



Technische  
Universität  
Braunschweig

**elenia**  
Institut für Hochspannungstechnik  
und Energiesysteme

# Jahresbericht 2022/2023

elenia Institut für Hochspannungstechnik  
und Energiesysteme





# Jahresbericht 2022/2023

**elena Institut für Hochspannungstechnik  
und Energiesysteme**



# Liebe Leserschaft,

während in den letzten zwei Jahren sich das Leben mit Covid-19 an unserer Universität zum Glück normalisierte, traten zwei neue Entwicklungen hinzu, die den Blick der Öffentlichkeit auf das Thema „Energie“ intensivierten: zunächst wurde seit dem Koalitionsvertrag der „Ampel“ vom 07.12.2021 die Energiewende beschleunigt (beispielsweise durch den verstärkten Ausbau von erneuerbaren Energien und Stromnetze, den Neustart beim „Smart Meter Rollout“ und das umstrittene Gebäude-Energie-Gesetz), dann kam am 24.2.2022 der russische Angriffskrieg gegen die Ukraine hinzu, welcher durch die Unterbrechung der russischen Gaslieferungen die Gas- und damit auch die Strom- und Fernwärmepreise in Deutschland in neue Höhen trieb. An der TU Braunschweig führte das beispielsweise zu einer Verdreifachung des Strompreises und deshalb zu fokussierten Energieeinsparbemühungen. Ein Zeugnis davon ist die Beschaffung von warmen und kuscheligen elenia-Fleecejacken für die Mitarbeitenden auf dem Titelbild, um die Raumtemperatur um bis zu 2 Grad senken zu können.

Obwohl der Bedarf an Ingenieurinnen und Ingenieure der elektrischen Energietechnik beispielsweise bei Industrie und Netzbetreibern wegen der Energiewende und aus demografischen Gründen zunimmt, nehmen die Zahlen für Studienanfänger seit vielen Jahren bundesweit ab. Der neu erfolgreich gestartete Bachelorstudiengang Nachhaltige Energiesysteme und Elektromobilität verschaffte nur eine kurzzeitige Linderung bei den Zahlen unserer Fakultät. Alle Beteiligten müssen gemeinsam dafür sorgen, dass das teilweise etwas verstaubte Bild der Elektrotechnik bei Schülerinnen und Schülern Richtung der innovativen und gesellschaftlichen Bedeutung verschoben wird.

Mit diesem Zweijahresbericht legen wir wieder Rechenschaft ab über unsere Forschungsarbeiten und unsere Mittelverwendung. Der Drittmittelanteil ist durch viele innovative und grundlegende Forschungsprojekte weiter gesteigert worden. Wir bedanken uns herzlich bei allen Personen und Organisationen, der TU, den Unternehmen und Forschungseinrichtungen, den Lehrbeauftragten, der DFG, den Projektträgern, den Bundes- und Landesministerien und der PTB für die gute Zusammenarbeit und die Unterstützung unserer Arbeiten.

Vor allem bieten wir mit diesem Bericht wieder eine Austauschplattform für unsere engagierten Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, um ihre Ideen und Ergebnisse mit der Fachwelt und der Gesellschaft teilen zu können. Dabei hinterlegen wir alle Artikel mit Kontakten, um Ihnen die Möglichkeit zum Gedankenaustausch anzubieten.

Im Jahr 2025 wird unser Institut 100 Jahre alt. Für den Herbst 2025 planen wir eine Neuauflage unseres Symposiums, damit alle Freundinnen und Freunde des Institutes sowie die Partnerfirmen mit uns gebührend dieses Jubiläum feiern können.

Wir wünschen Ihnen viel Spaß beim Durchblättern unseres Berichts und für das Jahr 2024 viel Glück, alles Gute und vor allem Gesundheit.

Bernd Engel, Michael Kurrat

BRAUNSCHWEIG, IM OKTOBER 2023



*Bernd Engel*



*Michael Kurrat*

## elenia

Jahresrückblicke 2022 und 2023 .....	10
Aktuelle Besetzung .....	12
Ehemalige Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter .....	17
Studentische Hilfskräfte 2022/2023 .....	17
Zahlen und Fakten .....	18
Werte und Ziele .....	18
Die Jahre in Zahlen .....	19
Wege zum elenia .....	20
Schwerpunkt Komponenten .....	24
Schwerpunkt Aktives Verteilernetz .....	28
Schwerpunkt Elektromobilität .....	32



## Forschungsberichte

AG-Kooperation .....	38
Team Batterietechnik .....	46
Team DC Systeme und Schaltgeräte .....	52
Team Hochspannungs-, Vakuum-, & Plasmatechnik .....	58
Team Energiewirtschaft und Energiemanagement .....	62
Team Netzplanung und Netzbetrieb .....	76
Team Netzdynamik und Systemstabilität .....	84



## Promotionen

Robin Drees .....	96
Melanie Hoffmann .....	97
Frederik Anspach .....	98
Dirk Bösche .....	99
Benjamin Weber .....	100
Stefanie Čelan .....	102
Florian Rauscher .....	103
Jan Bellin .....	104
Benyamin Heryanto Rusanto .....	105



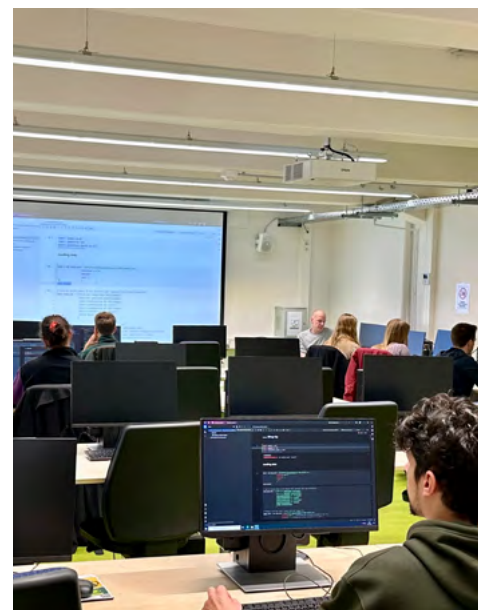
## Labore und Werkstätten

Batterietest-Labore .....	109
Blitzschutzlabor .....	113
DC-Demonstrationsnetzlabor .....	117
Hochleistungsgleichstromprüffeld .....	121
Hochspannungshalle .....	125
Isolierstofflabor .....	129
Kooperationslabor .....	133
Leistungsprüffeld .....	137
TE-Kabine zur Messung von DC-TE .....	141
elenia-Ladepark .....	145
Energiemanagementlabor .....	149
Netzdynamiklabor .....	153
Mechanische & Elektrotechnische Werkstatt .....	159
IT-Abteilung des elenia .....	163



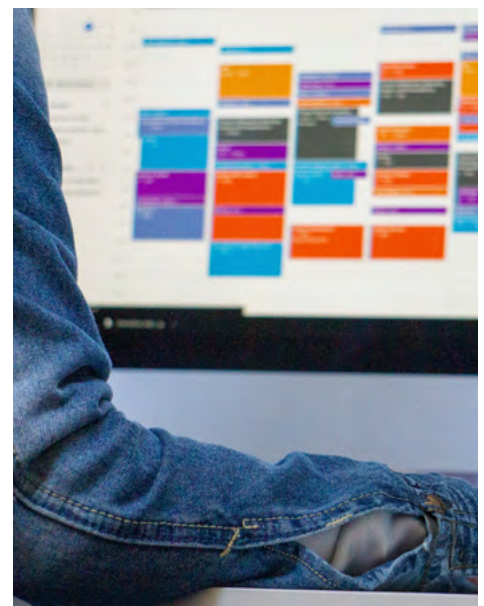
## Lehre

Neuer Bachelorstudiengang NEEMO erfolgreich gestartet! .....	168
Lehrveranstaltungen .....	169
Studentische Arbeiten 2022 .....	173
Studentische Arbeiten 2023 .....	178



## Chronologie

Veröffentlichungen 2022–2023 .....	184
Veranstaltungen und Events 2022 .....	188
Veranstaltungen und Events 2023 .....	190
Beteiligung an der Selbstverwaltung 2022 .....	192
Beteiligung an der Selbstverwaltung 2023 .....	193









# elenia

Jahresrückblicke 2022 und 2023 .....	10
Aktuelle Besetzung .....	12
Ehemalige Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter .....	17
Studentische Hilfskräfte 2022/2023 .....	17
Zahlen und Fakten .....	18
Werte und Ziele .....	18
Die Jahre in Zahlen .....	19
Wege zum elenia .....	20
Schwerpunkt Komponenten .....	24
Schwerpunkt Aktives Verteilernetz .....	28
Schwerpunkt Elektromobilität .....	32

# Jahresrückblicke 2022 und 2023

## Zurück zur Normalität? Teilweise mit neuen Herausforderungen!

Der Berichtszeitraum war anfänglich noch geprägt von der COVID-19-Pandemie. Erst Anfang Februar 2023 stufte das Robert-Koch-Institut die Gefährdung durch COVID-19 für die Gesundheit der Bevölkerung in Deutschland von „hoch“ auf „moderat“ herab. So war das Sommersemester 2023 das erste „normale“ Semester seit Beginn der Corona-Infektionen.

