losses, summarizing generation and consumption, etc.*

*We have started the work on FACTS devices in pandapower. So far, we have implemented two devices: Static Var Compensator (SVC) and Thyristor Controlled Series Compensator (TCSC), following the directions in the PhD thesis of Ara Panosyan. A Temperature-Dependent Power Flow (TDPF) calculation is another enhancement of the power flow calculation which allows considering actual weather conditions rather than worst-case weather assumptions.*

*The focus of the developments in pandapipes was on making the software applicable to large-scale, real-world systems via improvements of computational performance. Furthermore, new component types were added, namely a pressure regulator, a flow control, and a compressor. These enhancements will be especially useful in simulations of district heating grids. Finally, yet importantly, the a converter from the STANET data format to pandapipes has been added.*

*More details on these and other features of pandapower and pandapipes can be found in the tutorials and documentations of the packages on the respective GitHub repositories, web pages, and documentation pages:*

<https://www.pandapower.org/>  
<https://www.pandapipes.org/>

<https://github.com/e2nIEE/pandapower>  
<https://github.com/e2nIEE/pandapipes>

<https://pandapower.readthedocs.io/en/latest/>  
<https://pandapipes.readthedocs.io/en/latest/>

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**

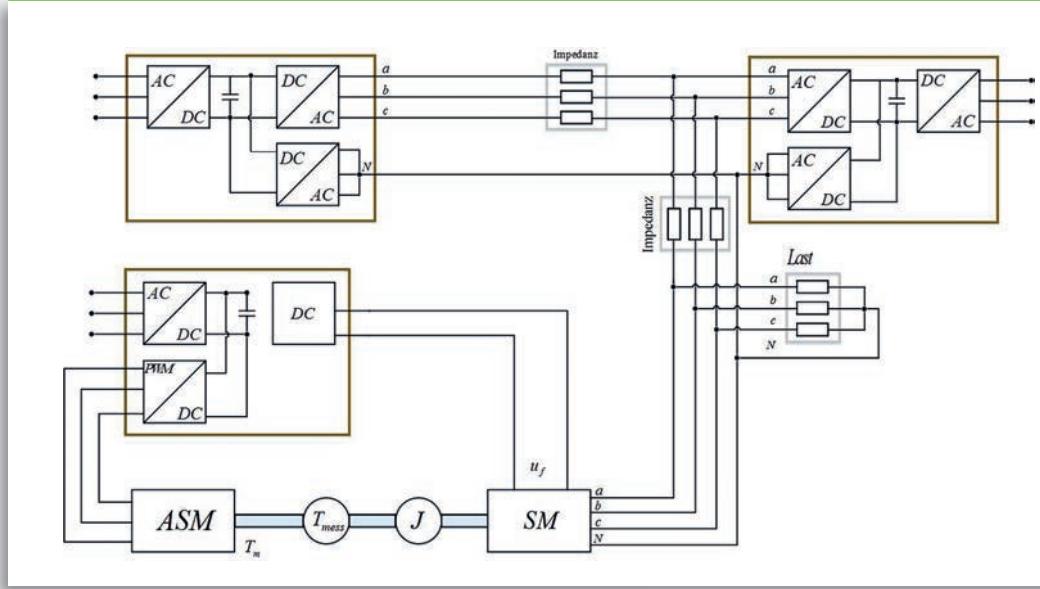
Im Jahr 2016 wurde am Fachgebiet e<sup>2</sup>n ein Microgrid-System bestehend aus zwei Umrichtern, einem Maschinensatz und einer Konfigurationseinheit aufgebaut und in Betrieb genommen.

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

### **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 e<sup>2</sup>n 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

werden müssen. Um solche komplexen Systeme analysieren und bewerten zu können, ist eine taktsynchrone Erfassung sämtlicher Betriebsparameter wie Spannungen, Ströme, Drehmomente, Temperaturen, Schwingungen, etc. erforderlich. Eigens für solche Anwendungen existiert im FG e<sup>2</sup>n 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 e<sup>2</sup>n 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

DR. LUKAS PAUSCHER, DR. DORON CALLIES, DR. JAN DOBSCHINSKI

Titel

**MEDAILLON**

title

**MEDAILLON**

## **Generierung eines offenen meteorologischen Datensatzes mit zeitlich und räumlich hoher Auflösung für die Systemanalyse und -wirtschaft**

In diversen Studien zur Analyse und Planung von Energiesystemen, Netzen, EE-Anlagen, Betriebsführungsstrategien und Energiemärkten werden Wettermodelldaten als Eingang für Simulationsmodelle benötigt. Die eingesetzten Daten und ihre Genauigkeit haben somit einen direkten Einfluss auf die Ergebnisse, anschließende Maßnahmen und energiewirtschaftliche Entwicklungspfade. Oftmals werden verschiedene Wettermodelldaten und Verarbeitungsmethoden eingesetzt, was dazu führt, dass systemanalytische Ergebnisse nur bedingt interpretierbar, transparent, nachvollziehbar und untereinander vergleichbar sind. Zudem haben verschiedene Studien gezeigt, dass die aktuell eingesetzten Modelldaten aus Anwendersicht noch deutliche Schwachstellen aufweisen.

Das übergeordnete Ziel des Projektes umfasst die Erstellung eines neuen, anwenderfreundlichen, offenen, optimierten und hochauflösten meteorologischen Datensatzes für Deutschland sowie dessen Etablierung als meteorologischer Standarddatensatz innerhalb der Systemanalyse und Energiewirtschaft. Die Daten sollen 15-Jahres-Zeitreihen in einer Auflösung von 250 x 250 m umfassen und alle für die Systemanalyse relevanten Größen (Wind, Globalstrahlung, Temperatur usw.) beinhalten. Zusätzlich wird eine Bereitstellung von Informationen der zeitlichen und räumlichen Unsicherheit der meteorologischen Zeitreihen angestrebt.

Durch eine frühzeitige Nutzereinbindung wird die Entwicklung des Datensatzes entsprechend der Nutzeranforderungen sichergestellt. Für die technische Umsetzung werden neue Ansätze aus dem Bereich des Wettermodell-Reanalyse-Ensembles, aber auch die Anwendung von strömungsmechanischen, statistischen und Machine-Learning-Verfahren eingesetzt.

## ***Development of an open meteorological data set with high temporal and spatial resolution for energy system analysis***

*Various studies analysing and planning energy systems, grids, renewable energy plants, operation management strategies and energy markets require data from weather models as an input to carry out simulations. The input data to these simulations and its accuracy therefore have a significant influence on study results, subsequent recommendations, measures and development paths of the energy system. In practice, different studies often rely on different weather models and post-processing methods of the data provided by the weather models. This means that the comparability of different energy system modelling studies is often limited and it is often difficult to compare, interpret and contrast their results in a meaningful and transparent way. In addition, various studies have shown that the weather model data, which are used today, still have significant weaknesses from the user's point of view.*

*The overall objective of the project Medaillon is to create a new, user-friendly, open, high-quality and high-resolution meteorological data set for Germany. Moreover, the project aims to establish the data set as the standard meteorological data set used for system analysis and other applications in the energy system in Germany.*

Gefördert durch:



**Gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz unter dem Förderkennzeichen 03EI1059B**

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Ansprechpartner

DR. LARS-PETER LAUVEN (e<sup>2</sup>n)

Titel

**MEO**

Flussdiagramm des ersten  
MEO-Szenarios Photovoltaik  
Flowchart of the first MEO-Scenario  
Photovoltaics

### MEO – Modellexperimente in der operativen Energiesystemanalyse

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 Teilespektre der Systeme untersucht bzw. Vereinfachungen, wie z.B. hinsichtlich der zeitlichen und räumlichen Auflösung, vorgenommen.

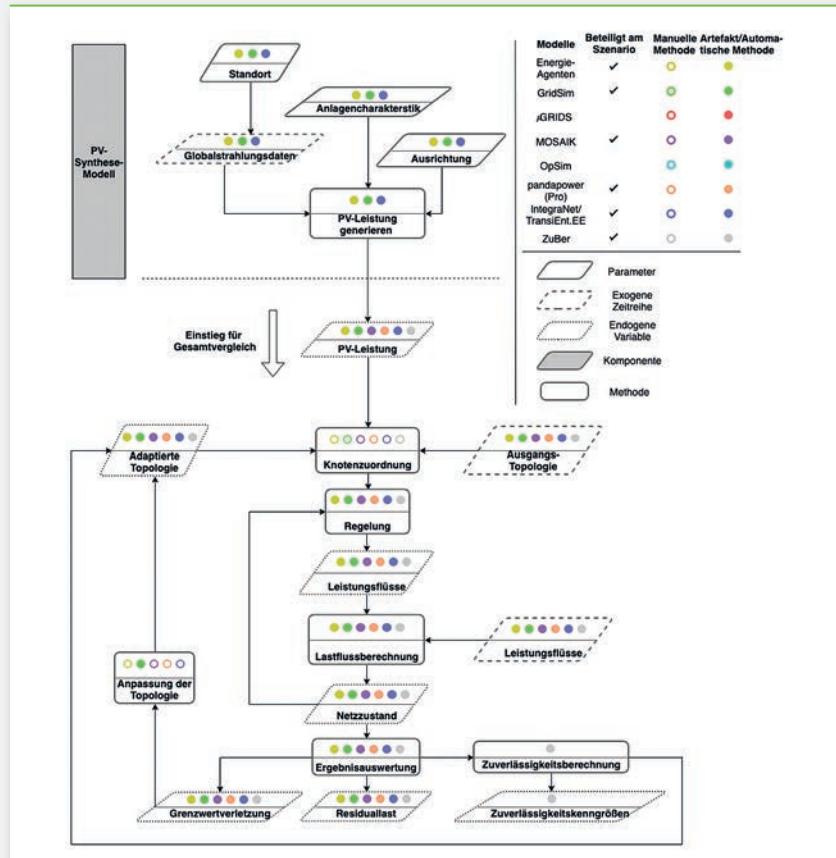
Zur Analyse von Energiesystemen existieren vielzählige Anwendungen und Modelle, die bestimmte Teilespektre abdecken, aber auch immer wieder untereinander Überschneidungen in ihren Untersuchungsgebieten aufweisen. Das Fachgebiet Energiemanagement und Betrieb elektrischer Netze entwickelt in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IEE mit pandaplan (ehem. pandapower Pro) eine dieser Anwendungen. Das Ziel des Projektes MEO war es, die Anwendungen und Modelle der acht Projektpartner in verschiedenen Fragestellungen miteinander zu vergleichen. Dort, wo die Modelle Überschneidungen aufweisen, wurde untersucht, ob die Ergebnisse vergleichbar sind und wenn nicht, aus welchen Gründen. Des Weiteren wurde verglichen, 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.

Gefördert durch:

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

**Gefördert durch: Bundesministerium  
für Wirtschaft und Klimaschutz unter  
dem Förderkennzeichen 03ET4078C**

title  
**MEO**



### MEO – Model experiments in operative energy system analysis

*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 is analyzed.*

*Many different applications and models exist to analyze the different topics of energy systems and some of them have overlapping research topics. The Department of Energy Management and Power System Operation is jointly developing one of those applications, pandaplan (former pandapower Pro), with Fraunhofer IEE. The objective of MEO was to compare applications and models of the eight project partners in different research topics. Results of overlapping analyses were compared and in case of differences, the causes were identified. Furthermore, the methodical approaches for model creation and simulation were compared and recommendations were made concerning the suitability of methods to answer a specific research question.*

Ansprechpartner

PROF. DR.-ING. MARTIN BRAUN (e<sup>2</sup>n)

title

## **POWER AND ENERGY STUDENT SUMMIT (PESS) 2021 AND PESS AND POWER ELECTRONICS STUDENT SUMMIT (PELSS) 2022**

Der **Power and Energy Student Summit (PESS)** und **Power Electronics Student Summit (PELSS)** haben 2022 erstmals als gemeinsame Fachkonferenz auf den Gebieten der elektrischen Energietechnik und Leistungselektronik stattgefunden. Der PESS ist bereits eine etablierte Veranstaltung, die mit dem erstmals organisierten PELSS als gemeinsame Konferenz verbunden wurde. Unter der Leitung von Professor Martin Braun und Professor Marco Jung organisierten das Fachgebiet e<sup>2</sup>n, der Fachbereich Elektrotechnik, Maschinenbau & Technikjournalismus der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg sowie das Fraunhofer IEE die Konferenz. Nachdem der PESS 2021, ebenfalls unter der Leitung von Professor Martin Braun, digital veranstaltet wurde, konnte die dreitägige Veranstaltung 2022 in Präsenz am Fraunhofer IEE in Kassel stattfinden.

Die Veranstaltung richtete sich an Studierende und Doktorand\*innen, die im Rahmen der Konferenz erste Erfahrungen mit der Veröffentlichung eigener Publikationen vor einem Fachpublikum sammeln konnten. Die anschließenden Diskussionen und Fachgespräche dienten als Plattform für den wissenschaftlichen Austausch ebenso wie für das Knüpfen von Netzwerken. Im Mittelpunkt der Konferenz standen die Beiträge der Teilnehmenden zu ihren Forschungsthemen, die für die Teilnahme einen Review-Prozess durchlaufen mussten. Eine Veröffentlichung dieser Artikel erfolgte in der Forschungsdatenbank IEEE Xplore.

Insgesamt wurden die Paper-Präsentationen in beiden Jahren auf verschiedene Paper-Sessions aufgeteilt. 2021 gab es vier Sessions zu den Themen „Grid Planning and Energy Management – Power Quality, Power Distribution System and Storage“, „Grid Operation I – Operation, Converter and Control“, „Grid Operation II – Restoration, Short-circuit/Fault and Protection“ und „High Voltage Engineering & Cross-Cutting – Modelling and Simulation“. 2022 wurden in fünf Sessions die folgenden Themen behandelt: „Power Converter and Electrical Machine Control Strategies“, „Realtime Simulation, Testing and Protecting“, „Power Electronics Topologies, Components and Behaviours“, „Grid Operation and Control“ und „Grid Planning“. Insgesamt haben 2021 20 Teilnehmer\*innen und 2022 30 Teilnehmer\*innen die Ergebnisse ihrer Forschungsarbeiten vorgestellt.

*The **Power and Energy Student Summit (PESS)** and the **Power Electronics Student Summit (PELSS)** took place for the first time as a joint conference in the fields of electrical power engineering and power electronics in 2022. The PESS is already an established event that was combined with the PELSS, which was organized for the first time, to a joint conference. The conference was organized under the direction of Professor Martin Braun and Professor Marco Jung by the Department of Energy Management and Power System Operation at the University of Kassel, the Department of Electrical Engineering, Mechanical Engineering & Technical Journalism at the Bonn-Rhein-Sieg University of Applied Sciences and Fraunhofer IEE. After the PESS 2011, also under the direction of Professor Martin Braun, was held digitally, the three-day event could take place in presence at the Fraunhofer IEE in Kassel in 2022.*

*The event addressed students and PhD students who were able to collect initial experience with presenting their own publications in front of a scientific audience during the conference. The subsequent discussions and expert talks served as a platform for scientific exchange as well as for networking. The conference focused on the contributions of the participants on their research topics, which had to go through a review process to participate. These articles have been published in the research database IEEE Xplore.*

*Overall, the paper presentations were divided into different paper sessions in both years. In 2021, there were four sessions on the topics "Grid Planning and Energy Management – Power Quality, Power Distribution System and Storage", "Grid Operation I – Operation, Converter and Control", "Grid Operation II – Restoration, Short-circuit/Fault and Protection", and "High Voltage Engineering & Cross-Cutting – Modeling and Simulation". In 2022, the following topics were covered in five sessions: "Power Converter and Electrical Machine Control Strategies", "Realtime Simulation, Testing and Protecting", "Power Electronics Topologies, Components and Behaviours", "Grid Operation and Control", and "Grid Planning". A total of 20 participants in 2021 and 30 participants in 2022 presented the results of their research, respectively.*



Teilnehmende der Fachkonferenz PESS und PELSS 2022 am Fraunhofer IEE

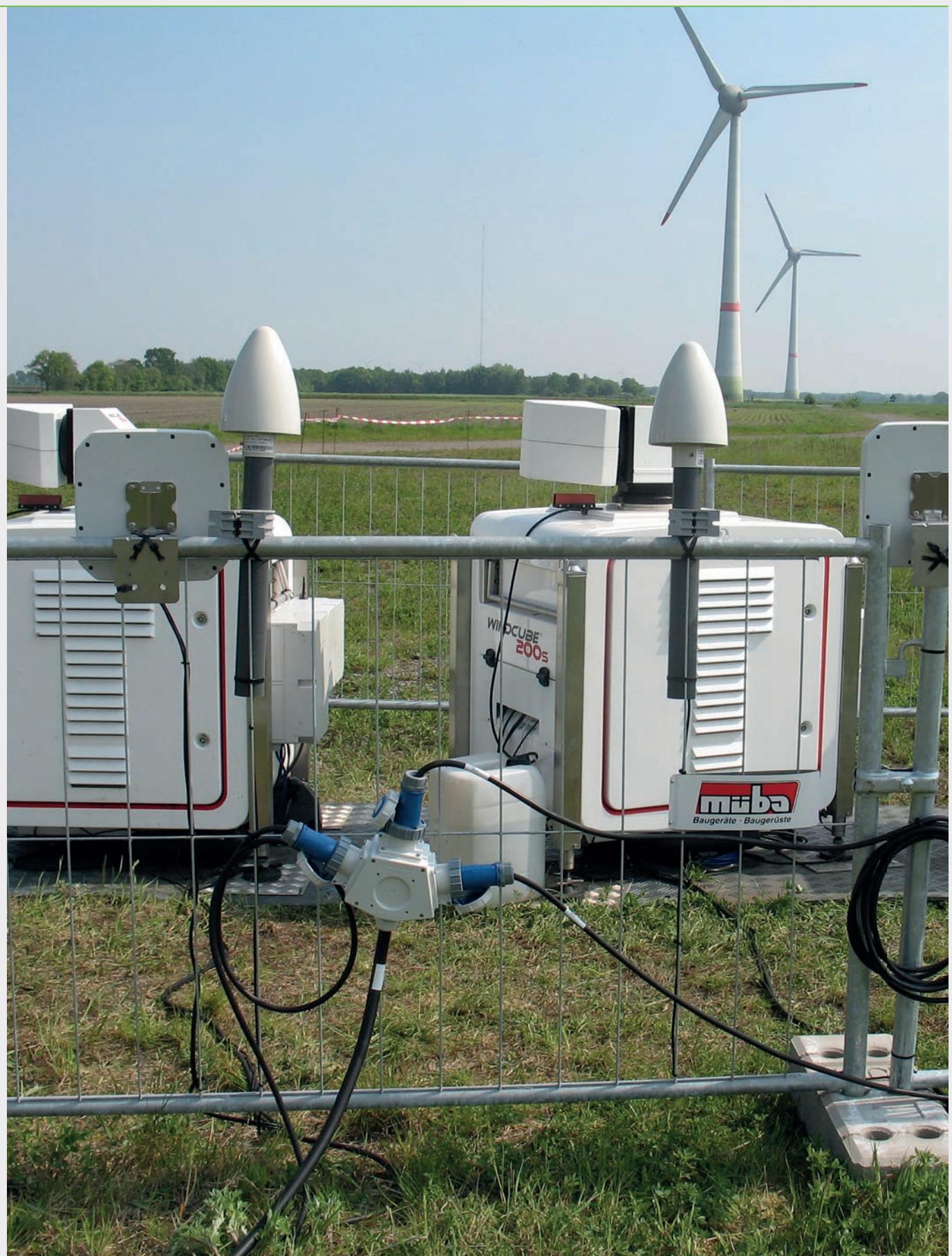
*Participants of the conference PESS and PELSS 2022 at Fraunhofer IEE*

Neben den Präsentationen der Studierenden und Doktorand\*innen gab es auf beiden Konferenzen Keynote Sessions. 2021 gab es eine Keynote von Anne-Katrin Marten von 50Hertz zum Thema „System operation challenges on our common journey towards a green power system“, eine Keynote von Kai Boldt von EAM Netz zum Thema „New Tasks for Grid Calculations in Distribution Systems“ sowie eine Keynote von Ben Gemsjäger von Siemens zum Thema „Smart Infrastructure in 2030 – Planning Urban Energy System“. 2022 gab es eine Keynote von Prof. Dr. De Doncker der RWTH Aachen über MVDC (Medium Voltage Direct Current) Grids sowie eine Besichtigung bei SMA und eine Laborführung in den neuen Räumen des Fraunhofer IEE.

Das CIGRE Next Generation Network hat 2022 die Begrüßungsveranstaltung gesponsert und die beiden besten Papers sowie die beste Präsentation mit einem Preis gewürdig. 2021 wurden die Preise an die zwei besten Papers und den besten Vortrag vom Young Energy Net gesponsert.

*In addition to the presentations by the students and PhD students, there were keynote sessions at both conferences. In 2021 there was a keynote by Anne-Katrin Marten from 50Hertz on the topic "System operation challenges on our common journey towards a green power system", a keynote by Kai Boldt from EAM Netz on the topic "New Tasks for Grid Calculations in Distribution Systems" and a keynote by Ben Gemsjäger from Siemens on the topic "Smart Infrastructure in 2030 – Planning Urban Energy System". In 2022 there was a keynote by Prof. Dr. De Doncker from RWTH Aachen University on MVDC (Medium Voltage Direct Current) grids as well as a visit to SMA and a laboratory tour in the new premises of Fraunhofer IEE.*

*The CIGRE Next Generation Network sponsored the 2022 welcome event and recognized the two best papers and the best presentation with an award. In 2021, the awards for the two best papers and the best presentation were sponsored by Young Energy Net.*





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 (IEE). Dieser vom Fachgebiet initiierte „Pipeline“-Gedanke der Kooperation zwischen Universität und Fraunhofer IEE hat vielfältige Dimensionen. Seinem Auftrag nach hat ein Fraunhofer Institut Ergebnisse universitäter 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:***

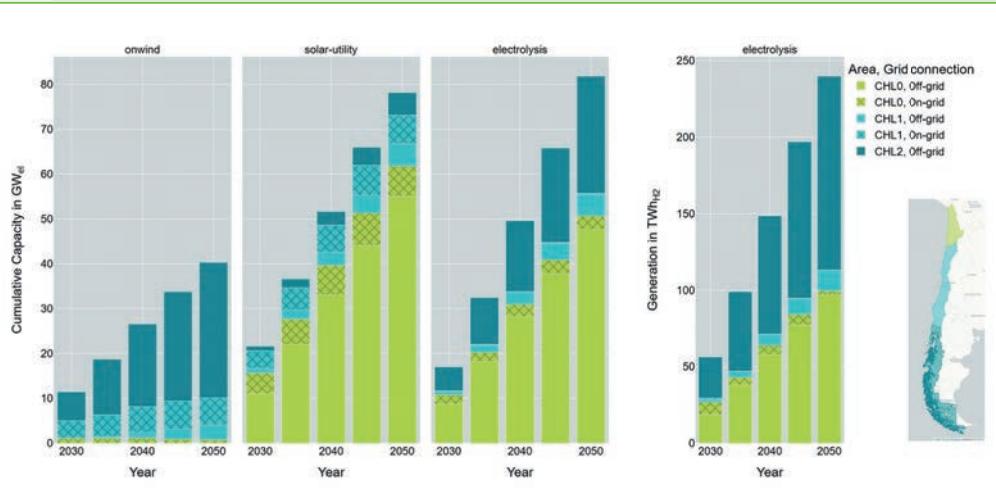
- **Systemtheorie der Energiewende**
- **Informations- und Kommunikationsstrukturen in der Energiewirtschaft**
- **Standortbewertung für Windenergieanlagen**
- **Windenergie als Teil des Energieversorgungssystems**

Prof. Dr. rer. nat. Clemens Hoffmann

Dr.-Ing. Reinhard Mackensen

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

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



Kumulierte Erzeugungskapazität in den drei Energiesystemmodellregionen Chiles (CHL0, CHL1, CHL2) für Onshore-Wind, Freiflächen PV und Elektrolyseure für die Stützjahre 2030, 2035, 2040, 2045 und 2050. Zusätzliche Darstellung der Wasserstoffproduktion der Elektrolyseure für die Stützjahre (vorläufige Modellergebnisse)  
*The focus research area urban energy system deals with the current CHL1, CHL2) for onshore wind, ground-mounted PV plants, and electrolyser for years 2035, 2040, 2045 and 2050. Additionally, the production of hydrogen is shown (preliminary model results)*

## DeV-KopSys-2: Dekarbonisierung Verkehr – Rückkopplung Energiesystem – Global bis Regional

Im Projekt werden die Einflussfaktoren auf die Erreichbarkeit der Klimaziele des Verkehrssektors in Deutschland unter besonderer Berücksichtigung der Entwicklungen globaler, europäischer und nationaler Erzeugungs- und (Netz/Pipeline-) Transportkapazitäten analysiert. Von besonderem Interesse sind Bandbreiten globaler PtX-Exportpotenziale bis zum Jahr 2045/2050, Rahmenbedingungen des Strom- und Gasmarktes auf europäischer Ebene und der Ausbau der Stromnetze in Deutschland in Hinblick auf Elektromobilität und den Ausbau Erneuerbarer Energien auf regionaler Ebene.

In einem ersten Projektabschnitt wurde eine intensive Datenrecherche zur Erzeugungs- und Verbrauchsstruktur der relevanten Sektoren des Energieversorgungssystems zu den Fokusländern Chile und Marokko durchgeführt. Mithilfe diverser Submodule wurden diese Daten genutzt, um stündliche Profile für den Einsatz- und den Verbrauch der Anlagen des Strom-, Wärme- und Verkehrssektors zu generieren. Das Energiesystemmodell Framework EMPRISE wurde um projektrelevante Funktionalitäten erweitert. Somit können bereits vorläufige Optimierungsergebnisse zu den beiden Fokusländern erzeugt und Sensitivitätsrechnungen durchgeführt werden.

## DeV-KopSys-2: Decarbonization of transport – energy system feedback – global to regional

*In the project, the influencing factors on the achievability of the climate targets of the transport sector in Germany are analysed with special regard to the developments of global, European and national generation and (grid/pipeline) transport capacities. Of particular interest are bandwidths of global PtX export potentials up to the year 2045/2050, framework conditions of the electricity and gas market on the European level and the expansion of the electricity grids in Germany concerning electromobility and the expansion of renewable energies on the regional level.*

*In the project's first phase, intensive data research was conducted on the generation and consumption structure of the relevant sectors of the energy supply system in the focus countries Chile and Morocco. With the help of various sub-modules, these data were used to generate hourly profiles for the input and consumption of the plants in the electricity, heat and transport sectors. The EMPRISE energy system model framework was extended with project-relevant functionalities. The model already generates preliminary optimisation results for the two focus countries, and sensitivity calculations can be carried out.*

<https://www.uni-kassel.de/eecs/ines/forschung/devkopsys2>

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

**Gefördert durch: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz  
unter dem Förderkennzeichen 16EM5008-1**

Ansprechpartner

DR. SASCHA HOLZHAUER (INES)

Titel

**WAERMER**

title

**WAERMER**

### WAERMER – Waermewende im urbanen Gebäudebestand mit Hilfe interaktiver Entscheidungsraumanalyse

Für die klimaneutrale Transformation der Wärmeversorgung sind deutliche Investitionen seitens der Eigentümer im Gebäudebestand nötig, die mit den kommunalen Energiesystemen abgestimmt sein müssen. Das Projekt WAERMER soll Planungswerzeuge weiterentwickeln und bereitstellen, die einerseits technisch umsetzbare, versorgungssichere, CO<sub>2</sub>-neutrale und kostenoptimale kommunale Wärmeversorgungssysteme aufzeigen, und andererseits die Präferenzen und Handlungsspielräume der Gebäudeeigentümer berücksichtigen. Für die dynamische Abbildung der individuellen Entscheidung werden im Projekt Gebäudeeigentümer zu relevanten Faktoren ihres Entscheidungsprozesses aus umweltpsychologischer Sicht befragt. In einem iterativen Prozess können dann sowohl Maßnahmen zur strategischen Anreizung erforderlicher individueller Investitionen erarbeitet und simulativ untersucht werden als auch Anpassungen der technisch optimalen Energiesystemarchitektur vorgenommen werden. Dazu werden Bewertungswerzeuge für Wärmeversorgungskonzepte mit agentenbasierter Simulation verknüpft. Letztere berücksichtigt explizit den Einfluss von Energieberatern und Installateuren vor dem Hintergrund ihrer sich verändernden Kenntnisse und Empfehlungen.

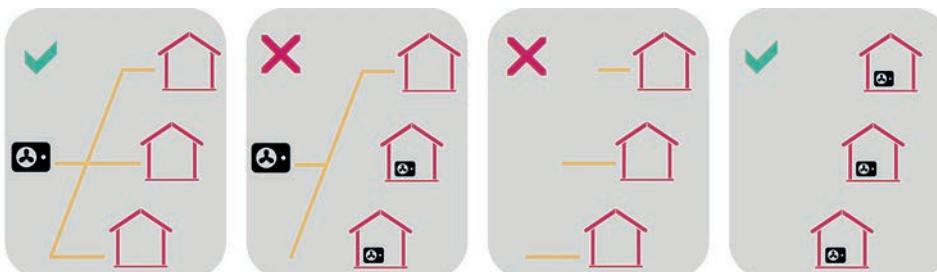
Von großer Bedeutung ist der partizipative Charakter des Entscheidungsunterstützungsprozesses, der Stakeholder im Rahmen von Workshops und sogenannten Decision Theaters informiert und beteiligt. Dabei sollen zunächst Kriterien sowie formale und wirtschaftliche Randbedingungen erfasst werden, innerhalb derer sich die institutionellen und wirtschaftlichen Akteure der Partnerkommune bewegen. Die Ergebnisse der Planungsinstrumente werden dann an die Stakeholder zurückgespielt und können von diesen bewertet werden. Als Pilotkommune konnte die Landeshauptstadt Kiel für das vom BMWK geförderte Projekt gewonnen werden.

### WAERMER – Heat Transition of the Urban Building Stock by Interactive Decision Space Analysis

The climate neutral transition of the heat supply system requires high investments by building owners which need to align with plans for the local energy infrastructure. The project WAERMER shall apply a methodical integration of energy system optimisation on an urban level and agent-based modelling of individual investment behaviour including preferences and scope of action. It shall help identify the requirements for a successful transition of heat provision in the urban building stock towards CO<sub>2</sub>-neutrality. Building owners are surveyed about relevant factors of their investment decision making. In an iterative process, measures to incentivise individual investments can be developed and simulated as well as required adaptations to the technical energy system identified. The agent-based modelling explicitly considers the influence of energy consultants and craftspeople concerning their changing knowledge and recommendations.

The participatory approach of the decision making process is important. Stakeholders get informed by workshops and decision theatres and initially state their criteria and formal as well as economic boundary conditions. Results of the planning tools are played back to stakeholders to receive their evaluation. For the first application the state capital Kiel is involved.

<https://uni-kassel.de/go/waermert>



Kommunale Infrastruktur wie ein Fernwärmenetz und Präferenzen sowie Handlungsspielräume der Gebäudeeigentümer sollten für eine nachhaltige Wärmeversorgung zueinander passen

Local infrastructure such as thermal grids and preferences as well as the scope of action of building owners need to align for sustainable heat provision

Gefördert durch:



Gefördert durch: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz  
unter dem Förderkennzeichen 03EI5235A

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Ansprechpartner

LEON-MORITZ SCHELLHASE (INES)

Titel

**MONITORING DER ENERGIEVERSORGUNG  
DES FRAUNHOFER IEE NEUBAUS**

*title*

**MONITORING OF ENERGY SUPPLY OF  
FRAUNHOFER IEE BUILDING**

Das vom Fachgebiet Integrierte Energiesysteme koordinierte Projekt behandelt den Neubau des Fraunhofer-Instituts für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik IEE. Das Konzept des Gebäudes und der Anlagentechnik ist energetisch sehr ambitioniert und umfasst u.a. ein Eisspeicher-Wärmepumpen-System sowie fassadenintegrierte Lüftungsmodule. Das Gebäude lässt sich über das Automationssystem OGEMA gewerkeübergreifend steuern und sowohl energetisch als auch raumklimatisch optimieren.