Nicht nur in der Lehre normalisierte sich im Laufe des Berichtszeitraums die Lage zunehmend, auch Promotionsprüfungen, Projekttreffen mit Forschungspartnern und Tagungen fanden zunehmend wieder in Präsenz statt. Für das Wiedererleben der Institutsgemeinschaft waren u. a. folgende Ereignisse wichtig: das Sommerfest 2022, das als besonderes Highlight nach all den Institutereignissen im virtuellen Raum empfunden wurde, verschiedene AG-Workshops 2022/23, die Pflingstexkursion 2023 mit Studierenden Richtung Schweiz und der Institutsausflug 2023 in das Mühlenmuseum in Gifhorn mit Einladung zum Mittagessen durch Prof. Michael Kurrat aus Anlass seines 60. Geburtstages. Erfolgreich war auch die Ausrichtung des 12. Braunschweiger Energieseminars mit anschließendem elenia Symposium im Oktober 2023. Bei beiden Veranstaltungen gab es viele interessante Vorträge aus befreundeten Institutionen und die Teilnehmenden genossen die Vernetzung in den Pausen und bei den Abendessen. Das elenia brachte sich auch stark bei den ETG-Fachtagungen wie die Hochspannungstage 2022 und die High Voltage goes green 2023 sowie bei der Grid Integration Week 2022 in Den Haag und 2023 in Kopenhagen ein. Ein besonderer Höhepunkt war die Absolutenfeier 2023, bei der zwei Promotionen ausgezeichnet wurden: Dr. Robin Drees mit dem Dieter-Kind-Preis und Dr. Dirk Bösche mit dem Walter-Kertz-Preis.

Im Berichtszeitraum wurde die Organisation des weiterwachsenden Institutes fortentwickelt. Dies geschieht im Wesentlichen im Vorstand des elenia, der maß-

geblich auch vom hochmotivierten Project Management Office (PMO) und seinen Mitgliedern geprägt wird. Unter anderem wurden aus den erfahrenen wissenschaftlichen Mitarbeitern und Postdocs ein Administrativer Leiter verantwortlich für die Geschäftsstelle und weitere administrative Prozesse, Dr. Frank Soyck, und ein Technischer Leiter, Dr. Dirk Bösche, verantwortlich für die mechanische und elektrische Werkstätten sowie die IT benannt. Die Geschäftsstelle hat in 2023 durch das Ausscheiden der verdienten Mittelbewirtschafterinnen Jacqueline Schmidt und Petra Thiele eine personelle Erneuerung erfahren. Nancy Preuße und Sylvia Glowania haben neue Wege bei den Geschäftsprozessen gefunden.

Die Teamstruktur hat sich für das Wachstum bewährt, weil dort viele Fragen der Arbeitsteilung, des wissenschaftlichen Austauschs und der inhaltlichen Fortentwicklung mit neuen Projektanträgen geklärt werden. In beiden AGs im Institut gibt es jeweils Teams, die von einer gewissen „wissenschaftlichen Sonderkonjunktur“ und den herausragenden Vorarbeiten profitieren. Bei der AG Energietechnologien ist das Team Batterietechnik stark wachsend, was sicherlich auch am ehemaligen Teamleiter Dr. Robin Drees liegt. Außerdem wird in der Region Braunschweig die Batterieforschung mit mehreren Forschungszentren vom Batterie LabFactory Braunschweig (BLB) über das neue Fraunhofer-Zentrum für Energiespeicher und Systeme (ZESS) bis zur Anwendung in der großen Batteriefabrik Salzgitter in europaweit einmaliger Breite betrieben.

Bei der AG Energiesysteme ist das Team Systemstabilität und Netzdynamik besonders erfolgreich bei der Antragstellung für Projekte mit netzbildenden Wechselrichtern. Dies liegt sicherlich einerseits an den Vorarbeiten u. a. vom ehemaligen Teamleiter Dr. Florian Rauscher, der nach dem beachteten BMWK-Forschungsprojekt Netzregelung 2.0 in 2022 auch in 2023 seine ausgezeichnete Promotion abgeschlossen

hat. Andererseits wird spätestens seit der Roadmap Systemstabilität der Bundesregierung, in deren Beirat Prof. Bernd Engel ist, der netzbildende Wechselrichter für das Erreichen eines stabilen Betriebes bei 100% erneuerbaren Energien bei den Netzbetreibern und in der Energiepolitik stark diskutiert. Neu ist auch das vom Teamleiter Timo Sauer vertretende Thema der Kopplung der Themen netzbildender Wechselrichter und Wasserstoff-Elektrolyse, das er auch am gerade neugebauten H2 Terminal Braunschweig beforscht.

Mehr Forschungsprojekte bedeuten zusätzlichen Raumbedarf: das Gebäudemanagement der TU konnte von der Nord/LB in der Mühlenpfordtstraße eine Fläche von 150 qm für zehn neue Arbeitsplätze anmieten. Auch das elenia energie lab kann um einen großen Laborraum erweitert werden, den die Fachgruppe Elektrotechnik durch Umzug in den E-Tower dankenswerterweise abgeben konnte. Außerdem wurde das Leistungsprüffeld mit direktem Anschluss an das 20-kV-Netz von BS|Netz und einer maximalen Leistung von 18 MW in der Hochspannungshalle eingeweiht.

Ein besonderer Fokus in der Fakultät und am elenia erfährt die Gewinnung von neuen Studierenden. Der laut Fakultätentag Elektrotechnik bundesweit zu beobachtende Rückgang der Bacheloranfängerzahlen von -20 % innerhalb von vier Jahren gegenüber 2019 hat nicht nur bundesweit Auswirkungen insbesondere auf den Personalbedarf der Energiewende, dies führt auch an der Fakultät zu einem Nachwuchsman gel und handfesten finanziellen Einbußen. Das elenia war maßgeblich bei der erfolgreichen Einführung des neuen Bachelor-Studiengangs Nachhaltige Energiesysteme und Elektromobilität („NEEMO“) zum Wintersemester 2022/23 beteiligt. Darüber werden im elenia zurzeit vielfältige Aktionen zur Werbung von Schülerinnen und Schülern geplant.

 Bundesrepublik Deutschland 

# Urkunde

über die Eintragung der  
Marke Nr. 30 2023 228 618

Az.: 30 2023 228 618.8



**Inhaber/Inhaberin**

elenia Institut für Hochspannungstechnik und Energiesysteme, Körperschaft des öffentlichen Rechts, 38106 Braunschweig, DE

**Tag der Anmeldung:**  
01.08.2023

**Tag der Eintragung:**  
31.10.2023

Die Präsidentin des Deutschen Patent- und Markenamtes

Eva Schewior

München, 31.10.2023



Den aktuellen Rechtsstand und Schutzzumfang nach dem Verzeichnis der Waren und Dienstleistungen entnehmen Sie bitte dem DPMAregister unter [www.dpma.de](http://www.dpma.de).