Das Projekt beinhaltet ein umfangreiches Monitoring aller relevanten Anlagenparameter und Zustandsgrößen sowie eine Datenerhebung und Auswertung zum raumklimatischen Komfort und der Nutzerzufriedenheit. So können die Energieversorgungsanlagen nachjustiert werden, um ein optimales Zusammenspiel aller Komponenten zu erreichen. Dadurch wird eine energetische Einsparung von rund 10% erwartet.

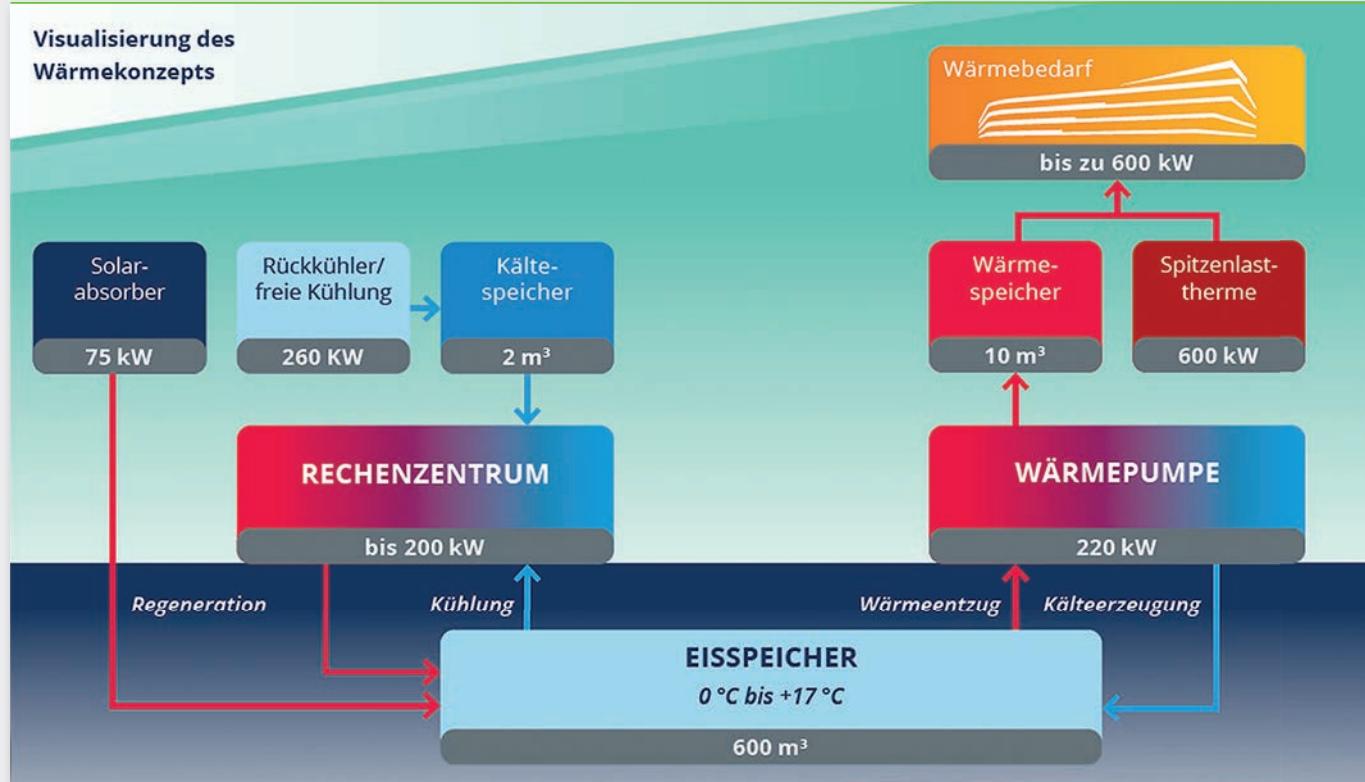
Die Übertragbarkeit der Ergebnisse ist nicht nur für alle Planer, Gebäudeleitechniker, Betreiber und Nutzer von Nichtwohngebäuden mit komplexer Energieversorgungsstruktur von hoher Relevanz, sondern auch für die Forschung im Bereich energieeffizienter Gebäude und Gebäudetechnik sowie für die Entscheidungsträger für geeignete Fördermaßnahmen.

*The project, coordinated by the University of Kassel, deals with the new building of the Fraunhofer Institute for Energy Economics and Energy Systems Technology IEE. The building hosts a very ambitious energy supply system that includes an ice storage heat pump system and façade-integrated ventilation modules. Hereby the integrated OGEMA automation system provides the option to control and optimize the building across all trades for both energy and indoor climate.*

*The project includes comprehensive monitoring of all relevant system parameters and status variables as well as data collection and evaluation on indoor climate comfort and user satisfaction. In this way, the energy supply systems offers the possibility to readjust to achieve optimal interaction between all components. After Optimization, the expectations of energy savings are around 10%.*

*The project will demonstrate the usability of integrated innovative technologies and the achievement of energy savings by optimizing operations in ultra-low energy buildings.*

*The transferability of the results is not only highly relevant for all planners, building control engineers, operators, and users of non-residential buildings with complex energy supply structures, but also for research in the field of energy-efficient buildings and building services engineering as well as for decision-makers for suitable funding measures.*



Im Rahmen des Projektes wird aufgezeigt, wie innovative Technologien integriert sowie energetische Potentiale durch Betriebsoptimierungen in Niedrigstenergiegebäuden erschlossen werden können

*The project shows the integration of innovative technologies and realisation of energy savings by operations' optimisation in low energy buildings*

## Ziele

Ziel ist die Optimierung des Zusammenspiels der Gebäude- und Anlagentechnik durch Monitoring und Nutzerbefragung sowie die daraus resultierende Energieeinsparung. Gleichzeitig steht die Übertragbarkeit der Ergebnisse für Nichtwohngebäude mit komplexer Energieversorgung im Fokus.

## Objectives

*The aim is to optimize the interaction of building and systems technology through monitoring and user surveys, resulting in energy savings. At the same time, the focus is on the transferability of the results for non-residential buildings with complex energy supply.*

<https://www.uni-kassel.de/eecs/ines/forschung/fhg-iee-neubau>

Ansprechpartner

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

Titel

**DEINE ENERGIEWENDE**

title

**YOUR ENERGY TRANSITION**

Ausschnitt der Benutzerschnittstelle  
des Client-Server-Systems

Wert	Einheit
4.178.600	Kapitaleinsatz Eigenstromerzeugung
3,76	Eigenstrompreis
5,386	Opportunitäts-Rendite auf einges...
930.000	Kapitaleinsatz Wärmeerzeugung
3,97	Eigenwärmepreis
1.829	Opportunitäts-Rendite auf einges...

## Entscheidungsunterstützungsplattform für die Transformation von Strom-Wärmesystemen

Wirtschaftsunternehmen und Kommunen stehen national und weltweit unter hohem Druck, ihre Energiekosten auf dem Hintergrund immer schwerer vorherzusehender Entwicklungen auf den Energiemärkten zu stabilisieren, sowie ihre Beiträge zur Erreichung der klimapolitischen Ziele zu leisten. Unternehmen und Kommunen sind CO<sub>2</sub>-Emittenten durch ihren Stromverbrauch, die Warmwasserbereitung, sowie bezüglich der anlagenbezogenen Mobilität. Transformationen der Energiebereitstellung sind grundsätzlich **Projekte von großer Komplexität**, bei denen die Integration der verschiedenen Energieformen, die lokalen Randbedingungen, die Finanzierung, die Behandlung der rechtlichen Fragen, sowie die Stakeholder-Kommunikation in einem umfassenden Konzept adressiert werden müssen, um eine technisch und wirtschaftlich optimale Lösung zu erreichen. Eine übergeordnete Gesamtplanung ist der Schlüssel, um dieses Ziel zu erreichen. Die derzeitige Marktsituation zeigt einen signifikanten Mangel an integrierter Planungskompetenz. Diese Lücke will das Projekt „Deine Energiewende“ schließen. Zentraler Bestandteil ist die Entwicklung einer neuartigen Planungssoftware, die in der Lage ist, Projekte mit hoher Komplexität technisch und wirtschaftlich zu beschreiben, Simulations- und Optimierungsberechnungen durchzuführen und deren Ergebnisse auf eine geringe Zahl an Entscheidungsgrößen zu projizieren. Eine der Leitlinien der Entwicklung ist die Skalierbarkeit, sodass es möglich wird, eine große Anzahl von Projekten in kurzer Zeit abzuwickeln. Deshalb entsteht zusammen mit der Software ein Trainingskonzept, um in kurzer Zeit Benutzer zu qualifizierten Energieberatern und Projektanalysten zu schulen.

## Decision support platform for the transformation of power-to-heat systems

*Businesses and municipalities are under high pressure nationally and globally to stabilize their energy costs against a background of increasingly difficult-to-predict developments in the energy markets, as well as to make their contributions to achieving climate policy goals. Companies and municipalities are CO<sub>2</sub> emitters through their electricity consumption, water heating, as well as with regard to plant-related mobility. Transformations of energy supply are basically projects of great complexity, where the integration of the different forms of energy, the local boundary conditions, the financing, the handling of legal issues, as well as the stakeholder communication have to be addressed in a comprehensive concept in order to achieve a technically and economically optimal solution. A superior overall planning is the key to achieve this goal. The current market situation shows a significant lack of integrated planning expertise. The "Deine Energiewende" project aims to close this gap. The central component is the development of a new type of planning software that is capable of describing projects with high complexity in technical and economic terms, performing simulation and optimization calculations, and projecting their results onto a small number of decision variables. One of the guidelines of the development is scalability, so that it becomes possible to handle a large number of projects in a short time. Therefore, together with the software, a training concept is created to train users to become qualified energy consultants and project analysts in a short time.*

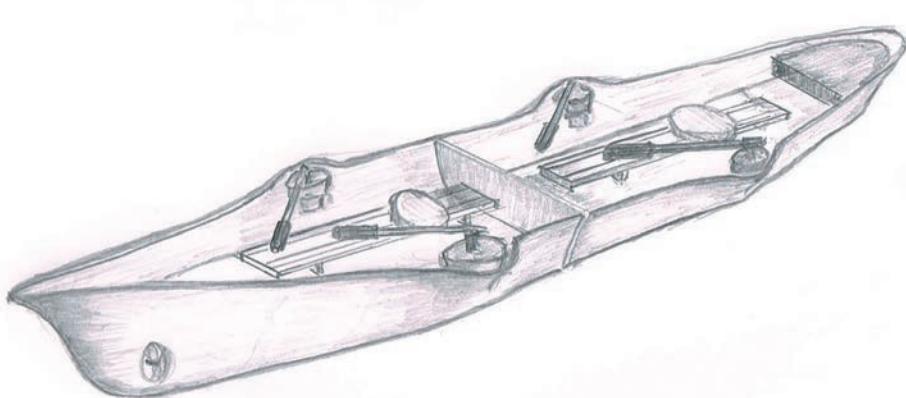
Ansprechpartner

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

Titel

**eRowboat**

title

**eRowboat**

Entwurf eines eRowboats für  
zwei Ruderer

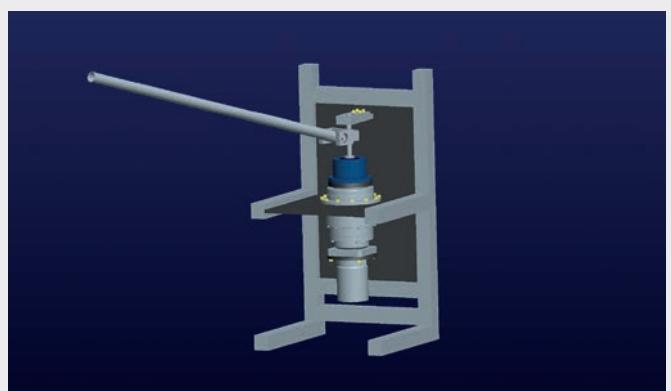
### Entwicklung des Antriebsstranges eines eRowboats

Im Projekt eRowboat wird ein Wasserfahrzeug entwickelt, das gewissermaßen das Pendant zu einem eBike als Landfahrzeug darstellt. Im Vordergrund steht die Unterstützung der menschlichen Muskelarbeit durch eine elektrochemische Batterie. Durch diese Unterstützung soll das Rudern auf dem Wasser attraktiver für den Freizeitsportler werden, indem größere Distanzen leichter bewältigt werden können. Die patentierte Lösung birgt darüber hinaus weitere Vorteile, denn beim eRowboat blickt der Ruderer in Fahrtrichtung. Aufgrund des Fehlens der ausladenden Skulls hat das eRowboat zudem den schlanken „Footprint“ eines Kanadiers und kann deshalb auch in engen Flusspassagen manövrieren. Ein weiteres Anwendungsfeld ist die präzise Vermessung der Leistung und des Krafteinsatzes im Hochleistungssport. Die technische Idee dahinter besteht darin, dass an den Drehpunkten der „halbierten“ Skulls Generatoren angebracht sind, die elektrisch dergestalt belastet werden, dass der Ruderer ein authentisches Rudergefühl wie bei eingetauchten Riemen bekommt. Voraussetzung dafür ist, dass das Regelsystem die Bewegungsgleichungen der Ruder- und Wasserbewegung genau nachbildet und eine Leistungselektronik die berechnete Generatorbelastung umsetzt.

Damit stellen sich im Projekt anspruchsvolle Fragen der Messsensorik (Drehzahl-, Drehmoment-, Winkel-, Strom- und Spannungsmessungen) der Analog-Digitalwandlung im Millisekundenbereich und der Konstruktion hocheffizienter Generatoren in diesem Leistungsbereich. Eine besondere Herausforderung stellt ein hochübersetzendes Getriebe dar, um von der sehr niederfrequenten Ruderbewegung auf notwendige Drehzahlen für einen Generator hochzusetzen.

### Development of the drive train of an eRowboat

*In the eRowboat project, a watercraft is being developed that in a sense represents the counterpart to an eBike as a land vehicle. The focus is on the support of human muscle work by an electrochemical battery. This support is intended to make rowing on the water more attractive to recreational athletes by making it easier to cover longer distances. The patented solution also has other advantages, because with the eRowboat, the rower faces in the direction of travel. Due to the absence of protruding skulls, the eRowboat also has the slim "footprint" of a Canadian canoe and can therefore maneuver in narrow river passages. Another field of application is the precise measurement of performance and power input in high-performance sports. The technical idea behind this is that generators are attached to the pivot points of the "halved" skulls, which are electrically loaded in such a way that the rower gets an authentic rowing feeling as with submerged oars. The prerequisite for this is that the control system exactly replicates the equations of motion of the oars and water and that power electronics implement the calculated generator load.*



Prüfstand für Hebel-Getriebe-Generatoreinheit mit Freilauf



2021/2022

**ABGESCHLOSSENE PROMOTIONEN**

## CHARAKTERISIERUNG DER SCHALTVERLUSTE DISKRETER WIDE BAND GAP LEISTUNGSHALBLEITER UND ENTWÄRMUNG KOMPAKTER BAUTEILE

Sebastian Sprunck



### Zusammenfassung

Die Verwendung von Wide Band Gap-Halbleitern stellt Anforderungen an die Verlustmessung und die Entwärmung einer Schaltung, welche mit herkömmlicher Technik nur unzureichend zu erfüllen sind. In dieser Arbeit wird eine Methode entwickelt, die eine Abschätzung des relativen Fehlers der Strommessung im Doppelpulstest ermöglicht. Mit ihr werden anschließend verfügbare Sensoren untersucht und eine neue Variante vorgeschlagen. Außerdem wird eine Entscheidungshilfe erstellt, mit der die Auswahl eines geeigneten Stromsensors vereinfacht wird, sofern für die geplante Anwendung überhaupt eine Option existiert. Weiterhin wird ein Prüfstand entwickelt, mit dem die Wärmeleitfähigkeit thermischer Interface-Materialien präzise bestimmt werden kann. Eine detaillierte Fehlerbetrachtung stellt dabei relative Messfehler in Aussicht, die mit gängigen Standardmethoden nicht erreicht werden können.

Abschließend wird untersucht, wie weit sich die Miniaturisierung leistungselektronischer Systeme durch die Anwendung dieser Ergebnisse vorantreiben lässt und wo die absehbaren Grenzen liegen.

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

**Zweitgutachter:** Prof. em. Dr. Enrique Dede,  
Universitat de Valencia

**Tag der Disputation:** 02. Februar 2021

### Summary

*The use of Wide Band Gap semiconductors requires precise knowledge regarding the measurement of switching losses and thermal management that cannot be fulfilled with state of the art technology. In this work, a method is developed that allows the estimation of the relative error in double pulse test current measurements. This method is applied to available current sensors, whereafter a new type of sensor application is proposed. Furthermore, a decision-making aid is created that eases the selection of a suitable current sensor for a given application, provided such an option exists at all. Afterwards, a test rig that allows the precise measurement of the thermal conductivity of thermal interface materials is being developed. A detailed error analysis suggests a low relative error that cannot be achieved using standard test methods.*

*Following these investigations, their impact onto the miniaturization of power electronic systems is analysed and estimates regarding their extents and limits are proposed.*

DR.-ING. LUIS DAVID PABON OSPINA (INES)

title

**LONG-TERM VOLTAGE STABILITY OF ELECTRIC POWER SYSTEMS HOSTING  
INVERTER-INTERFACED ENERGY SOURCES****Erstgutachter:** Prof. Dr. rer. nat. Clemens Hoffmann,  
Universität Kassel**Zweitgutachter:** Prof. Thierry Van Cutsem,  
University of Liège, Belgium**Tag der Disputation:** 05. November 2021

Luis David Pabon Ospina

**Zusammenfassung**

Diese Arbeit befasst sich mit den Auswirkungen, die Wechselrichter-gekoppelte Energiequellen wie Wind- und Photovoltaik-erzeugung auf die Dynamik von Übertragungsnetzen haben. Das Hauptaugenmerk liegt auf der Spannungsstabilität, einer Unterkategorie der Dynamik von Stromversorgungssystemen. Derartige Instabilitäten waren die Ursache für große Netzausfälle auf der ganzen Welt und bereiten den Übertragungsnetzbetreibern weiterhin Sorgen. Während dieser Arbeit wurden verschiedene Notsteuerungsschemata gegen potenzielle Spannungsinstabilität entworfen. Die vorgeschlagenen Steuerungskonzepte haben sich bei der Unterstützung des Übertragungsnetzes in kritischen Situationen als wirksam erwiesen und können einen drohenden Stromausfall vermeiden. Obwohl das Hauptaugenmerk der Dissertation auf dem oben genannten Phänomen liegt, befasst sich diese Arbeit auch mit anderen Problemen der Netzstabilität, die mit zunehmendem Anteil von Wechselrichter-basierten Energiequellen an Relevanz gewinnen. Beispiele sind sogenannte „converter-driven instability“ und der Bedarf an dynamischen Äquivalenten, die komplexe Netzwerke für Simulationszwecke genau darstellen können..

**Summary**

*This work addresses the impact that inverter-interfaced energy sources such as wind and photovoltaic generation have on power system dynamics. Its main emphasis is on long-term voltage stability, a sub-category of power system dynamics. According instabilities have been the cause of major system blackouts around the world and continue being a concern for transmission system operators. During this work, different emergency control schemes against potential voltage instability have been designed. The proposed control schemes have proved to be effective in supporting the transmission network during critical situations and can avoid an imminent blackout. Although the main focus of the dissertation is on the above-mentioned phenomenon, this work also addresses other power system stability issues that are becoming more relevant as the percentage of inverter-based energy sources increases. Examples are converter-driven instability and the need for dynamic equivalents that can accurately represent complex networks for simulation purposes.*

Maria Nuschke



## Zusammenfassung

Steigende Anteile von umrichterbasierten Energieanlagen fordern die Stabilität des Energiesystems heraus. Insbesondere die Kurzzeit-Frequenzstabilität wird durch synchron gekoppelte Trägheit beeinflusst. Um die Energiewende weiter auf Kurs zu halten, muss die Herausforderung der schwindenden Trägheit infolge der Abschaltung von konventionellen Kraftwerken angegangen werden.

Spannungseinprägende Umrichter werden seit mehr als zwanzig Jahren erfolgreich in Inselsystemen verwendet. Dennoch stellt uns heute noch deren flächendeckende Integration in das Verbundnetz vor Herausforderungen. Es sind eingehende Analysen, sowie Feld-testerfahrung und Weiterentwicklung der Netzanschlussbedingungen notwendig. Diese Arbeit leistet hierzu einen Beitrag. Untersucht wurde die Frequenzstabilität bei steigenden Anteilen von umrichterbasierten Energieanlagen mit besonderem Augenmerk auf zwei Regelungsansätzen von Umrichtern: herkömmlich stromeinprägend und spannungseinprägend.

Detaillierte EMT-Simulationen eines Höchstspannungstestsystems wurden vergleichend mit steigenden Anteilen beider Wechselrichtertypen für verschiedene Situationen mit Netzauf trennung durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen einen begrenzten Anteil herkömmlich stromeinprägend geregelter Umrichter im Verbundnetz: selbst mit sehr gut abgestimmten Parametern konnte der maximale Umrichteranteil nicht über 70% gesteigert werden, ohne die Frequenzstabilitätskriterien zu verletzen. Der Anteil spannungseinprägend geregelter Umrichter konnte hingegen ohne negativen Einfluss auf die Frequenzstabilität auf 100% erhöht werden. Darüber hinaus kann die Trägheitszeitkonstante mit dem gewählten spannungseinprägenden Regelungsansatz als Parameter eingestellt werden. Damit ist die im Energiesystem verfügbare Trägheit nicht mehr alleinig an die mechanische Masse großer Synchronmaschinen gekoppelt.

**Erstgutachter:** Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel,  
TU Braunschweig

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

**Tag der Disputation:** 15. November 2021

## Summary

*Increasing shares of inverter-based generation are challenging the stability of power systems. Especially the short-term frequency stability is affected through a decrease of synchronous coupled inertia. In order to stay on track with the energy transition, the challenge of diminishing inertia due to the replacement of conventional power plants needs to be addressed.*

*Grid-forming inverters have been utilized successfully in island systems since more than twenty years. Their large-scale integration into the interconnected power system presented challenges – detailed studies, field tests and grid code enhancements are needed. This thesis addresses the aforementioned challenges by introducing detailed studies and analysis focusing on frequency stability aspects in inverter-dominated grids, while considering the impact of different control approaches, namely grid-supporting and grid-forming.*

*Detailed EMT-simulations with an extra high voltage test system have been conducted comparatively with increasing shares of both inverter types for different system split scenarios. For the considered test case, the results indicate a limited share of conventional grid-supporting inverters: even with fine tuned parameters not more than 70% shares of inverters could be reached without violating frequency stability criteria. In contrast, by integrating grid-forming inverters, the inverter share could be increased up to 100% without any frequency deterioration. Furthermore, the inertia time constant can be chosen as a parameter with the selected grid-forming approach and therefore, the overall system inertia is no longer coupled solely with the mechanical mass of large synchronous machines.*

DR.-ING. DO, THI HIEP (INES)

title

**DEVELOPMENT OF FEEDBACK-CONTROL FOR ENERGY POLICY DESIGN TO GUARANTEE  
SUSTAINABLE SOLAR AND WIND POWER INVESTMENT GROWTH**

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

**Zweitgutachter:** Prof. Dr.-Ing. Kurt Rohrig,  
Universität Kassel / Fraunhofer IEE

**Tag der Disputation:** 26. November 2021



Do. Thi Hiep

**Zusammenfassung**

Um den Ausbau erneuerbarer Energien zu stimulieren, spielt die Regulierungspolitik eine entscheidende Rolle. Diese Politiken haben jedoch aufgrund der ungeeigneten Designs bisher nur Teilergebnisse oder unerwartete Folgen erzielt. Daher geht die Studie der Frage nach, wie Regulierungspolitik gestaltet werden muss, um ein günstiges Umfeld für den Ausbau erneuerbarer Energien zu schaffen.

Diese Arbeit schlägt vor, die Feedback-Control-Theorie für die Gestaltung der Energiepolitik zu verwenden und konzentriert sich auf die Gestaltung von Preismechanismen, um ein nachhaltiges Wachstum der Investitionen in erneuerbare Energien zu gewährleisten. Der Feedback-basierte Preismechanismus (FPM) wird regelmäßig auf Basis des beobachteten Investitionsvolumens und nicht des prognostizierten angepasst. Aufgrund der Popularität und Anwendbarkeit des Proportional-Integral-Derivative-Reglers (PID) in Ermangelung eines Systemmodells wird diese Technik für den Preismechanismusentwurf gewählt.

Der zukunftsweisende und wertvolle Beitrag dieser Dissertation ist die Entwicklung mathematischer Modelle rückkopplungsbasierter Preismechanismen. Konkret werden die PID-basierten Preismechanismen in diskreten ökonometrischen Modellen formuliert. Die Reglerparameter werden durch Analysen am historischen Beispiel der Erneuerbaren-Politik in Deutschland realisiert. Die Arbeit kommt zu dem Schluss, dass Häufigkeit und Höhe der Preisanpassungen für einen effektiven Feedback-basierten Preismechanismus entscheidend sind.

**Summary**

*In order to stimulate renewable power development, regulatory policies play a vital role. However, these policies have so far attained only partial results or unexpected consequences due to the unsuitable designs. Therefore, the study addresses the question how regulatory policies have to be designed in order to create a favorable environment for renewable power development.*

*This work proposes to use feedback control theory for energy policy design and focuses on price mechanism design to guarantee sustainable renewable power investment growth. The feedback-based price mechanism (FPM) is regularly adjusted based on the observed investment volume rather than the predicted one. Due to the popularity and applicability of the proportional-integral-derivative controller (PID) in the absence of a system model, this technique is chosen for price mechanism design.*

*The most forward-looking and valuable contribution of this dissertation is the development of the mathematical models of feedback-based price mechanisms. Specifically, the PID-based price mechanisms are formulated in discrete econometric models. The controller parameters are realized through analysis using the historical example of renewable policy-making in Germany. It is concluded that frequency and level of price adjustment are crucial for an effective feedback-based price mechanism.*

## **APPLICATION-ORIENTED REACTIVE POWER MANAGEMENT IN GERMAN DISTRIBUTION SYSTEMS USING DISTRIBUTED ENERGY RESOURCES**

Benjamin Requardt



### **Zusammenfassung**

Durch den erhöhten Anteil von dezentralen Erzeugern wie Photovoltaik- und Windkraftanlagen sind neue Ansätze für eine bessere Integration in das Stromnetz erforderlich. Einen Ansatz stellen Softwarelösungen dar. Bisher werden Stromnetze von Leitwarten und deren Software gesteuert und überwacht. Eine Leitwarten-Software ist aber oft ein in sich geschlossenes System, das nur von deren Anbieter gewartet und um neue Funktionen erweitert werden kann. Es können aber auch andere Hersteller neue Lösungen anbieten, die vielleicht besser und günstiger sind. Diese neuen Lösungen sollten vorher im realen Stromnetz getestet werden. In dieser Dissertation wird eine Methode vorgestellt, mit denen auch externe Anbieter eine Leitwarten-Software um neue Funktionen erweitern können. Hierzu wurde sowohl eine modulare Plattform mit dem Namen beeDIP (Betriebsführungs- und Energiemanagement Datenintegrationsplattform) als auch Verfahren für den möglichst performanten und effizienten Austausch von Stromnetzdaten (Topologie-Informationen, Messwerte, etc.) zwischen Leitwarte und beeDIP-Plattform konzipiert und entwickelt. Die Verfahren für den Datenaustausch basieren auf dem Common Information Model (CIM) und der Schnittstelle TASE.2 (Telecontrol Application Service Element 2). Zudem wurden zur Erschließung neuer Datenquellen Datenintegrationstools durch neue Adapter erweitert.

Die Plattform und dessen Methoden wurde bereits in einigen Projekten eingesetzt und bei Netzbetreibern installiert.

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

**Zweitgutachter:** Prof. Dr.-Ing. habil. Lutz Hofmann,  
Leibniz Universität Hannover

**Tag der Disputation:** 17. Dezember 2021

### **Summary**

Due to the increased share of decentralised generators such as photovoltaic and wind power plants, new approaches are required for better integration into the electricity grid. One approach are software solutions. Up to now, electricity grids have been controlled and monitored by control rooms and their software. However, control room software is often a self-contained system that can only be maintained and expanded with new functions by its provider. However, other manufacturers can also offer new solutions that are perhaps better and cheaper. These new solutions should be tested in the real power grid beforehand. In this dissertation, a method is presented with which also external providers can expand a control room software with new functions. For this purpose, a modular platform called beeDIP (Betriebsführungs- und Energiemanagement Datenintegrationsplattform) as well as methods for the exchange of power grid data (topology information, measurement data, etc.) between control rooms and the beeDIP platform were designed and developed. The latter methods were designed to achieve a data exchange with a high efficiency and performance and are based on the Common Information Model (CIM) and the interface TASE.2 (Telecontrol Application Service Element 2). Also, new adapters have been added to data integration tools to exploit new data sources.

The platform and its methods have already been used in several projects and installed at grid operators.

DR.-ING. HAUNAN WANG (e<sup>2</sup>n)

title

**APPLICATION-ORIENTED REACTIVE POWER MANAGEMENT IN GERMAN DISTRIBUTION SYSTEMS USING DISTRIBUTED ENERGY RESOURCES****Erstgutachter:** Prof. Dr.-Ing. Martin Braun,  
Universität Kassel**Zweitgutachter:** Prof. Dr.-Ing. habil. Lutz Hofmann,  
Leibniz Universität Hannover**Tag der Disputation:** 17. Dezember 2021

Haunan Wang

**Zusammenfassung**

Aufgrund der höheren Durchdringung von erneuerbaren Erzeugungsanlagen, Netzausbau- und Verstärkung, sowie der Nutzung lokaler Spannungsregelungsstrategien kann heutzutage eine signifikante Änderung des Blindleistungsverhaltens sowie zukünftig ein erhöhter Bedarf an zusätzlicher Blindleistungsflexibilität im deutschen Energiesystem prognostiziert werden.

In dieser Arbeit wird ein anwendungsorientiertes Konzept des Blindleistungsmanagements vorgestellt, welches dem Verteilnetzbetreiber (VNB) ermöglicht, ein gewisses Maß an Blindleistungsflexibilität an den Netzschnittstellen bereitzustellen und gleichzeitig die Spannungshaltung im eigenen Netzgebiet zu unterstützen. Zur Bewertung der Durchführbarkeit wird das vorgestellte Konzept auf reale Verteilnetze in Süddeutschland implementiert und durch verschiedene Fallstudien umfassend untersucht.

Die erzielten Ergebnisse bestätigen die Durchführbarkeit und Zuverlässigkeit des vorgestellten Konzepts, dass es dem VNB ermöglicht den Blindleistungsaustausch an den Netzschnittstellen zu steuern ohne unerwünschte Spannungsprobleme zu verursachen. Des Weiteren lässt sich das Konzept einfach in realen Verteilnetzen ohne hohe Investitionskosten für komplexe Informations- und Kommunikationsinfrastruktur implementieren. Als wesentlichen Beitrag bietet diese Arbeit somit eine ideale Überbrückungslösung für VNB, welche mit Blindleistungsproblemen konfrontiert sind, zurzeit allerdings noch kein umfassendes Überwachungssystem in ihren eigenen Netzen haben.