Seit dem 31.10.2023 sind wir eine eingetragene  
Marke beim Deutschen Patent- und Markenamt.

# Aktuelle Besetzung

→  
Institutsleitung



Prof. Dr.-Ing. M. Kurrat  
Geschäftsführung bis 2023



Prof. Dr.-Ing. B. Engel  
Geschäftsführung seit 2023

→  
Geschäftsstelle



Elke Droemer



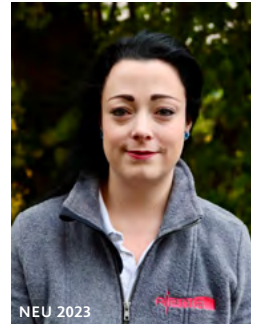
NEU 2023

Sylvia Glowania



NEU 2023

Nancy Preuße



NEU 2023

Manja Rücker

→  
Team  
Batterietechnik



NEU 2021

Oliver Landrath  
Teamleitung



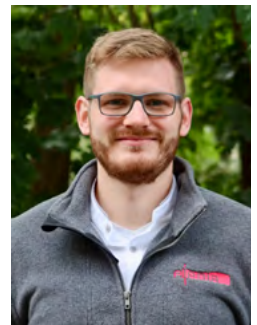
NEU 2022

Merit Holdorf



NEU 2021

Cedric Jackmann



Torben Jennert

→  
Team DC Systeme  
und Schaltgeräte



NEU 2023

Andreas Laufer



NEU 2022

Anna Rollin



Patrick Vieth  
Teamleitung



Dirk Bösche



Lars Claaßen



Melanie Hoffmann



Marc René Lotz



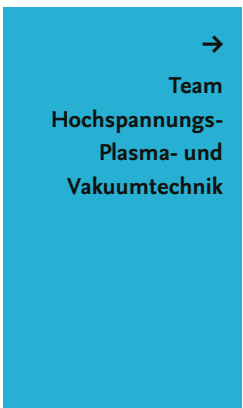
NEU 2023

Fabian Witt



NEU 2023

Fanke Zeng



Karen Flügel  
Teamleitung



Maik Kahn  
Arbeitsgruppenleitung



Muhamet Alija



Timo Meyer

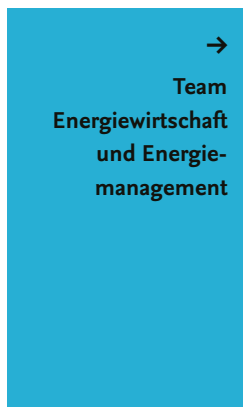


Enno Peters



NEU 2023

Laura Tiedemann



Henrik Wagner  
Teamleitung



Frank Soyck  
Arbeitsgruppenleitung



Felix Klabunde  
Arbeitsgruppenleitung



NEU 2022

Tamara Beck



Julien Essers



Mattias Hadlak  
Stellv. Teamleitung



Lily Kahl



Marcel Lüdecke



NEU 2022

Michel Meinert



Eike Niehs



NEU 2023

Kevin Preißner



Jonathan Ries

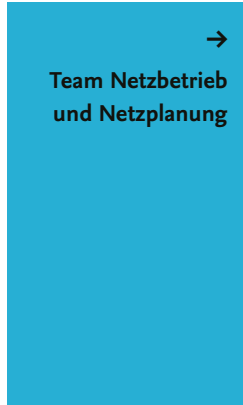


NEU 2023

Ajay Kumar Thakur



Carsten Wegkamp



→  
Team Netzbetrieb  
und Netzplanung



Gian-Luca Di Modica  
Teamleitung



Cornelius Biedermann



Lukas Ebbert



Nils Gräfer



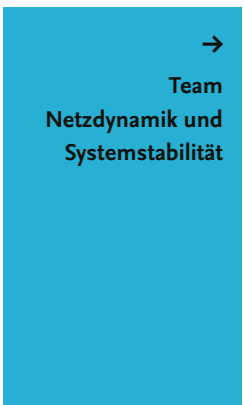
Robin Herman



Hartmudt Köppe



Merten Schuster



→  
Team  
Netzdynamik und  
Systemstabilität



Timo Sauer  
Teamleitung



NEU 2022

Max Gand



Till Garn



NEU 2023

Johanna Grobler



Stefan Klöpping



Nelly Schulz



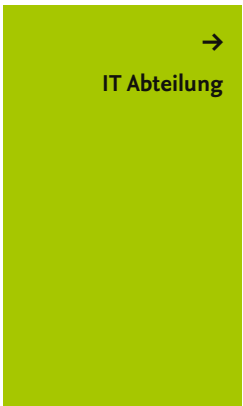
Frederik Tiedt



Stefanie Walujski



Björn Oliver Winter



Fabian Scholz  
IT-Leitung



Lukas Oppermann  
IT-Administration



Kerstin Rach  
Werkstattleitung



Frank Haake



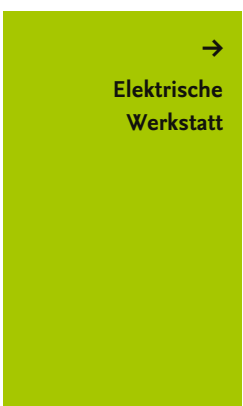
Julia Musebrink



Claas Narup



Matthis Grosche



Christian Ryll  
Werkstattleitung





# Ehemalige Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter

Vielen Dank für euer Mitwirken und  
alles Gute für eure Zukunft.

Mohammed Qudaih (2021)  
Tobias Kopp (2022)  
Dr. Ing. Jonas Wussow (2022)  
Wai Yee Choi (2022)  
Melanie Hoffmann (2022),  
Post-doc seit 2022

Florian Rauscher (2022)  
Edwin Ariel Rebak (2022)  
Julian Studt (2022)  
Christian Reinhold (2022)  
Dr.-Ing. Ernst-Dieter Wilkening  
(2022)

Frederik Anspach (2023)  
Benjamin Weber (2023)  
Robin Drees (2023)  
Petra Thiele (2023)  
Jaqueline Schmidt (2023)  
Mauriz Kahmann (2023)

## Studentische Hilfskräfte 2022/2023

Ein großes Dankeschön geht an unsere studentischen Helfer und  
Helferinnen, vielen Dank für eure Unterstützung.

### 2022

Faraj Abd Alraheem,  
Farit Ari,  
Harun Al-Sarea,  
Nikhil Arora,  
Alexandra Aumüller,  
Emmanuel-Wilson  
Bauni-Kamga  
Robert Beyer,  
Jonas Biniek,  
Jonas Brinkmann,  
Max Brüggemann,  
Ayan Roy Chowdhury,  
Eray Cinkaya,  
Serkan Cokgün,  
David Cziumpplik,  
Marcel Falinski,  
Felten Feldt,  
Max Gand,  
Ilja Gitin,  
Hendrik Grafelmann,  
Johanna Grobler,  
Janina Gottschalk,  
Timo Haakert,  
Nils Hartau,  
Franziska Harstrick,  
Pavan Ramesh Hallur,  
Charu  
Kabbalagerepura  
Venkatesh,

Julius Kohlhepp,  
Felix Korff,  
Abdubaki Kocabasa,  
Katharina Kocur,  
Hendrik Kösjan,  
Henning Krüger,  
Andreas Laufer,  
Sebastian Lindemann,  
Adrian Lux,  
Michelle Magrian,  
Manuel Meinecke,  
Shridhar Pamarish,  
Friederike Paul,  
Julius Günter Platon,  
Marten Probst,  
Xin Qi,  
Nils Reinköster,  
Julius Rieckmann,  
Thomas Röthig,  
Abbas Salamehzavareh,  
Salman Saleem,  
Stefanie Schürmann,  
Kristina Schwenk,  
Daniel Swientek,  
Kevin Schiemenz,  
Christian Schläger,  
Victor Schnell,  
Nelly Schulz,  
Kai Schulze,  
Julian Schwung,