**Summary**

*Due to higher penetration of renewable generation, grid expansion and reinforcements, and the utilization of local voltage control strategies, a significant change in the reactive power behavior as well as an increased demand for additional reactive power flexibility in the German power system can be predicted.*

*In this thesis, an application-oriented reactive power management concept is proposed, which allows distribution system operators (DSO) to enable a certain amount of reactive power flexibility at the grid interfaces while supporting voltage limitations in their own grids. To evaluate its feasibility, the proposed concept is applied for real distribution grids in the south of Germany and is investigated comprehensively in different case studies.*

*The results prove the feasibility and reliability of the proposed concept, which allows the DSO to control the reactive power exchange at grid interfaces without causing undesired local voltage problems. In addition, it can be simply adjusted and widely applied in real distribution grids without requiring high investment costs for complex information and communication infrastructures. As a significant contribution, this thesis provides an ideal bridging solution for DSOs who are facing reactive power issues but have no detailed and advanced monitoring system yet.*

## INTERDEPENDENZEN BEI INFRASTRUKTUR-INVESTITIONSENTSCHEIDUNGEN IN MULTI-ENERGIE-SYSTEMEN

Daniel Then



### Zusammenfassung

Die deutschen Klimaschutzziele induzieren die Dekarbonisierung des Wärme- und Kältesektors. Die aktuell diskutierten Szenarien prognostizieren dabei eine starke Elektrifizierung des Wärmesektors, einschließlich der Substitution von Gasheizungen. Der Weiterbetrieb der bestehenden Erdgasnetze im Falle eines Nachfragerückgangs würde die energiebezogenen Netzkosten und damit die Netzentgelte erhöhen, was die Attraktivität strombasierter Heizsysteme weiter steigern könnte. Ein Effekt, der den Gasausstieg auslösen oder begünstigen könnte.

In dieser Arbeit werden Netzwerkanalyse-, Multi-Agenten- und gemischt-ganzzahlige lineare Optimierungsmodelle eingeführt, um die Geschäftsdynamik zwischen den Sanierungsentscheidungen von Gebäudeeigentümern und den Investitionsentscheidungen von Gas- und Stromverteilnetzbetreibern zu analysieren. Die Ergebnisse prognostizieren für die meisten Szenarien in Deutschland einen Rückgang der Erdgasnachfrage in den Gasverteilnetzen. In bestimmten Konfigurationen entwickelt sich daraus eine sich selbst verstärkende Rückkopplungsschleife, die eine starke Elektrifizierung fördert und langfristig die Abkehr vom Gasnetz bewirken kann.

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

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

**Tag der Disputation:** 28. Januar 2022

### Summary

*The German climate protection goals demand the decarbonization of the heating and cooling sector. The scenarios predict a strong electrification of the heating sector, including the substitution of gas-based heating systems. The continued operation of the existing natural gas grids in the case of a decrease in demand would increase energy-related network costs and thus grid charges, which could further increase the attractiveness of electric-based heating systems. An effect that could trigger or foster the gas phase-out.*

*In this thesis, network analysis, multi-agent and mixed-integer linear optimization models are introduced to analyse the business dynamics between the retrofit decisions of building owners and the investment decisions of gas and electricity distribution network operators. The results forecast a decrease in natural gas demand in the gas distribution grids for most scenarios in Germany. In certain configurations, this develops into a self-reinforcing feedback loop that fosters a strong electrification and triggers the defection from the gas grid in the long run.*

DR.-ING. ANDRESSA SCHITTNER (EVS)

title

**ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE ANALYSIS OF FAST-SWITCHING-SPEED SEMICONDUCTORS APPLIED TO POWER ELECTRONICS CONVERTERS**

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

**Zweitgutachter:** Prof. Dr.-Ing. Thomas Basler,  
TU Chemnitz

**Tag der Disputation:** 05. April 2022



Andressa Schittler

**Zusammenfassung**

Beim Entwerfen eines EMI-Filters besteht der erste Schritt darin, zu verstehen, welche und wie die Rauschquellen sind. In der Arbeit von Andressa Schittler werden verschiedene Aspekte der Rauschquelle analysiert: Kopplungsarten, Kategorisierung der Emissionen, DC-DC- und DC-AC-Wandler, die hauptsächlich in Solaranwendungen verwendet werden, und Einfluss von Halbleiter-Schaltereignissen. Aufgrund der Ausgangseigenschaften der PV-Zellen ist normalerweise eine Spannungsregelung/-erhöhung erforderlich, die normalerweise von einer DC-DC-Stufe durchgeführt wird. Dazu wird die Rauschquelle von Abwärts-, Aufwärts- und Mehrzellen-Aufwärtswandlern analysiert. Darüber hinaus werden auch typische nicht isolierte Wechselrichter wie Vollbrücke, H5, HERIC und 3-Level-NPC hinsichtlich ihres erzeugten Rauschens bewertet.

Die Schaltwellenformen der Halbleiter beeinflussen auch das Frequenzspektrum, daher werden die wichtigsten nicht idealen Effekte im Detail untersucht: Anstiegs- und Abfallzeiten, Überspannung, Oszillationen und sanftes Schalten. Abschließend werden einige Aspekte des EMI-Filterdesigns untersucht, basierend auf einem einphasigen netzgekoppelten 2,3-kW-Vollbrücken-PV-Wechselrichter, der mit bipolarer Modulation arbeitet. Zunächst werden die Systemvoraussetzungen analysiert. Anschließend wird die Geräuschquelle beschrieben. Darauf aufbauend können Leistungs- und EMI-Filter ausgelegt werden. Schließlich wird eine Vorhersage der Filterleistung erreicht, indem die parasitären Elemente seiner einzelnen Komponenten extrahiert werden. Basierend auf den Simulations- und Versuchsergebnissen wird ein sehr starker Einfluss der Komponenteneigenresonanz und Kopplungseffekte beobachtet, da das Verhalten mit Filter bei höheren Frequenzen noch schlechter war. Daher wird gezeigt, dass die Minimierung von Kopplungseffekten und parasitären Elementen der Filterkomponenten wesentlich ist, um die besten Filterantworten auf den interessierenden Frequenzen zu erzielen.

**Summary**

*For designing an EMI filter, the first step is to understand which and how the noise sources are. In the work of Andressa Schittler, various aspects of the noise source are analysed: types of coupling, categorization of emissions, DC-DC and DC-AC converters mostly used on solar applications, and influence of semiconductors switching events. Because of the PV cell output characteristics, a voltage regulation/boost is usually necessary and it is usually performed by a DC-DC stage. Therefore the noise source of step-down, step-up and a multi-cell step-up converters are analysed. Moreover, typical nonisolated inverters as full-bridge, H5, HERIC and 3-level NPC are also assessed in terms of their generated noise.*

*The semiconductors switching waveforms also influence the frequency spectrum, therefore the most relevant non-ideal effects are investigated in detail: rise and fall times, overvoltage, oscillations and soft-switching. Finally some aspects of EMI filter design are investigated, based on a one-phase gridconnected 2.3 kW full-bridge PV inverter operating with bipolar modulation. At first the system requirements are analysed. Following that, the noise source is described. Based on that, the power and EMI filter can be designed. Finally, a prediction of the filter performance is achieved by extracting the parasitic elements of its single components. Based on the simulation and experimental results, a very strong influence of the components self-resonance and coupling effects is observed, as the response was even worse with filter at higher frequencies. Therefore, it is shown that the minimization of coupling effects and parasitic elements of the filter components is essential to achieve best filter responses on the frequencies of interest.*

DR.-ING. ALEXANDER BASSE (INES)

Titel

## ENTWICKLUNG UND ANALYSE LIDAR-BASIERTER KURZZEITMESSSTRATEGIEN ZUR BESTIMMUNG DES WINDPOTENZIALS

Alexander Basse



### Zusammenfassung

In der Arbeit wurden Messstrategien zur Abschätzung des Windpotenzials auf den für die Windindustrie relevanten Höhen entwickelt und analysiert. Der Fokus lag dabei auf Kurzzeitwindmessungen mit (Doppler-Wind-) Lidar-Geräten.

Da Mastmessungen bis zur Nabenhöhe moderner Windenergieanlagen teuer und nicht praktikabel sind, wird die Windgeschwindigkeit oft auf geringeren Höhen gemessen und auf die Zielhöhe extrapoliert. Dabei können jedoch große Fehler auftreten. Wie in dieser Arbeit gezeigt wurde, kann die Genauigkeit der vertikalen Extrapolation durch zusätzliche Kurzzeit-Lidarmessungen auf der Zielhöhe verbessert werden.

Es zeigte sich, dass die Ergebnisse vom Zeitraum der Lidarmessung (Dauer und Jahreszeit) abhängen. Durch einen Klassifizierungsansatz mit weiteren meteorologischen Variablen konnten deutliche Verbesserungen erzielt werden.

Ein zweiter Bestandteil der Arbeit widmete sich der Langzeitkorrektur kurzzeitiger Windmessungen. Da Wind zeitlich variiert, müssen die gemessenen Winddaten mit langzeitlichen Referenzdaten (z. B. Reanalysedaten) abgeglichen, und so langzeitkorrigiert werden. Wenn die Messung nicht alle Jahreszeiten abdeckt, ergeben sich auch hier Abhängigkeiten vom Messzeitraum und es treten systematische Fehler auf (Saisonalitäten). Neben experimentellen Ergebnissen wurden auch theoretische Aspekte betrachtet, mit denen die Beobachtungen erklärt und Verbesserungen entwickelt werden konnten.

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

**Zweitgutachter:** Dr.-Ing. Doron Callies,  
Universität Kassel und Fraunhofer IEE

**Tag der Disputation:** 18. Mai 2022

### Summary

*In the thesis, measurement strategies for estimating the wind potential on heights relevant for modern wind industry were developed and analyzed. The focus was set on the efficient use of short-term wind measurements performed by doppler wind lidars.*

*Since mast measurements up to hub heights of modern wind turbines are expensive and, thus, impractical, the wind speed often is measured at lower heights and vertically extrapolated to the target height. However, large errors can occur. As shown in the thesis, additional short-term lidar measurements at the target height enable to improve the accuracy of the vertical extrapolation. It was shown that the results depend on the period of the lidar measurement (duration and season). Improvements could be achieved by a classification approach using further meteorological variables.*

*In a second step, the long-term correction of short-term wind measurements was addressed. As the wind changes on different time scales, the measured wind data need to be long-term corrected. Again, systematic errors occur, hence, a dependence of the measurement period is observed (seasonal biases) when the measurement does not cover all the seasons. Besides experimental results, theoretical aspects were considered, providing the mathematical background for understanding the observations and improving the results.*

DR.-ING. JONAS PFEIFFER (EVS)

Titel

## PRAKТИСЧЕ АНВЕНДУНГ ВОМ АКТИВЕР ВОРМAGNETИСИЕРУНГ ИН TRANSFORMATORLOSEN DC/DC-КОНВЕРТЕРН

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

**Zweitgutachter:** Jun.-Prof. Dr.-Ing. Jens Friebe,  
Gottlieb Wilhelm Leibniz Universität  
Hannover

**Tag der Disputation:** 18. Juli 2022



Jonas Pfeiffer

### Zusammenfassung

In nahezu allen leistungselektronischen Systemen kommen magnetische Bauelemente zum Einsatz. Dabei kann ihr Zweck und die damit verbundenen Anforderungen stark variieren, was in unterschiedlichen Optimierungsschwerpunkten resultiert. In der Arbeit von Jonas Pfeiffer wird der Fokus auf die Reduzierung des Volumens bzw. Gewichts von Induktivitäten in transformatorlosen DC/DC-Konvertern gelegt. Als Verbesserungsansatz wird die aktive Vormagnetisierung gewählt. Durch ihren Einsatz wird die Induktivität einstellbar, sodass der DC/DC-Konverter im sog. Triangular Current Mode (TCM) betrieben werden kann, wodurch Einschalt- und sog. „Recovery-Verluste“ der verwendeten Halbleiterschalter verringert oder gar vermieden werden können.

Dabei werden zunächst die verschiedenen Methoden der aktiven Vormagnetisierung analysiert und für jede Methode ein Stand der Technik abgeleitet. In den folgenden Untersuchungen liegt der Fokus auf der gemischten sowie der orthogonalen Vormagnetisierung. Zu beiden Vormagnetisierungsmethoden werden grundlegende Untersuchungen in Bezug auf die Auswirkungen der Windungszahl der Hilfswicklung, ihre Anordnung und ihre Stromführung durchgeführt. Die Untersuchungen ergeben, dass lediglich die Stromführung des Hilfsstroms das Verhalten des induktiven Bauelement signifikant beeinflusst.

Abschließend werden die Auswirkungen einer vormagnetisierbaren Induktivität an einem Vier- sowie an einem Zweiquadrantensteller auf verschiedenen Spannungsebenen untersucht. Es zeigt sich, dass die aktive Vormagnetisierung eine signifikante Volumenreduzierung der Induktivität zur Folge haben kann. Diese hat jedoch bei geringen Spannungsniveaus eine reduzierte Effizienz des Gesamtsystems zur Folge. Bei größeren Spannungsebenen kann gegenüber dem konventionellen Betriebsfall durch die aktive Vormagnetisierung die Effizienz der Gesamtschaltung im Teillastbereich bei gleichzeitiger Reduzierung des Kernvolumens der Induktivität erhöht werden. Dabei muss allerdings ein erhöhter Aufwand in Bezug auf die Bereitstellung des Hilfsstroms zur Vormagnetisierung und dessen Regelung berücksichtigt werden.

### Summary

*Magnetic devices are used in almost every power electronic system. Therefore, their purpose and with that their requirements can vary in a wide range. The consequence is a large number of options regarding the priority of optimisation. In this work, the focus is on reducing the volume or weight of inductors in transformerless DC-DC converters. Active premagnetization is choosed as an optimisation approach. The technique enables an operation of the DC-DC-converter in the Triangular Current Mode (TCM), whereby switching-on-losses and recovery losses can be reduced or even eliminated.*

*In a first step the basic methods of active premagnetization are analysed. For each one of them, a state of the art is presented. The focus of the following investigations lies on mixed premagnetization and orthogonal premagnetization. For both premagnetization methods basic investigations are conducted regarding the impact of the number of turns of the auxiliary winding, its arrangement and the direction of the auxiliary current on the magnetic device. The results show a significant impact of the direction of the auxiliary current. The other investigated factors are insignificant.*

*Finally, the usage of a premagnetizable inductor in a full bridge converter and a half bridge converter is investigated at different voltage levels. The active premagnetization can cause a significant reduction of the inductor's volume. In case of lower voltage levels the overall effeciency of the circuit decreases. Regarding higher voltage levels the active premagnetization causes a higher overall efficiency, especially at partical load conditions bcompare to a conventional inductor. However, a higher effort regarding the generation of the auxiliary current and its control has to be considered.*

## NUTZUNG NICHTLINEARER EFFEKTE ZUR ELEKTRISCHEN STEUERUNG VON NETZDROSSELN IM IMPEDANZVERHALTEN

Florian Fenske



### Zusammenfassung

Die Dissertation thematisiert und handelt das Themengebiet der elektrisch steuerbaren Netzdrosseln ab. Ausgangspunkt stellt hierbei der Stand der Technik dar, welcher eingehend experimentell untersucht und dargestellt wird. Zur Bewertung und Vergleichbarkeit der Vormagnetisierungswirkung im ferromagnetischen Kernmaterial wird ein Algorithmus entwickelt und daraus die Aufgabenstellung bzgl. Nichtlinearität der steuerbaren Magnetisierungskennlinie identifiziert.

Unter dem Gesichtspunkt der Bauweise von Netzdrosseln nach dem Stand der Technik, sowie einer praktikablen und industriellen Fertigung, werden Vormagnetisierungskonzepte entwickelt, um steuerbare Drosseln mit einer linearen Magnetisierungskennlinie zu erhalten. Die Arbeit setzt auf eine reine Gleichstromvormagnetisierung, um damit die benötigte Leistungselektronik zur Bereitstellung des Vormagnetisierungsstroms zu minimieren und weiterhin Halbleiterventile im Lastkreis zu vermeiden, wodurch die Anforderung an Robustheit und Lebensdauer des Gesamtsystems maximiert wird.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden linear steuerbare Vormagnetisierungskonzepte entwickelt und dargelegt, worunter die Parameter der geometrischen Implementierung der Vormagnetisierung im Kernmaterial sowie die Materialcharakteristik des Elektrobands genutzt werden. Zum Verständnis der Ausprägungs- und Wirkungsweise einer Vormagnetisierung wird die Feldverteilung im Kernmaterial anhand von FEM-Simulationen visualisiert und aus den FEM-Ergebnissen charakteristische Steuerkennlinien zur analytischen Auslegung abgeleitet. Die Validierung der Vormagnetisierungskonzepte erfolgt mittels Funktionsmustern, welche dazu experimentell untersucht werden. Durch die entwickelte Methodik und systematische Vorgehensweise, welche aus einem Zusammenspiel von analytischen Verfahren in Kombination mit experimentellen Untersuchungen und simulativen FEM-Berechnungen beruht, wird Aufschluss darüber gegeben, wie unter der Kenntnis zur Ausprägung der Vormagnetisierung im Kernmaterial linear steuerbare Drosseln auszulegen sind. Mit den Ergebnissen der Arbeit können u.a. innovative Betriebsmittel für das Stromnetz oder auch variable Stellglieder für resonante Stromsteller in der Leistungselektronik hervorgehen.

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

**Zweitgutachter:** Jun.-Prof. Dr.-Ing. Jens Friebe,  
Leibniz Universität Hannover

**Tag der Disputation:** 26. September 2022

### Summary

*The dissertation deals with the topic of electrical controllable chokes. The starting point is the state of the art, which is investigated and presented in detail experimentally. An algorithm is developed for the evaluation and comparability of the pre-magnetisation effect in the ferromagnetic core material and from this, the task regarding the non-linearity of the controllable magnetisation characteristic is identified.*

*From the point of view of the construction of chokes in accordance with the state of the art, as well as a practicable and industrial production, pre-magnetisation concepts are developed in order to obtain controllable chokes with a linear magnetisation characteristic. The work focuses on pure DC bias pre-magnetisation in order to minimise the power electronics required to provide the bias current and to continue to avoid semiconductor valves in the load circuit, thereby maximising the requirement for robustness and service life of the overall system.*

*Within the scope of the present work, linearly controllable pre-magnetisation concepts are developed and presented, among which the parameters of the geometric implementation of the pre-magnetisation in the core material as well as the material characteristics of the electrical strip are used. In order to understand the characteristics and mode of action of a pre-magnetisation, the field distribution in the core material is visualised by means of FEM simulations and characteristic control curves are derived from the FEM results for the analytical design. The validation of the pre-magnetisation concepts is carried out by means of functional samples, which are investigated experimentally for this purpose. The developed methodology and systematic procedure, which is based on an interplay of analytical procedures in combination with experimental investigations and simulative FEM calculations, provides information on how linearly controllable chokes are to be designed under the knowledge of the characteristics of the pre-magnetisation in the core material. The results of the work can be used, among other things, to develop innovative resources for the power grid or variable actuators for resonant current controllers in power electronics.*

DR.-ING. EDUARDO FAÇANHA DE OLIVEIRA (EVS)

title

**MODE ANALYSIS AND OPTIMAL DESIGN OF GAN-BASED THREE-PHASE BIDIRECTIONAL DUAL ACTIVE BRIDGE DC/DC CONVERTERS FOR E-VEHICLES APPLICATIONS****Erstgutachter:** Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Zacharias,  
Universität Kassel**Zweitgutachter:** Prof. Fernando Luiz Marcelo Antunes,  
Universidade Federal do Ceará Brasilien**Tag der Disputation:** 01. November 2022

Eduardo Façanha de Oliveira

**Zusammenfassung**

Die übliche Netzstruktur eines batterieelektrischen Fahrzeugs besteht aus einem Hochvolt- und einem Niedervolt-Bordnetzsystem. Das HV-Bordnetz, mit Spannungsebenen bis zu 800 V ist für die Versorgung des Antriebswechselrichters des Fahrzeugs zuständig. Das NV-Bordnetz wiederum, mit einer Nennspannung von 14 V, speist den Großteil der elektrischen Verbraucher. Die zunehmende Elektrifizierung des Fahrzeugs führt zu einer Erhöhung der Bordnetzleistung und motiviert somit die Einführung eines dritten 48 V-Bordnetzes, das die Versorgung von Verbrauchern mit hoher Leistung ermöglicht und dennoch unterhalb der automobilen 60 V-Grenze bleibt. Daher wird der HV/48 V-Bornetzwandler galvanisch getrennt ausgeführt, während der 48 V/12 V-Wandler durch eine nicht isolierte Schaltung mit wesentlich geringerer Leistung aufgebaut. Die in dieser Dissertation untersuchten Topologien sind für den Einsatz als HV/48 V-Bornetzwandler geeignet. Zu diesem Zweck werden zwei neuartige Ansätze auf Basis des bekannten dreiphasigen Dual-Active-Bridge-DC/DC-Wandler vorgelegt, um den Wirkungsgrad und die Leistungsdichte in solchen Verwendungsbereichen zu verbessern, deren größte Herausforderungen die weiten Ein- und Ausgangsspannungsbereiche sowie die hohen Ausgangsströme sind.

Schließlich befasst sich diese Arbeit auch mit der optimalen elektrischen Umsetzung von Galliumnitrid-Halbleitern und der damit verbundenen Herausforderung, deren Verlustwärme abzuführen. Es wird ein kompaktes und thermisch stabiles Kühlverfahren vorgestellt, das die fragilen GaN-Bausteine vor übermäßigen Biegespannungen schützt. Weitere Themen sind das thermische Management der magnetischen Bauelemente in Kombination mit deren Anordnung. Es wird ein "3D"-Mechanikkonzept entwickelt, das das Volumen des Gesamtsystems minimiert sowie als elektromagnetische Abschirmung wirkt und eine gute Ankopplung aller wesentlichen Komponenten an das Wasserkühlungssystem ermöglicht. In Rahmen eines vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten dreijährigen Forschungsprojektes werden drei 4 kW-Prototypen aufgebaut und experimentell validiert.

**Summary**

*The common grid structure of a battery electric vehicle comprises a high voltage (HV) and a low voltage (LV) on-board power supply systems. The HV one, with voltage levels up to 800 V, is responsible for feeding the drive train of the vehicle. In turn, the LV one, with a rated voltage of 14 V, feeds most of the electric consumers. The increase of the on-board power with the addition of new electric components motivates the introduction of a third voltage level of 48 V, which enables the supply of high-power consumers, while remaining below the automotive HV threshold of 60 V. Therefore, the interface between the HV and 48 V systems is performed by a galvanically isolated DC/DC converter, while the 48 V and 12 V grids are connected through a non-insulated circuit with much lower power rating. The topologies investigated in this dissertation are proper for interconnecting the HV and the 48 V batteries. For this purpose, two novel approaches based on the well-known three-phase dual active bridge converter are proposed with the objective of improving efficiency and power density for such application, whose main challenges are the wide voltage conversion range as well as the high currents on the LV side.*

*Finally, this work also deals with the optimal electrical implementation of gallium nitride semiconductors and the inherent challenge of removing their dissipated heat. A compact and thermally stable cooling method is presented, which protects the fragile GaN devices from excessive bending stresses. Further topics are the thermal management of the magnetics in combination with their arrangement. A "3D" mechanical concept is developed to minimize the overall system volume, to act as an electromagnetic shield as well as to allow all main components to be well coupled to the water cooling system. During a three-year research project funded by the German Federal Ministry of Education and Research (WM), three 4 kW prototypes are constructed and validated experimentally.*

Manuel Münch



## Zusammenfassung

Das in dieser Dissertation beschriebene Verfahren zur Belastungsreduzierung von Wechselrichtern, beschreibt eine einfache, robuste und sehr effektive Methode im Vergleich zum Stand der Technik, Harmonische und Ripple des Umrichterausgangsstroms zu reduzieren. Aus den empirisch ermittelten Daten kann z. B. eine Sinusfilterinduktivitätsreduktion um den Faktor 5 sowie eine Volumenreduktion des magnetischen Materials um den Faktor 9 berechnet werden. Messungen zeigen einen über dem Modulationsgrad annähernd konstanten THD und Ripple, der etwa dem bei Modulationsgrad 1 entspricht. Einflüsse der Lastart werden dabei beschrieben.

Die verwendeten Komponenten der Hilfsschaltung haben ein geringes Volumen, sowie im Vergleich zum Hauptumrichter geringe Strom- und Spannungsgrenzwerte, da sie nur die Harmonischenenergie transportieren müssen. Die Modulation kann direkt aus der Hauptstufenmodulation, ohne Erhöhung der Systemrechenleistung, gewonnen werden. Ein Wavelet-Modulationsverfahren oder eine Schaltwinkeloptimierung kann, wie gezeigt, THD und Stromrippel weiter reduzieren.

## Erstgutachter:

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

## Zweitgutachter:

Prof. Dr.-Ing. Marcus Ziegler,  
Universität Kassel

**Tag der Disputation:** 14. Dezember 2022

## Summary

*The method described in this thesis describes a simple, robust and very effective method compared to the prior art to reduce harmonics and ripple of the converter output current. From the empirically determined data, a sine filter inductance reduction by a factor of five and a volume reduction of its magnetic material by a factor of nine, can be calculated. Measurements show an almost constant THD and ripple over the modulation level, which roughly corresponds to that at modulation level one. Influences of the load type are described.*

*The components used in the auxiliary circuit have a small volume and, compared to the main converter, have low current and voltage limits because they only have to transport the harmonic energy. The modulation can be obtained directly from the main stage modulation without increasing the system processing power. As shown, a wavelet modulation method or switching angle optimization can further reduce THD and current ripple.*





**DOKUMENTATION**

---

**AKTUELLE ABSCHLUSSARBEITEN IN 2021 + 2022 | EVS**

2021	Name	Titel	Betreuer
Bachelor	<b>Albert, Lars</b>	Untersuchung eines Buck-Konverters als Hilfsstromversorgung für einen PV-Wechselrichter	Küster
Bachelor	<b>Khajo, Misak</b>	Aufbau eines optimierten SiC-MOSFET-Treibers	Saeidi
Bachelor	<b>Krieger, Jens</b>	Untersuchung von Einflussfaktoren auf die Hysteresekurve bei gemischter Vormagnetisierung	Küster
Master	<b>Meuser, Martin</b>	Untersuchung der magnetischen Streufelder von RESIBLOC-Rail Trocken-Transformatoren im stationären Betrieb	Zacharias
Bachelor	<b>Satzinger, Luca</b>	Entwurf, Design und Aufbau eines PV-Wechselrichters für ein- und dreiphasigen Netzanschluss	Zacharias
Bachelor	<b>Zilic, Rufad</b>	Analyse einer Wirksamen Maßnahme zur Reduzierung des Ableitstroms und des Gleichstromdrossel-Volumens	Zacharias

2022	Name	Titel	Betreuer
Master	<b>Al-khateb, Hamza</b>	Verbesserung der Verlustvorhersage an den Stahlteilen bei Trockentransformatoren	Zacharias
Bachelor	<b>Bouchtane, Adnane</b>	Analyse und Entwurf eines repetitiven Reglers zur Verringerung von Spannungsharmonischen in dreiphasigen VSI-Systemen im Inselbetrieb	Nazeri
Bachelor	<b>Feierabend, Rafael</b>	Vergleich und Validierung der Regelungsverfahren von netzgekoppelten, ein- und dreiphasigen Wechselrichtern zur Stromeinspeisung	Küster
Master	<b>Ghassen, Riahi</b>	Entwicklung des Parallelbetriebs von Leistungsverstärkern zur Anwendung in Power-Hardware in The Loop Systemen	Wang, Fraunhofer
Master	<b>Hädrich, Florian</b>	Elektrisches Zustandsraummodell (ZRM) Implementierung eines ZRM zur Abschätzung der Rippelströme eines Pulswechselrichters in MATLAB	Bünger, EDAG
Master	<b>Naha Boumi, Franklin</b>	Simulative Untersuchung des Schaltverhaltens eines „Half-Bridge Series Resonant Converters“ unter Berücksichtigung der parasitären Komponenten der Leistungshalbleiter und des Transformators	Gerodnichev, Fraunhofer
Master	<b>Saltana, Soufian</b>	Resonanter bidirektonaler DC/DC-Wandler	Zacharias

AKTUELLE ABSCHLUSSARBEITEN IN 2021 + 2022 | en 

2021	Name	Titel	Betreuer
Master	<b>Al Zamel, Nael</b>	Erstellung und Anwendung von Modulen zur automatisierten Auswertung von Effizienzmessungen an PV-Batteriesystemen	Heckemann
Bachelor	<b>Brosowski, Eric</b>	Auswertung der MS-Netzbetriebsführung mit hoher Durchdringung von Q(U)-gesteuerten dezentralisierten Erzeugungsanlagen	Wang
Master	<b>D'Souza, Chinmay</b>	Implementation and Analysis of Grid-Friendly Control Strategies for Electric Vehicles	Schön
Master	<b>Damm, Nicolai</b>	Modellierung, Analyse und Bewertung der Berücksichtigung netzbetrieblicher Freiheitsgrade im Rahmen der Netzplanung des deutschen Übertragungsnetzes	Harms
Master	<b>Diesing, Michel</b>	Einflussermittlung von Strukturparametern generischer Netze im Kontext von Netzstudien	Drauz
Bachelor	<b>Eisel, Jesper</b>	Untersuchung eines Netzausbau unter Tage	Lauven
Bachelor	<b>Höhre, Jannis</b>	Intrinsische Analyse von geobasierten Stromnetzdaten mithilfe des iOSMAnalyzers	Vogt
Master	<b>Malikzade, Saadat</b>	Technische und wirtschaftliche Auswirkungen einer Umstellung der Sternpunkt drehtung in Industrienetzen	Banerjee
Bachelor	<b>Mell, Tobias</b>	Informations- und Kommunikationstechnik Infrastruktur in elektrischen Netzen	Haack
Master	<b>Möller, Christoph</b>	Untersuchung eines über- und untertägigen Energieversorgungsnetzes	Drauz
Bachelor	<b>Schneider, Alicia</b>	State-based modeling of controllable power system components via stochastic activity networks	Haack
Master	<b>Yang, Chenxing</b>	Untersuchung innovativer Kennlinienbasierter Blindleistungsregelungsverfahren im Verteilnetz	Zheng Liu

2022 [continue >>>](#)  
[next page](#)

## AKTUELLE ABSCHLUSSARBEITEN IN 2021 + 2022 | en

2022	Name	Titel	Betreuer
Master	<b>Admant, Abdelouahed</b>	Ausarbeitung von neuen Konzepten zur Notstromversorgung im Werk 6.10. der BMW AG in Regensburg unter den Aspekten Wirtschaftlichkeit, technische Machbarkeit, CO2 Emissionen und Nachhaltigkeit	Hachmann
Master	<b>Ben Safta, Khalil</b>	Medium-scale Hydrogen Pipeline Network Design: An optimization-based planning method considering the existing natural gas network and allowing for pipeline conversion	Kisse
Master	<b>Elias, Sebastian</b>	Relevanz von Schieflasten in Niederspannungsnetzen im Kontext zunehmender Elektromobilität	Banze
Master	<b>Heid, Johannes</b>	Simulative Untersuchungen zu einer modifizierten VSM-Regelung zu Einhaltung von DC-seitigen Wirkleistungsgrenzen	Schittek
Master	<b>Juettner, André</b>	Ausfallstrategien von Umspannwerken und Schalstationen – Automatisierte Überprüfung und Optimierung bestehender Abläufe mit Hilfe von pandapower	Wang
Master	<b>Lytaev, Pawel</b>	Adaptive and Automated Distance Protection in Distribution Grids with High Distributued Generation	Banerjee / Haack
Master	<b>Lyu, Zhabai</b>	Stochastic Active Power Curtailment Optimization in High Voltage Distribution Systems Applying Participation Factor	Majidi / Zheng Liu
Bachelor	<b>Noppe, Tina</b>	Ermittlung von Gleichzeitigkeitsfaktoren für Luft-Wasser-Wärmepumpen und Auslastungssynthese eines Niederspannungsnetzes	Ulffers
Master	<b>Sanina, Natalia</b>	Clustering zur Ableitung sektorübergreifender Problemregionen für die Standortbestimmung zukünftiger PtX-Anlagen in Deutschland	Banze
Master	<b>Toenges, Eric</b>	Analytical Threat Modeling for Power Systems	Löser / Haack