Lia Stücke,  
Laura Tiedemann,  
Julius Trützscher,  
Steffen Viere,  
Arnold Walker,  
Dominik Wessel,  
Fabian Winkler,  
Cathleen Wiese,  
Meiyan Wu,  
Le Xuan Thien,  
Fanke Zeng,  
Jakob Zimmermann,  
Hejie Zhu,  
Shaojie Zhu,

### 2023

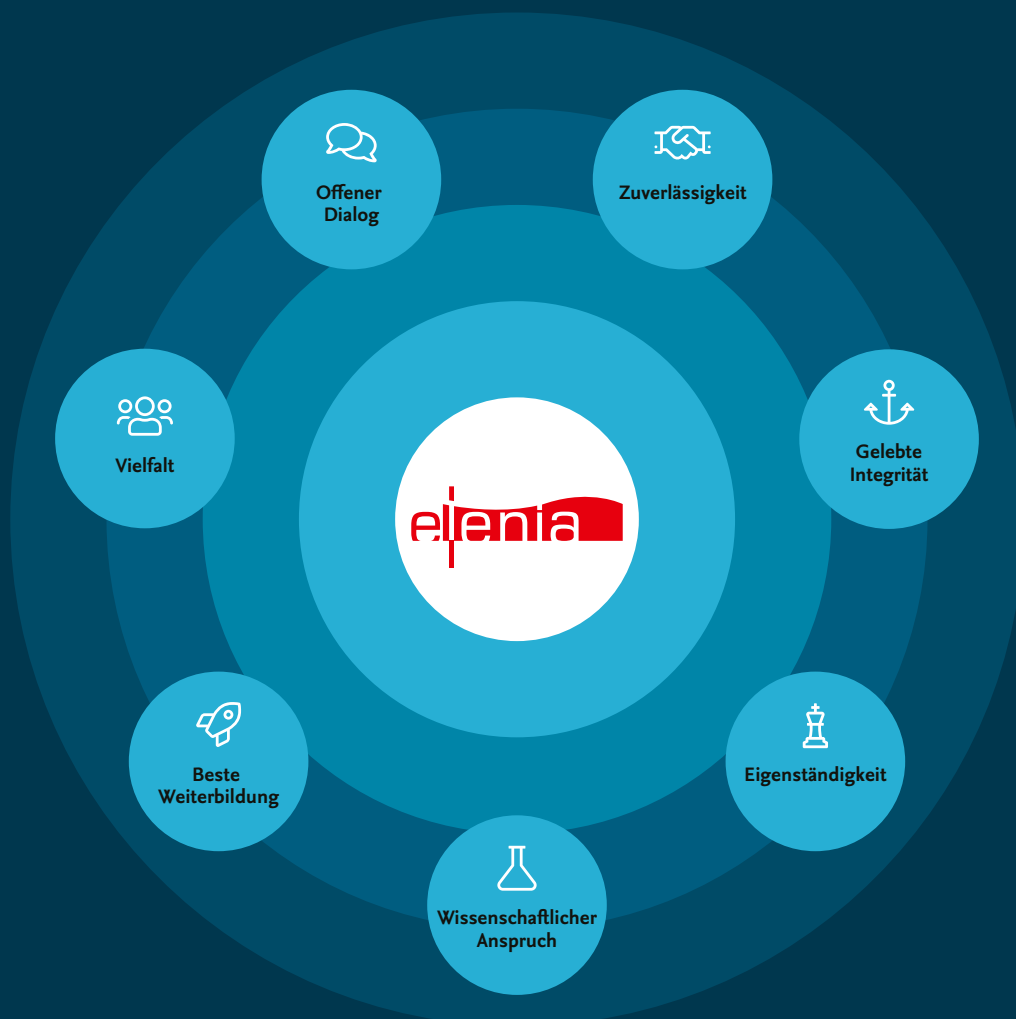
Faraj Abd Alraheem,  
Jan Ackermann,  
Aleixo Alonso,  
Harun Al-Sarea,  
Firat Ari,  
Nikhil Arora,  
Carl Bettermann,  
Jonas Brinkmann,  
Steffen Bollhorn,  
Fani Cahyani,  
Lei Chen,  
Eray Cinkaya,  
David Cziumpplik,  
Benedict Dammann,

Marcel Falinski,  
Tabea Fehrs,  
Martin Funk,  
David Geißler,  
Niels Grafelmann,  
Keno Giesselmann,  
Johanna Grobler,  
Janina Gottschalk,  
Peer Ole Hansen,  
Nils Hartau,  
Felix Haschke,  
Mara Hiller,  
Deborah Höltje,  
Tobias Jesberger,  
Katharina Kocur,  
Leona Kunze,  
Hannes Kurzmann,  
Henning Krüger,  
Andreas Laufer,  
Jiakun Liu,  
Adrian Lux,  
Michelle Magrian,  
Jost Maenicke,  
Manuel Meinecke,  
Duc Anh Nguyen,  
Erdene Otgonpurev,  
Shivam Pandey,  
Marlene Pape,  
Emma Maria del  
Rosario Pensky,

Vikas Poojary,  
Sahib Sing,  
Rajbeer Singh,  
Nils Reinköster,  
Julius Rieckmann,  
Anna Ronsdorf,  
Nils Rosebrock,  
Johannes Rothert,  
Thomas Röthig,  
Abbas Salamehzavareh,  
Tjark Schmidt,  
Victor Schnell,  
Eike Schwarz,  
Kristina Schwenk,  
Kai Schulze,  
Stefanie Schürmann,  
Oscar Steiner,  
Ajay Kumar Thakur,  
Zhi Teng,  
Julius Trützscher,  
Ali Vahidi,  
Steffen Viere,  
Constantin von Lützwow,  
Sascha Wasner,  
Rika Webel,  
Maurice Weinand,  
Cathleen Wiese,  
Le Xuan Thien,  
Jakob Zimmermann,  
André Zurmühlen.

# Zahlen und Fakten

## Werte und Ziele



„Exzellenz in Forschung und Lehre erreichen und die Zukunft der Energietechnik aktiv mitgestalten“

# Die Jahre in Zahlen

## Beschäftigte



## Standort

Braunschweig (Niedersachsen)  
seit 1925



## Studentische Arbeiten



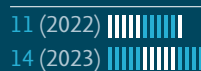
### Bachelor



### Master





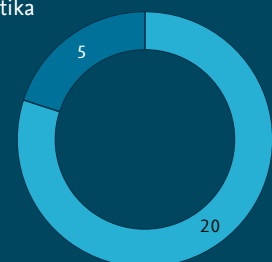
### Studienarbeiten



## Lehre



 Vorlesungen  
 Praktika



# Wege zum elenia

## Julien Essers

### Ein Werdegang im Zeichen der Energietechnik

Mein Name ist Julien Essers und ich möchte gerne meinen Weg vom Abitur bis zu meiner aktuellen Position als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Arbeitsgruppe Energiesysteme (e<sup>3</sup>) am elenia skizzieren.

Nach meinem Abitur in Marburg an der Lahn entschied ich mich für eine Ausbildung zum Industriekaufmann bei der HOPPE AG. Doch schon bald merkte ich, dass mein Interesse stärker in den technischen Bereich tendierte. Ich wagte den fachlichen Wechsel und tauchte in die Welt der Technik ein.

Das Studium der Elektrotechnik an der Technischen Universität Braunschweig mit der Vertiefung in Energietechnik bot mir die ideale Möglichkeit, mein Wissen und Interesse an nachhaltiger Energiegewinnung und -nutzung zu vertiefen.

Während meines Bachelorstudiums ergab sich die spannende Gelegenheit, als studentische Hilfskraft am Institut für Füge- und Schweißtechnik im Bereich Batterietechnik zu arbeiten. Hier konnte ich bereits erste praktische Erfahrungen sammeln und meine Kenntnisse im Bereich Lithiumionenzellen vertiefen. Der Einfluss von Verunreinigungen durch Laser-Vereinzelung und deren Auswirkungen auf die Leistung

von Lithium-Ionen-Zellen war Thema meiner Bachelorarbeit.

Mit dem Beginn meines Masterstudiums eröffnete sich die Möglichkeit, als Laboringenieur im Projekt „flexess“ am elenia tätig zu werden. Diese Position ermöglichte mir, meine IT-Kompetenzen weiter auszubauen und praxisorientiert an Projekten im Bereich der Energiesysteme zu arbeiten.