**PUBLIKATIONEN 2021 / 2022**

Autoren	Titel	Konferenz	Jahr
<b>Konferenzbeiträge EVS</b>			<b>EVS</b>
Facanha de Oliveira, E.; Cipriano da Silva Filho, O.; Yu, X.; Zacharias, P.	Small-Signal Model and Control Design Considerations for Three-Phase Dual Active Bridge Converters	PCIM Europe digital days 2021	2021
Pfeiffer, J.; Küster, P.; Schulz, I.; Friebe, J.; Zacharias, P.	Review of Flux Interaction of Differently Aligned Magnetic Fields in Inductors and Transformers	IEEE Access	2021
Zacharias, P.	Controllable inductance as actuator in power electronics, 2021, 23rd European Conference on Power Electronics and Applications	EPE'21 ECCE Europe	2021
Nazeri, A.; Noeding, Ch.; Zacharias, P.	High-Performance Grid Current Feedback Control for Three-Phase Voltage-Source Converter with an LCL Filter for Weak grid Conditions	48 <sup>th</sup> Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society	2022
Nazeri, A.; Saeidi, M.; Zacharias, P.	Design and Performance Analysis of a Modified Proportional Multi-Resonant (PMR) Controller for Three-Phase Voltage-Source Inverters	24 <sup>th</sup> European Conference on Power Electronics and Applications	2022
Nazeri, A.; Zacharias, P.	Design, Analysis and Experimental Validation of the Harmonic Compensation for Three-Phase Stand-Alone Voltage-Source UPS Inverters	Industry Applications Society Annual Meeting (IAS)	2022
Nazeri, A.; Zacharias, P.	An Improved Multi-Loop Resonant and Plug-In Repetitive Control Schemes for Three-Phase Stand-Alone PWM Inverter Supplying Non-Linear Loads	24 <sup>th</sup> European Conference on Power Electronics and Applications	2022
Nguyen, K.-H.; Nazeri, A.; Yu, X.; Zacharias, P.	A Novel Modified-TOGI Based PLL for the Three-Phase Unbalanced and Distorted Grid Conditions	EPE'22 ECCE Europe	2022
Rothenburger, M.; Horn, M.; Schulze, G.; Yu, X.; et al	Multilevel Battery Converter with Cascaded H-Bridges on Cell Level-Battery Management System or a Renewed Attempt for Power Electronic Building Blocks	24 <sup>th</sup> European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'22 ECCE Europe)	2022
Saeidi, M.; Dayea, M.; Nazeri, A.; Zacharias, P.	Behavior Consideration of 1200 V SiC Half-Bridge Power Module under Various Dead-Time during Hard-Switching	IECON 2022 – 48 <sup>th</sup> Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics	2022

## PUBLIKATIONEN 2021 / 2022

Autoren	Titel	Konferenz	Jahr
<b>Konferenzbeiträge EVS</b>			<b>EVS</b>
Saeidi, M.; Jenhani, F.; Nazeri, A.; Zacharias, P.	Analysis and Implementation of Effective Placement of EMC Capacitors for WBG Modules	24 <sup>th</sup> European Conference on Power Electronics and Applications	2022
Saeidi, M.; Nazeri, A.; Zacharias, P.; Zilic, R.	A Novel Technique for the Suppression of the Displacement Current through Power Module Base-Plate Capacitance	24 <sup>th</sup> European Conference on Power Electronics and Applications	2022
Srita, S.; Somkun,S.; Kaewchum, T.; Rakwichian,W.; Zacharias, P.; Kamnarn, U.; Thongpron, J.; Amorndechapong, D. and Phattanasak, M.	A Simulation-to-Implementation Platform of Discrete-Time Controlled Grid-Connected Voltage Source Converter for Distributed Energy Systems	Special Issue: <a href="https://www.mdpi.com/journal/energies/special_issues/Digital_Signal_Processing_in_Circuits">https://www.mdpi.com/journal/energies/special_issues/Digital_Signal_Processing_in_Circuits</a>	2022
Yu, X.; Nguyen, K.-H.; Zacharias, P.	A Pulse Generator Based on Transmission Line Transformer for Insulation Aging Test	24 <sup>th</sup> European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'22 ECCE Europe)	2022
Zacharias, P.	Magnetic Components	Springer, ISBN978-3-658-37205-7	2022
Zacharias, P.; Aganza Torres, A.	Measurement Method for Simple Determination of Sinusoidal Large Signal Losses in Inductive Components	EPE2022	2022
Zacharias, P.; Noeding, C.; Aganza Torres	Near 100 % Compensation of Ripple Current of a Power Electronic PWM Converter for DC/DC or DC/AC Conversion With an Integrated Magnetic Device Approach	ECPE Workshop on Magnetic Components in Power Electronics, 22 <sup>th</sup> – 23 <sup>th</sup> September 2022 Toulouse , France.	2022

## PUBLIKATIONEN 2021 / 2022

Autoren	Titel	Konferenz	Jahr
<b>Konferenzbeiträge e<sup>2</sup>n</b>			
Altayara, A.; Winter, K.; Kraiczy, M.; Hofbauer, P.; Meilinger, S. K.; Braun, M.; Wenderoth, F.	Techno-Economic Assessment of PV Forecast Accuracy for a Predictive Congestion Management at the Distribution Level	CIRED 2021 – The 26 <sup>th</sup> International Conference and Exhibition on Electricity Distribution	2021
Braun, M.; Loeser, I.; Hoppe-Oehl, H.; König, J.; Kubis, A.; Lindner, M.; Rehtanz, C.; Schwerdfeger, R. & Wellßow, W.	Systematization of autonomy levels in power system operation	ETG-Congress 2021, Online, Mai 18-19, pp. 65-70	2021
Hachmann, C.; Becker, H.; Theimer, F.; Thiel, P.; Braun, M.	Local Power System Restoration and Islanded Operation with Combined Heat and Power Plants and Integration of Wind Power	ETG Congress 2021, Online, Mai 18-19	2021
Kaempf, E.; Braun, M.	Efficient concertation of reactive power resources	ENERDAY 2021 – 15 <sup>th</sup> International Conference on Energy Economics and Technology, Dresden	2021
Kraiczy, M.; Altayara, A.; Wenderoth, F.; Winter, K.; Hofbauer, P.; Meilinger, S. K.; Braun, M.	Benefits of advanced PV power forecasts for congestion management and reactive power management at the distribution level	ETG Congress 2021, Online, Mai 18-19	2021
Kraiczy, M.; Siegl, S.; Schütt, J.; Arnold, G.; Lal, N.; Cauz, M.; Perret, L.; Wende – von Berg, S.; Mende, D.; Braun, M.; Bründlinger, R.; Macgill, L.; Jäger-Waldau, A.; Graditi, G.; Adinolfi, G.; Bucher, C.; Premm, D.	PV as an ancillary service provider -Laboratory and field experiences from IEA PVPS countries	11 <sup>th</sup> Solar & Storage Integration Workshop 2021, Berlin	2021
Liu, Z.; Wang, Z.; Bornhorst, N.; Kraiczy, M.; Wende-Von Berg, S.; Kerber, T. & Braun, M.	Optimized characteristic-curve-based local reactive power control in distribution grids with distributed generators	ETG-Congress 2021, Online, Mai 18-19, pp. 679-684	2021
Schoen, A.; Ringelstein, J.; Baumbusch, K.; Braun, M.	Multi-level Analysis of Control Strategies for Electric Vehicles	CIRED 2021 – The 26 <sup>th</sup> International Conference and Exhibition on Electricity Distribution	2021
Schoen, A.; Ringelstein, J.; Hammermeister, I.; Braun, M.; Wille-Haussmann, B.; Marchand, S.; Ruhe, S.; Nicolai, S.	Testing Automated Operation and Control Algorithms for Distribution Grids Using a Co-simulation Environment	ETG-Congress 2021, Online, Mai 18-19 pp. 1-6	2021
Schoen, A.; Uffers, J.; Maschke, H.; Junge, E.; Bott, C.; Thurner, L. & Braun, M.	Considering control approaches for electric vehicle charging in grid planning	ETG-Congress 2021, Online, Mai 18-19, pp. 716-721	2021

## PUBLIKATIONEN 2021 / 2022

Autoren	Titel	Konferenz	Jahr
<b>Konferenzbeiträge e<sup>2</sup>n</b>			
Wang, Z.; Liu, Z.; Kraiczy, M.; Bornhorst, N.; Wende-von Berg S. and Braun, M.	Fast parallel quasi-static time series simulator for active distribution grid operation with pandapower	CIRED 2021 – The 26 <sup>th</sup> International Conference and Exhibition on Electricity Distribution	2021
Bolgaryn, R.; Banerjee, G.; Cronbach, D.; Drauz, S.; Liu, Z.; Majidi, M.; Maschke, H.; Wang, Z.; Thurner, L.	Recent Developments in Open Source Simulation Software pandapower and pandapipes	Open Source Modelling and Simulation of Energy Systems (OSMES), 2022, pp. 1-7, doi	2022
Damm, N.; Harms, Y.; Stock, S. D.; Braun, M.	Implementation of a Line Search Algorithm to determine the optimal Trade-off between Grid Operation and Grid Expansion in the German Transmission Grid	PESS 2021 – Power and Energy Student Summit, pp. 115-120, CD-Rom ISBN 978-3-8007-5715-2, e-book	2022
Eberlein, S.; Degner, T.; Pabon-Ospina, L. D.; Strauss-Mincu, D.; Wiese, N.; Heising, C.; Bartelt, R.	EMT-HIL Systems to Analyze the Stability in Inverter-Dominated Transmission and Distribution Systems	21 <sup>st</sup> Wind & Solar Integration Workshop, Oct. 2022	2022
Fischbach, K.; Wiese, N.; Zhang, Y.; Braun, M.	Continuous Grid-Forming Control with Transient Current Limitation	NEIS 2022, Hamburg	2022
Heid, J.; Schittek, W.; Hachmann, C.; Braun, M.	Unsymmetrische Beiträge zur Momentanreserve durch Erzeugung, Verbrauch und Speicher	Tagung Zukünftige Stromnetze 2022, <a href="https://kobra.uni-kassel.de/handle/123456789/13586">https://kobra.uni-kassel.de/handle/123456789/13586</a> , doi:10.17170/kobra-202202015686; englisch	2022
Heid, J.; Schittek, W.; Hachmann, C.; Braun, M.	Asymmetric Contributions to Instantaneous Reserve by Generation, Loads, and Storage	Tagung Zukünftige Stromnetze 2022, Online, doi:10.17170/kobra-202202015687.	2022
Lytaev, P.; Banerjee, G.; Haack, J.	Adaptive and Automated Protection Settings for Over-Current Relays in Radial Grid Configuration	PESS 2021 – Power and Energy Student Summit, pp. 86-91, CD-Rom ISBN 978-3-8007-5715-2, e-book	2022
Schneiders A.; Haack, J.	State-based modeling of controllable power system components via stochastic activity networks	PESS 2021 – Power and Energy Student Summit, pp. 104-109, CD-Rom ISBN 978-3-8007-5715-2, e-book	2022
Wang, Z.; Wende-von Berg, S.; Braun, M.	Robust N-1 secure HV Grid Flexibility Estimation for TSO-DSO coordinated Congestion Management with Deep Reinforcement Learning	NEIS 2022, Hamburg, doi	2022
Wiese, N.; Zhang, Y.; Braun, M.	New Current Limiting Control for Grid-Forming Converter under Unbalanced Faults	Wind&Solar Integration Workshop 2022, The Hague, Netherlands	2022

## PUBLIKATIONEN 2021 / 2022

Autoren	Titel	Journal / Zeitschrift	Jahr
<b>Beiträge in wissenschaftlichen Journals / Fachzeitschriften e<sup>2</sup>n</b>			
Bolgaryn, R.; Wang, Z.; Scheidler, A.; Braun, M.	Active Power Curtailment in Power System Planning	IEEE Open Access Journal of Power and Energy, vol. 8, pp. 399-408, 2021, DOI: 10.1109/OAJPE.2021.3118445	2021
Liu, Z.; Menke, J.-H.; Bornhorst, N.; Braun, M.	Static Grid Equivalent Models Based on Artificial Neural Networks	IEEE Access, vol. 9, pp. 168535-168546, DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3134373	2021
O'Malley, M.; Bowen, T.; Bialek, J.; Braun, M.; Cutululis, N.; Green, T.; Hansen, A.; Kennedy, E.; Kiviluoma, J.; Leslie, J.; Li, Y.; Matevosyan, J.; McDowell, J.; Miller, N.; Pettingill, P.; Ramasubramanian, D.; Robinson, L.; Schaefer, C.; Ward, J.	Enabling Power System Transformation Globally A System Operator Research Agenda for Bulk Power System Issues	IEEE Power and Energy Magazine, vol. 19, no. 6, pp. 45-55	2021
Then, D.; Bauer, J.; Kneiske T.; Braun, M.	Interdependencies of infrastructure investment decisions in multi-energy systems – a sensitivity analysis for urban residential areas	Smart Cities, vol. 4, no. 1, pp. 112-145, DOI: 10.3390/smartcities4010007	2021
Wang, H.; Kraiczy, M.; Mende, D.; Stöcklein, S.; Braun, M.	Application-oriented reactive power management in german distribution systems using decentralized energy resources	Energies, vol. 14, no. 16, pp. 4949, DOI: 10.3390/en14164949	2021
Wang, Z.; Wende-von Berg, S.; Braun, M.	Fast parallel Newton–Raphson power flow solver for large number of system calculations with CPU and GPU	Sustainable Energy – Grids and Networks, vol. 27; article no. 100483, ISSN: 26665468, DOI:10.1016/j.segan.2021.100483	2021
von Bonin, M.; Dörre, E.; Al-Khzouz, H.; Braun, M.; Zhou, X.	Impact of Dynamic Electricity Tariff and Home PV System Incentives on Electric Vehicle Charging Behavior Study on Potential Grid Implications and Economic Effects for Households	Energies 2022, online, ISSN: 19961073, DOI: 10.3390/en15031079	2022
Haack, J.; Narayan A.; Patil, A.D.; Klaes, M.; Braun, M.; Lehnhoff, S.; de Meer, H.; Rehtanz, C.	A Hybrid Model for Analysing Disturbance Propagation in Cyber–Physical Energy Systems	Electric Power Systems Research, vol. 212, ISSN: 03787796, DOI: 10.1016/j.epsr.2022.108356	2022
Hachmann, C.; Becker, H.; Braun, M.	Cold Load Pickup Model Adequacy for Power System Restoration Studies	Energies, vol.15, no. 20, p. 7675, <a href="https://doi.org/10.3390/en15207675">https://doi.org/10.3390/en15207675</a>	2022
Loeser, I.; Braun, M.; Gruhl, C.; Menke, J.-H.; Sick, B.; Tomforde, S.	The Vision of Self-Management in Cognitive Organic Power Distribution Systems	Energies 2022, vol. 15, no. 3, ISSN: 19961073, DOI: 10.3390/en15030881	2022

## PUBLIKATIONEN 2021 / 2022

Autoren	Titel	Journal / Zeitschrift	Jahr
<b>Beiträge in wissenschaftlichen Journals / Fachzeitschriften e<sup>2</sup>n</b>			
Merk, P.; Schulz, S.; Becker, H.; Hachmann, C.; Hauer, I.; Glaser, S.; Hiersemann, N. I.; Krahmer, S.; Schlegel, S.; Westermann, D.; Schegner P.	Wer startet das Netz der Zukunft nach einem Blackout?	ETG journal, Issue 2, pp. 18-21, <a href="https://vde.1kcloud.com/ep1627a22222d248/#18">https://vde.1kcloud.com/ep1627a22222d248/#18</a>	2022
Stanković, A.M.; Tomsovic, K.L.; De Caro, F.; Braun, M.; Chow, J.H.; Äukalevski, N.; Dobson, I.; Eto, J.; Fink, B.; Hachmann, C.; Hill, D.; Ji, C.; Kavicky, J.A.; Levi, V.; Liu, C-C.; Mili, L.; Moreno, R.; Panteli, M.; Petit, F.D.; Sansavini, G.; Singh, C.; Srivastava, A.K.; Strunz, K.; Sun, H.; Xu, Y.; Zhao, S.	Methods for Analysis and Quantification of Power System Resilience	IEEE Transactions on Power Systems, pp. 1-14, Print ISSN: 0885-8950, Electronic ISSN: 1558-0679, doi: 10.1109/TPWRS.2022.3212688	2022
von Bonin, M.; Dörre, E.; Al-Khzouz, H.; Braun, M.; Zhou, X.	Impact of Dynamic Electricity Tariff and Home PV System Incentives on Electric Vehicle Charging Behavior Study on Potential Grid Implications and Economic Effects for Households	Energies 2022, online, ISSN: 19961073, DOI: 10.3390/en15031079	2022
Wang, Z.; Menke, J.-H.; Schäfer, F.; Braun, M.; Scheidler, A.	Approximating multi-purpose AC Optimal Power Flow with reinforcement trained Artificial Neural Network	Energy and AI, vol. 7, ISSN 2666-5468, DOI: 10.1016/j.egyai.2021.100133	2022
Zhang, Y.; Duckwitz, D.; Wiese, N.; Braun, M.	Extended Nodal Admittance Matrix Based Stability Analysis of HVDC Connected AC Grids	IEEE Access, vol. 10, pp. 55200–55212, ISSN: 21693536, DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3177232	2022