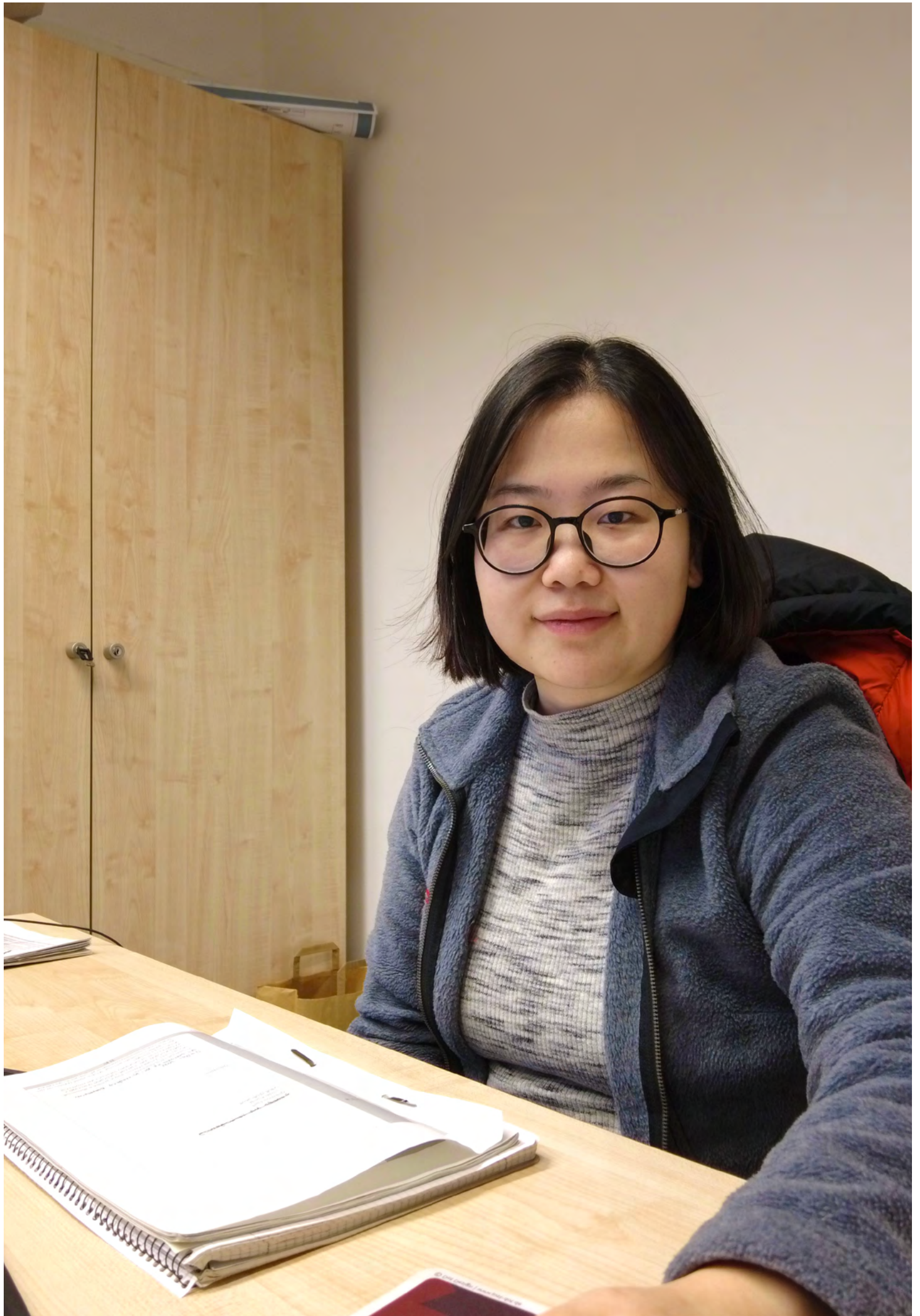
Nach erfolgreichem Abschluss meines Masters ergriff ich die Gelegenheit, als wissenschaftlicher Mitarbeiter (WiMi) im Team e<sup>3</sup> der Arbeitsgruppe Energiesysteme am elenia zu arbeiten. Hier bin ich nun seit einiger Zeit aktiv und widme mich verschiedenen spannenden Projekten im Bereich der Energiesysteme.

Mein Weg vom Abiturienten in Marburg bis zum wissenschaftlichen Mitarbeiter am elenia war geprägt von einer Ausrichtung auf die Energietechnik. Die Kombination aus theoretischem Wissen aus dem Studium und praktischer Erfahrung in verschiedenen Projekten ermöglicht es mir, einen wertvollen Beitrag zur Entwicklung nachhaltiger Energiesysteme zu leisten. Ich freue mich darauf, auch in Zukunft an wegweisenden Projekten mitzuwirken und meinen Beitrag zur Energiewende zu leisten.



Julien Essers





# Fanke Zeng

## Mein Weg vom Studenten zur wissenschaftlichen Mitarbeiterin

### Kurze Einleitung

Im Juni 2019 habe ich mein Bachelorstudium in China abgeschlossen. Darauf folgten die Vorbereitungen für ein Auslandsstudium. Drei Monate später kam ich nach Deutschland und beendete ein halbes Jahr später einen Sprachkurs an der Leibniz Universität Hannover. In dieser Zeit habe ich mich für den Studiengang Elektrotechnik an der TU Braunschweig beworben und im SoSe 2020 offiziell mein Masterstudium begonnen.

### Während meines Masterstudiums

Der Lehrplan in Deutschland unterscheidet sich etwas von dem in China, hinzu kommen die Sprachbarriere und die kulturellen Unterschiede, sodass ich einige Zeit brauchte, um mich daran zu gewöhnen. Nachdem ich mich langsam daran gewöhnt hatte, entschied ich mich für Vorlesungen in Bereichen wie Hochspannung, Gleichstrom und Leistungselektronik. Seitdem hat sich mein Kontakt zum elenia schrittweise verstärkt. Nach der Vorlesung „Electric Power Systems Engineering“ bewarb ich mich bei Melanie, der Betreuerin der Vorlesung, um eine Hiwi-Stelle. In den folgenden Monaten arbeitete ich als Hiwi in zwei Projekten; SE2A (Tobias Kopp) und DC-Industry (Maik Kahn). In dieser Zeit wurde das The-

ma der Abschlussarbeit festgelegt und ich habe Ende letzten Jahres meinen Master abgeschlossen.

### Im Institut

Als ich meine Abschlussarbeit schrieb, begann ich, auf die auf der offiziellen Webseite des Instituts veröffentlichten Stellenausschreibungen zu achten. Als ich die Stelle sah, die mich interessierte, schickte ich sofort meine Bewerbung. Das anschließende Einstellungsgespräch verlief gut und ich wurde Teil vom elenia. Die Atmosphäre im Institut ist sehr harmonisch, jeder hilft jedem. Vom Einreiseverfahren bis zur Visumsbearbeitung verlief alles reibungslos. Dank aller Bemühungen konnten alle Verfahren bis Ende Dezember abgeschlossen werden. Nachdem ich für einen einmonatigen Urlaub nach China zurückgekehrt war, begann ich im Februar 2023 offiziell die Arbeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin.

Jetzt bin ich seit fast einem Jahr im Institut. In diesem Jahr habe ich viele Aufgaben und Bereiche kennengelernt, die für mich völlig neu waren. Ich bin derzeit für das ETHAN-Projekt verantwortlich. In diesem Projekt sind wir für die Entwicklung des elektrischen Systems für Elektroflugzeuge zuständig.



Fanke Zeng

# Schwerpunkt Komponenten





# Leistungsstarke Schaltgeräte und innovative Schutzsysteme für die effiziente Energieversorgung in AC- und DC-Netzen

Im Kontext der Hochschulstrategien Stadt der Zukunft und Mobilität ist der Wandel der Technologien in der Energietechnik ein entscheidender Faktor. Das elenia Institut für Hochspannungstechnik und Energiesysteme der TU Braunschweig leistet einen wesentlichen Beitrag zur Veränderung, indem Methoden zur Entwicklung von Komponenten und deren Integration in Netze entwickelt werden. Diese Methoden sollen den Anforderungen eines flexiblen und umweltfreundlichen Energieübertragungssystems gerecht werden. In unseren Teams werden unterschiedliche Aspekte der Energienetze von der Systemebene bis zu den Bauelementen untersucht. Der Schwerpunkt Komponenten umfasst zwei Teams der Arbeitsgruppe Energietechnologien: Das Team ‚DC und Schaltgeräte‘ sowie das Team ‚Hochspannungs-, Vakuum- und Plasmatechnik‘. Geforscht wird an Betriebsmitteln und Technologien für eine effiziente Energieversorgung in AC- und DC-Systemen.

Die Entwicklung von Schutzsystemen und die Anwendung des ‚Model Based Systems Engineerings‘ bilden die Systemebene.

Des Weiteren werden neue Methoden und Materialien für Isoliersysteme entwickelt und untersucht, beispielsweise neue Materialien und deren Verhalten im Hochvoltbordnetz. Auf Bauteilebene werden Leistungsschalter in allen Spannungsebenen für AC und DC entwickelt, getestet und optimiert. Es werden umweltfreundliche Alternativen zu aktuellen Techniken untersucht, beispielsweise bei SF6-freien Schaltgeräten. Unsere hochmotivierten Teams setzen, abhängig von der jeweiligen Ebene, spezifische Ziele um. Diese Ziele werden in Projekten in Zusammenarbeit mit Partnern aus der Forschung und Industrie realisiert.

## Methoden und Kompetenzen

Unsere Forschung an zuverlässigen Komponenten der Energieversorgung treiben wir mit einer Reihe von vielfältigen Methoden und langjährig gesammelten Kompetenzen voran. So tragen wir durch wissenschaftlich gesicherte Grundlagen zu neuen Erkenntnissen bei.

Bei der Planung zukünftiger Energieversorgungsnetze kommt unsere Toolbox zur Netzplanung zum Einsatz. Mit erprob-

ten Bewertungs- und Auswahlstrategien kann die beste Topologie der zukünftigen Netze gefunden werden, bei der alle Interessen berücksichtigt werden. Die Methode Systems Engineering bietet durch die frühzeitige Einbeziehung aller Interessen Vorteile bei der Entwicklung des passenden Netzes. Validierungs- und Verifikationsschleifen führen zur Berücksichtigung aller Anforderungen.

Unsere Erfahrung mit DC-Netzen bei niedrigen Betriebsspannungen hilft bei der Skalierung zu hohen Betriebsspannungen. Mithilfe von Power-Hardware-in-the-Loop-Systemen lassen sich auch größere und komplexere Systeme im Labor nachbilden und somit untersuchen. Bei der Fehlerbehandlung in DC-Netzen werden KI-basierte Fehlererkennungsmethoden angewendet, die eine sichere und frühzeitige Erkennung von Fehlern gewährleisten. Auf diese Weise entstehen durch die intelligente Verknüpfung vielschichtige und funktionale Schutzsysteme. Unsere langjährige Erfahrung mit Überspannungsschutz und Blitzstromableitern fließt somit in die Schutzsysteme für zukünftige DC-Netze ein.

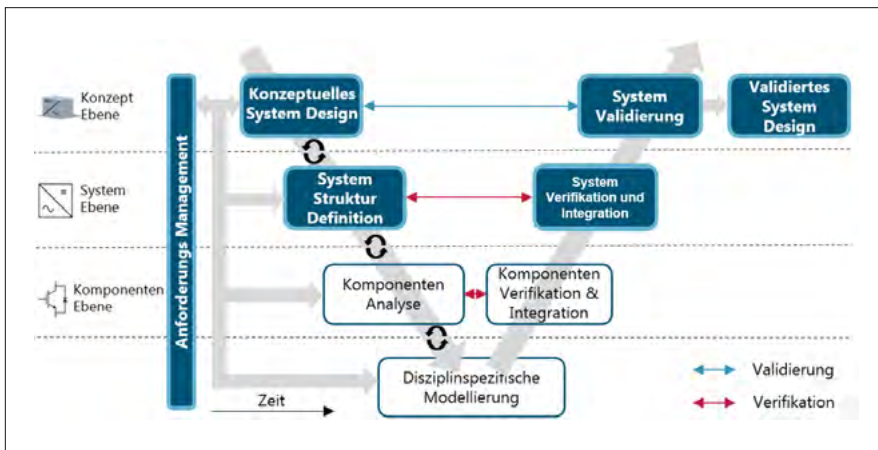


Abbildung 1: V-Modell, In Anlehnung an Melanie Hoffmann, Dissertation

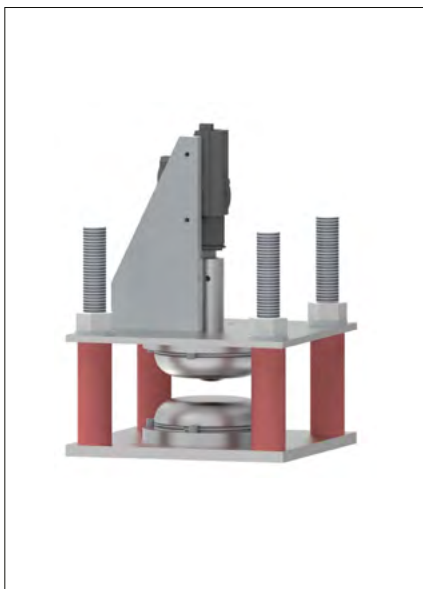


Abbildung 2: Modellschalter, Dirk Bösche, Dissertation

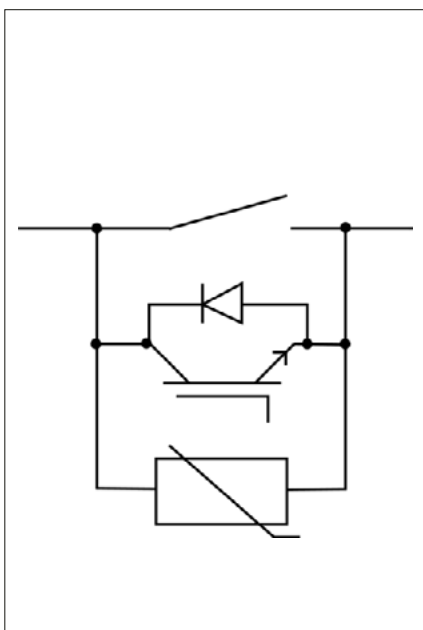


Abbildung 3: Hybridschaltgerät, Patrick Vieth

Für nachhaltige Hochspannungssysteme trägt unsere Forschung an Leistungsschaltgeräten mit klimafreundlichen Schalt- und Isoliergasen bei. Besonders die Plasmacharakterisierung während des Ausschaltprozesses und die Analyse des Plasma-verhaltens nach Stromnull mit optischer Kamerabeobachtung liefern Grundlagen der physikalischen Prozesse. Die automatisierte Auswertung von Kamerabildern des Metalldampfbogenplasmas im Vakuum-Leistungsschalter ermöglicht die Bogenerkennung und Analyse der Rotation des Vakuumbogens.

Für den Einsatz in höheren Spannungsebenen sind modulare Schaltgeräte eine Möglichkeit den Anforderungen der elektrischen Festigkeit zu begegnen. Diese Ansätze unterstützen wir mit Simulationen und Modellbildung. Die Steuerung von nicht definierten Potentialen liegt dabei vielfach im Fokus.

Für die Anforderungen der Elektromobilität ist die Isolierstoffcharakterisierung moderner Werkstoffe wichtig, um die Anforderungen der Isolation von Batteriesystemen und Bordnetzen mit steigenden Schaltgeschwindigkeiten zu erfüllen. Die Möglichkeiten, die die additive Festigung bietet, begleiten wir mit der systematischen Untersuchung verschiedenster gedruckter Isolierstoffe.

### DC-Systeme

Die Verwendung von Gleichstrom in Verteilnetzen erlaubt eine Effizienzsteigerung durch den Wegfall von DC/AC- und AC/DC-Umwandlungsverlusten, stellt das Schutzsystem allerdings auch vor neue Herausforderungen. Fehlerströme steigen aufgrund der geringeren Netzinduktivität schneller

an und verlöschen, anders als bei Wechselstrom, aufgrund des fehlenden Nulldurchgangs nicht.

Zum Entwurf eines passenden DC-Schutzsystems ist eine Anforderungsanalyse unerlässlich. Methodisch dient das Systems Engineering als ganzheitlicher Entwicklungsansatz, bei dem alle Stakeholder im Rahmen der Anforderungsanalyse einbezogen werden. Es entstehen abgestimmte Konzepte als Grundlage für die Auslegung der Teilsysteme und deren Zusammenwirken als Gesamtsystem. Ein zentraler Teil der Anforderungsanalyse stellen detaillierte Netzsimulationen (MATLAB Simulink) dar, die einen Kriterienkatalog zur Abgrenzung der zulässigen Betriebsbedingungen vom Fehlerfall für die verwendeten Netzparameter liefern.

Am elenia werden moderne Schutzsysteme für Industrieanwendungen, die Luftfahrt und Privathaushalte entwickelt. Durch den Aufbau moderner Laboreinrichtungen ist es uns möglich, Schutzsysteme bis in den Mittelspannungsbereich von 3000 V zu testen und untersuchen. Weiterhin stehen PHIL Einrichtungen zur Verfügung, welche zukünftig weiter ausgebaut werden.

Ein vielversprechendes Schutzkonzept ist die Verwendung von stromlimitierender Leistungselektronik (schalterloses Schutzkonzept), das sich besonders durch hohe Geschwindigkeit und Robustheit auszeichnet. Außerdem können klassisch Schaltgeräte zur Fehlerklärung verwendet werden. Die veränderten Netze im Vergleich zu AC führen auch zu höheren Anforderungen an DC Schaltgeräte. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, werden am elenia in Kooperation mit Projektpartnern und im Rahmen von Dissertationen Schaltgeräte entwickelt. Der Fokus liegt dabei im Besonderen auf Mechanischen Schaltgeräten und Hybridschaltgeräten. Neben der Entwicklung wird auch untersucht, wie bestehende Schaltgeräte optimiert werden können. Hier sind insbesondere die Wiederverfestigungsuntersuchungen an Hybridschaltgeräten im Rahmen von Dissertationen zu nennen. Dafür wurden moderne Prüffelder aufgebaut. Zum einen können in unseren Prüffeldern Industrienetze nachgebildet werden und Schutzsysteme untersucht werden. In einem extra für Schaltgerätetests aufgebauten Prüffeld können Schaltgeräte unter Kurzschlussbedingungen mit bis zu 15 MW getestet werden.

Insgesamt können über die Prüfeinrichtungen und Kompetenzen im DC-Team die Schutzeinrichtungen für DC-Netze systematisch entwickelt, aufgebaut und getestet werden.

### Hochspannungstechnik

Die Novellierung der F-Gas-Verordnung der EU und das diskutierte PFAS-Verbot ziehen eine Vermeidung des Einsatzes von Schwefelhexafluorid (SF6) als Isolier- und Schaltgas in der Hochspannungstechnik nach sich. Dies ist wichtig für das Ziel, die Treibhausgasemissionen aus der Energieerzeugung und -verteilung zu reduzieren. Dadurch ergibt sich ein hoher Forschungs- und Entwicklungsbedarf an klimaneutralen Schalt- und Isoliersystemen für die Hochspannungsnetze. Das Team HVP erforscht alternative Gase, die fluorgasfrei und klimafreundlich sind. Hierbei steht die Durchschlagsfestigkeit der unterschiedlichen Gase bei verschiedenen Drücken, Elektrodenabständen und Elektrodenoberflächen im Mittelpunkt. So soll festgestellt werden, welches die beste Alternative für einen fluorgasfreien Leistungsschalter ist. Neben den Isoliereigenschaften der Gase ist für erfolgreiche Stromlöschung im Schaltgerät auch die thermische Löschfähigkeit wichtig. Dazu werden Untersuchungen zur Hochstrombelastung und die Untersuchung der anschließenden Wiederverfestigung durchgeführt.

Insbesondere vakuumisolierte Schaltanlagen sind aufgrund ihrer Klimaneutralität und Ungiftigkeit geeignet, SF6-Schalter zu ersetzen. Vakuumleistungsschalter (VCB) sind seit Jahrzehnten in Mittelspannungsanlagen etabliert, für Hochspannungsanwendungen wird derzeit intensiv geforscht. Die veränderten Kurzschlussströme und größere Schalthübe werden genauso untersucht wie die Spannungsfestigkeit der Vakuumisolation. Aufgrund des degressiven Verlaufs der Spannungsfestigkeit des Vakuums werden bei hohen Spannungen Mehrfachunterbrechungen eingesetzt. Als höchste im Netz auftretende Spannung ist die Blitzstoßspannung (LIV) entscheidend für die Untersuchung der Spannungsfestigkeit.

Im Rahmen der Mobilitätswende liefern wir mit der Charakterisierung neuer Isoliermedien einen wichtigen Beitrag. Die höherwerdenden Bordnetz-Spannungen und zunehmend hohen Schaltgeschwin-

digkeiten der Halbleiter wandeln die Anforderungen an die verwendeten Isolierstoffe. So müssen neue nachhaltig produzierte Isolierstoffe über die gesamte Lebensdauer und einen weiten Frequenzbereich charakterisiert werden. Neben den Eigenschaften einzelner Isolierstoffe ist die Untersuchung des gesamten Isoliersystems mit Teilentladungs-Diagnostik wichtig, da für ein robustes Isoliersystem jede Komponente genau untersucht werden muss.

Für die Sicherheit der Komponenten und Netze ist in Schaltgeräten eine erfolgreiche Kontrolle des Schaltplasmas essentiell. Die dafür notwendigen Plasmaeigenschaften werden am elenia simulativ und experimentell untersucht. Mit diversen Modell-Komponenten wie Ableitern für den Blitzschutz, DC-Hybridschaltern und Leistungsschaltern, die die optische Untersuchung der Plasmen ermöglichen, wird das Plasma sowohl in der Hochstromphase als auch bei der Wiederverfestigung untersucht. Die detaillierten Simulations- und Messdaten werden zur Modellbildung herangezogen.



Abbildung 6: Isoliersystem für die Elektromobilität, Maik Kahn



Abbildung 4: SF6-freie Schaltgeräte, Laura Tiedemann

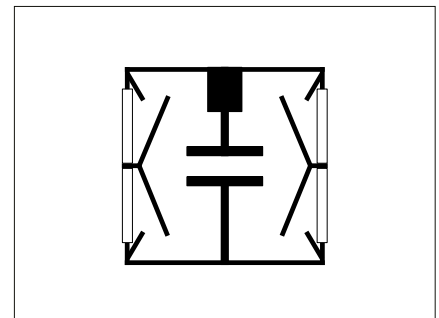


Abbildung 5: schematischer Aufbau Vakuum-Leistungsschalter, Karen Flügel

#### SCHWERPUNKTNAMEN

##### Schwerpunkt Komponenten

#### SCHWERPUNKT-MENTOR

##### Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat

✉ m.kurrat@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391 7735

#### DC SYSTEME UND SCHALTGERÄTE

##### Patrick Vieth, M.Sc.

✉ p.vieth@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391 9725

#### HOCHSPANNUNGS-, VAKUUM- UND PLASMATECHNIK

##### Karen Flügel, M.Sc.

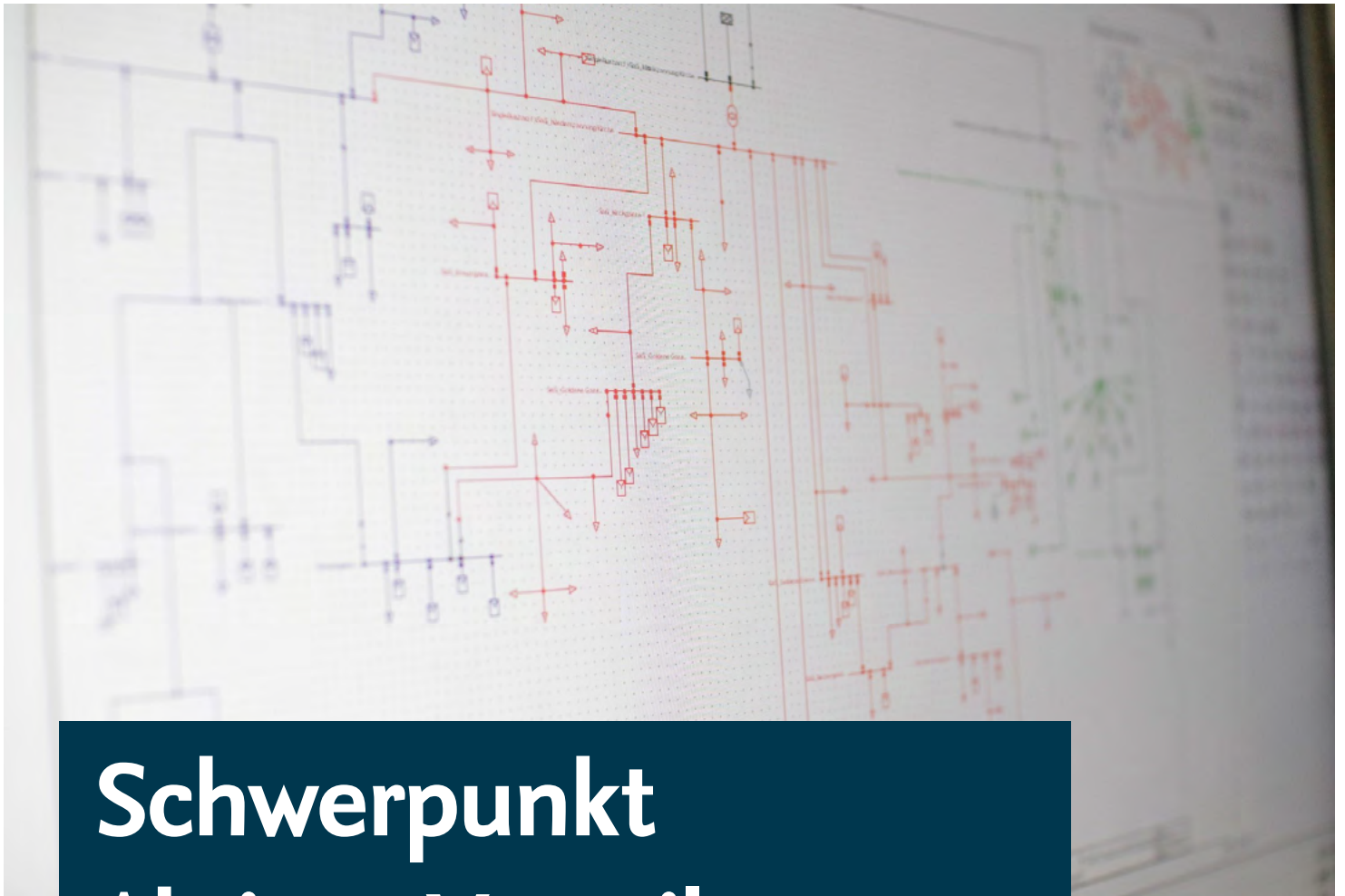
✉ k.fluegel@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391 7785

#### WEBSEITE

<https://www.tu-braunschweig.de/elenia/forschung/komponenten-der-energieversorgung>





# Schwerpunkt Aktives Verteilernetz

# Innovative technische und wirtschaftliche Lösungen zum stabilen Netzbetrieb und zur Flexibilisierung

Die Energiewende steht vor einer Vielzahl aufregender Herausforderungen, die uns in den Bereichen Netzintegration, Netztechnik sowie Energiemanagement und -wirtschaft vor spannende Aufgaben stellen. Doch aus heutiger Perspektive können wir einen absoluten Game Changer für den Erfolg der Energiewende erkennen – das intelligente Stromnetz! Hier werden Verbraucher, Erzeuger, Speicher und Netzbetriebsmittel effektiv miteinander vernetzt und gesteuert.

Bei uns im elenia Institut für Hochspannungstechnik und Energiesysteme an der TU Braunschweig, leisten wir einen entscheidenden Beitrag zur Zukunft der Energiewende. Wir setzen einen Schwerpunkt auf das Aktive Verteilernetz, einem zentralen Forschungsfeld, das eine Fülle von Themen zur zukünftigen Rolle des Verteilernetzes und des Netzbetreibers behandelt. Hier schlagen wir Brücken zwischen technischen Innovationen, neuartigen Konzepten zur Betriebsführung des Verteilernetzes und zugehörige wirtschaftlichen Überlegungen.

Dank unserer intensiven Arbeit gestaltet das elenia Institut aktiv die Energiewende mit und entwickelt kluge Gesamtkonzepte, die das zukünftige regenerative Energiesystem in die richtige Richtung lenken. Unsere Austauschformate im Schwerpunkt Aktives Verteilernetz sind in hochspezialisierte Forschungsbereiche unterteilt, die sich

den komplexen Fragen unserer Zeit widmen. Gemeinsam setzen wir uns für eine Beschleunigung der Energiewende ein!

## Netzdynamik und Systemstabilität

Das Team „Netzdynamik und Systemstabilität“ besteht aus sechs wissenschaftlichen Mitarbeiter\*innen und drei Laboringenieur\*innen, die sich mit der netzdienlichen Integration von erneuerbaren Energien zur Wahrung der zukünftigen transienten Netzstabilität befassen. Forschungsschwerpunkt ist das elektrische Verhalten von Erzeugern und Lasten bei transienten Netzereignissen wie z. B. Störungen des Wirkleistungsgleichgewichts oder Netzfehlern. Hierzu werden unterschiedliche Regelungsstrategien (Grid-Forming & Grid-Following) von Stromrichtern und Primärenergiequellen untersucht und innovative Reglungsmechanismen entworfen. Die Kernbereiche sind hierbei die Bereitstellung von Momentanreserve und weiteren hochdynamischen Frequenzhaltungsmechanismen sowie der Beitrag zum Kurzschlussstrom und Short Circuit Ratio aus erneuerbaren Energien. Zudem wird die passive und aktive Inselnetzerkennung von netzbildenden und netzfolgenden Stromrichtern erforscht.

So wird beispielsweise untersucht, wie der flächendeckende Einsatz von netzbildenden Stromrichtern im Verteilernetz

realisiert werden kann, wie Prosumer Momentanreserve bereitstellen, und wie Großbatterien netzbildend geregelt werden können. Zudem wird erforscht, wie Elektrolyseure und innovative Pumpspeicherkraftwerke netzdienlich integriert werden können und welche metrologischen Anforderungen an Stromrichter zur Bereitstellung von Momentanreserve für eine Zertifizierung bestehen.

Im institutseigenen Netzdynamiklabor können mit Hilfe von freiprogrammierbaren und marktüblichen Stromrichtern, einer automatisierten Netznachbildung, diversen Lasten und einem Power HiL-System verschiedenste Netzkomponenten nachgebildet und deren Interaktion und das elektrische Verhalten bei Netzstörereignissen untersucht sowie simulative Ergebnisse validiert werden.



Abbildung 1: Messsysteme und Echtzeitfähige HiL-Systeme, Foto: TU Braunschweig, Henrik Herr

### Netzbetrieb und Netzplanung

Die Forschung im Netzbetrieb und der Netzplanung hat seinen Fokus auf dem Blindleistungsmanagement und der Spannungsqualität.

Der Bereich der Spannungshaltung umfasst die dezentrale Blindleistungsbereitstellung von einzelnen PV-Anlagen oder Elektrofahrzeugen auf Basis von Netzanschlussbedingungen zur lokalen