**PUBLIKATIONEN 2021 / 2022**

Autoren	Titel	Bücher / Buchbeiträge	Jahr
<b>Bücher und Buchbeiträge e<sup>2</sup>n</b>			
Niedermeyer, F.; Braun, M. (Ed.)	Performance Assessment of Residential PV Battery Systems Development and Application of Test Procedures and Key Performance Indicators	Energy Management and Power System Operation, Band 14, Universitaet Kassel, doi:10.17170/kobra-202104133649	2021
Requardt, B.; Braun, M. (Ed.)	Architekturen und Verfahren für modulare Pilotsysteme und Erweiterungen von Netz- leitstellen	Energy Management and Power System Operation, Band 15, Universitaet Kassel, doi:10.17170/kobra-202104073628	2021
Schaefer, F.; Braun, M. (Ed.)	Multi-Year Time-Series-Based power system planning with hybrid optimization and supervised learning methods	Energy Management and Power System Operation, Band 13, Universitaet Kassel, doi:10.17170/kobra-202101213009	2021

Autoren	Titel	Online	Jahr
<b>Sonstiges e<sup>2</sup>n</b>			
Birkner, P.; Kisse, J. M.; Fischer, F.	Das „North Sea Energy Programme“ der Niederlande – Konzept für ein multimodales Energiesystem der Energiewende	In PERSPEKTIVEN 2021/22, S. 80–91. Online verfügbar unter <a href="https://redaktion.hessen-agentur.de/publication/2022/3787_HoE_PERSPEKTIVEN2021-22.pdf">https://redaktion.hessen-agentur.de/publication/2022/3787_HoE_PERSPEKTIVEN2021-22.pdf</a>	2022



## MITARBEITERINNEN UND MITARBEITER

## MITARBEITER DES KDEE/EVS/e<sup>2</sup>n/INES

### Leitung EVS

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

Tel.: 0561 804 6344

peter.zacharias@uni-kassel.de



ab 2023

Designierter Fachgebietsleiter

**Prof. Dr.-Ing. Jens Friebe (EVS)**

Tel.: 0561 804 6305

friebe@uni-kassel.de

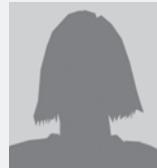
### Leitung e<sup>2</sup>n

**Prof. Dr.-Ing.****Martin Braun (e<sup>2</sup>n)**

Tel.: 0561 804 6202

martin.braun@uni-kassel.de

### Sekretariat EVS

**Frau Anja Clark-Carina (EVS)**

Tel.: 0561 804 6344

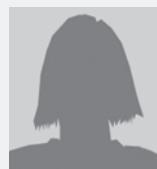
sekretariat.evs@uni-kassel.de

### Sekretariat e<sup>2</sup>n

**Frau Kristina Torno (e<sup>2</sup>n)**

Tel.: 0561 804 6201

kristina.torno@uni-kassel.de



bis 2022

**Frau Silvia Schlegel (e<sup>2</sup>n)**

### Leitung INES

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

Tel.: 0561 804 6182

clemens.hoffmann@uni-kassel.de

### Sekretariat INES

**Frau Annette Petrat (INES)**

Tel.: 0561 804 6182

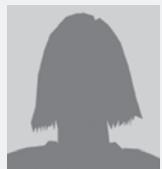
annette.petrat@uni-kassel.de

**Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter EVS**

bis 2022  
**Dr.-Ing. Alejandro Aganza Torres**  
Post-Doc



**Techn. Bernhard Siano**  
Tel.: 0561 804 6524  
siano@uni-kassel.de



**Samantha Barbosa, M.Sc.**  
PhD-Student  
Tel.: 0561 804 6510  
samanta.barbosa@student.uni-kassel.de



bis 2021  
**Jiajing Wende, M.Sc.**



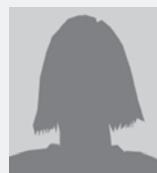
**Techn. Volker Berge**  
Tel.: 0561 804 6524  
vberge@uni-kassel.de



**Jörg Wiederrecht**  
Projekt FAST  
Tel.: 0561 804 6465  
wie@uni-kassel.de



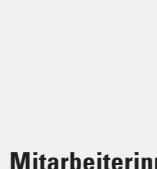
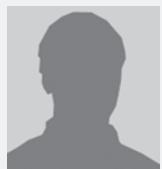
**Costa Kevin Rabelo**  
Projekt H2EASY  
Tel.: 0561 804 6404  
kevin.costa@uni-kassel.de



**Xiao Yu, M.Sc.**  
Projekt KMUI-MCIB / H2EASY  
Tel.: 0561 804 6477  
xiao.yu@uni-kassel.de



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

**Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter e²n**

bis 2022  
**Ahmad Nazeri, M.Sc.**  
PhD-Student



**Mohamad Alfakhouri, M.Sc.**  
Wiss. Mitarbeiter  
baraa.alfakhouri@uni-kassel.de



bis 2022  
**Khanh-Hung Nguyen, M.Sc.**  
PhD-Student



**Gourab Banerjee, M.Sc.**  
Wiss. Mitarbeiter  
Tel.: 0561 804 6217  
gourab.banerjee@uni-kassel.de



**Dr.-Ing. Christian Nöding**  
Akademischer Rat  
Tel.: 0561 804 6166  
christian.noeding@uni-kassel.de



**Dr.-Ing. Nils Bornhorst**  
Gruppenleiter  
Tel.: 0561 804 6381  
nils.bornhorst@uni-kassel.de



**Mahmoud Saeidi, M.Sc.**  
Projekt H2EASY  
Tel.: 0561 804 6491  
mahmoud.saeidi@uni-kassel.de



**Nicolai Damm, M.Sc.**  
Wiss. Mitarbeiter  
nicolai.damm@uni-kassel.de

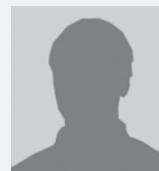
## MITARBEITER DES KDEE/EVS/e<sup>2</sup>n/INES

### Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter e<sup>2</sup>n



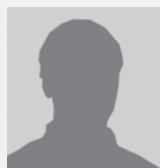
#### Marcel Dipp, M.Sc.

Wiss. Mitarbeiter  
Tel.: 0561 804 6432  
marcel.dipp@uni-kassel.de



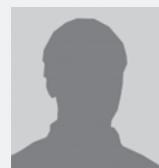
#### Dr.-Ing. Philipp Härtel

Wiss. Mitarbeiter  
uk093766@uni-kassel.de



#### Dr. Jan Dobschinski

Gruppenleiter  
jan.dobschinski@uni-kassel.de



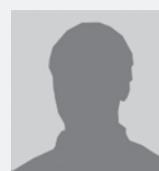
#### Johannes Heid, M.Sc.

Wiss. Mitarbeiter  
johannes.heid@uni-kassel.de



#### Simon Ruben Drauz, M.Sc.

Wiss. Mitarbeiter  
Tel.: 0561 7294-383  
uk077872@uni-kassel.de



#### Florian Hirschmann, M.Sc.

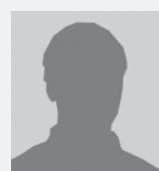
Wiss. Mitarbeiter  
florian.hirschmann@uni-kassel.de



bis 2021

#### Marcel Ernst, M.Sc.

Wiss. Mitarbeiter



#### Daniel Horst, M.Sc.

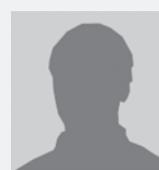
Wiss. Mitarbeiter  
daniel.horst@uni-kassel.de



bis 2022

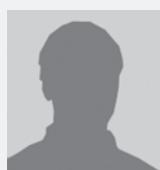
#### Kai Fischbach, M.Sc.

Wiss. Mitarbeiter



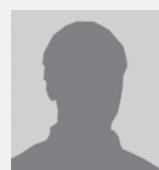
#### Jolando Kisse, M.Sc.

Wiss. Mitarbeiter  
Tel.: 0561 804 6377  
jolando.kisse@uni-kassel.de



#### Dipl.-Ing. Bernd Gruß

Labor  
Tel.: 0561 804 6228  
gruss@uni-kassel.de



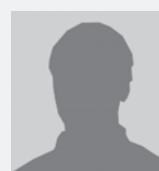
#### Maximilian Kleebauer M.Sc.

Wiss. Mitarbeiter  
maximilian.kleebauer@uni-kassel.de



#### Jonas Haack-Stappel, M.Sc.

Wiss. Mitarbeiter  
Tel.: 0561 804 6482  
jonas.haack@uni-kassel.de



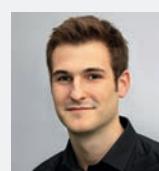
#### Jakob Kopiske, M.Sc.

Wiss. Mitarbeiter  
jakob.kopiske@uni-kassel.de



#### Dipl.-Ing. Christian Hachmann

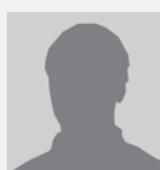
Wiss. Mitarbeiter  
Tel.: 0561 804 6657  
christian.hachmann@uni-kassel.de



bis 2021

#### Jannis Kupka, M.Sc.

Wiss. Mitarbeiter



#### Benedikt Häckner, M.Sc.

Wiss. Mitarbeiter  
benedikt.haeckner@uni-kassel.de



#### Dr. rer. pol. Lars-Peter Lauven

Gruppenleiter  
Tel.: 0561 804 6165  
lars.lauven@uni-kassel.de

**Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter e<sup>2</sup>n**

**Zheng Liu, M.Sc.**  
Wiss. Mitarbeiter  
Tel.: 0561 804 6409  
zheng.liu@uni-kassel.de



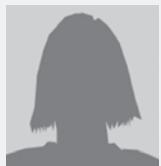
**Dr.-Ing. Sebastian Stock**  
Gruppenleiter  
sebastian.stock@uni-kassel.de



**Daniel Lohmeier, M.Sc.**  
Wiss. Mitarbeiter  
Tel.: 0561 7294-134  
daniel.lohmeier@iee.fraunhofer.de



**Jan Ulfers, M.Sc.**  
Wiss. Mitarbeiter  
Tel.: 0561 7294-210  
jan.ulffers@uni-kassel.de



bis 2022  
**Inga Löser, M.Sc.**  
Wiss. Mitarbeiterin



**Manuel Valois, M.Sc.**  
Wiss. Mitarbeiter  
Tel.: 0561 7294-150  
manuel.valois@uni-kassel.de



**Pawel Lytaev, M.Sc.**  
Wiss. Mitarbeiter  
pawel.lytaev@uni-kassel.de



bis 2022  
**Michael von Bonin, M.Sc.**  
Wiss. Mitarbeiter



bis 2022  
**Maryam Majidi, M.Sc.**  
Wiss. Mitarbeiterin



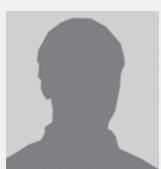
bis 2022  
**Zhenqi Wang, M.Sc.**  
Wiss. Mitarbeiter



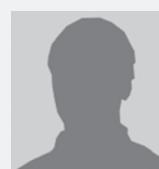
**Steffen Meinecke, M.Sc.**  
Wiss. Mitarbeiter  
Tel.: 0561 804 6084  
steffen.meinecke@uni-kassel.de



**Dr. rer. nat. Sebastian Wende von Berg**  
Gruppenleiter  
Tel.: 0561 804 6381  
sebastian.wende-von.berg@uni-kassel.de



**Edwin Camil Mora Gil, M.Sc.**  
Wiss. Mitarbeiter  
edwin.camil.mora.gil@uni-kassel.de



**Nils Wiese, M.Sc.**  
Tel.: 0561 804 6206  
Wiss. Mitarbeiter  
nils.wiese@uni-kassel.de



**Walter Schitte, M.Sc.**  
Wiss. Mitarbeiter  
Tel.: 0561 804 6213  
walter.schitte@uni-kassel.de



**Dr.-Ing. Yonggang Zhang**  
Wiss. Mitarbeiter  
yonggang.zhang@uni-kassel.de



bis 2021  
**Andrea Schön, M.Sc.**  
Wiss. Mitarbeiterin



**Niklas Hoffmann**  
**Ferdinand Staude**  
**Jan Liphardt**

**Studentische Mitarbeitende e<sup>2</sup>n**

## MITARBEITER DES KDEE/EVS/e<sup>2</sup>n/INES

### Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter INES



#### **Dr. rer. nat. Alexander Basse, M.Sc.**

Tel.: 0561 804 6169  
alexander.basse@uni-kassel.de



bis 2022  
**Dipl.-Ing., Dipl.-Systemwiss. Geo Kocheril**

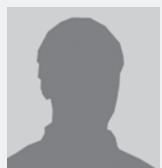


#### **Dr.-Ing. Doron Callies, M.Sc.**

Gruppenleitung  
doron.callies@iee.fraunhofer.de



**Dr. phil., Dipl.-Math. Friedrich Krebs**  
Stellvertretende Fachgebietsleitung INES  
Tel.: 0561 804 6141  
fkrebs@uni-kassel.de



#### **Ivan Digel, M.Sc.**

Tel.: 0561 804 6522  
ivan.digel@uni-kassel.de



**Lukas Nacken, M.Sc.**  
lukas.nacken@uni-kassel.de



bis 2021

#### **Dr. Hiep Do Thi, MBA, B.Sc.**

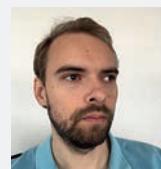


**Leon-Moritz Schellhase, M.Sc.**  
leon.schellhase@uni-kassel.de

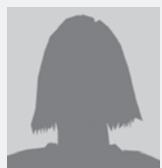


#### **Philip Gauglitz, M.Sc.**

philip.gauglitz@uni-kassel.de



**Dr. rer. nat. Martin Wiemer**  
martin.wiemer@iee.fraunhofer.de



#### **Kira Gramitzky, M.Sc.**

kira.gramitzky@uni-kassel.de



#### **Tabea Hildebrand, M.Sc.**

uk093859@uni-kassel.de



#### **Dr. phil., Dipl.-Systemwiss. Sascha Holzhauer**

Gruppenleitung  
Tel.: 0561 804 6513  
sascha.holzhauer@uni-kassel.de



#### **Alwina Kaiser, M.Sc.**

Tel.: 0561 804 6103  
alwina.kaiser@uni-kassel.de

**WWW.KDEE.UNI-KASSEL.DE**





**www.kdee.uni-kassel.de**

Kompetenzzentrum für Dezentrale Elektrische Energieversorgungstechnik (KDEE)

Fachgebiet Elektrische Energieversorgungssysteme (EVS)

Fachgebiet Energiemanagement und Betrieb elektrischer Netze (e<sup>2</sup>n)

Fachgebiet Integrierte Energiesysteme (INES)

Universität Kassel  
Wilhelmshöher Allee 71

34121 Kassel, Germany

EVS: Tel. +49 561 804 6344

<https://www.uni-kassel.de/eecs/evs>

e<sup>2</sup>n: Tel. +49 561 804 6201

<https://www.uni-kassel.de/eecs/e2n>

INES: Tel. +49 561 804 6182

<https://www.uni-kassel.de/eecs/ines>

Stand: März 2023

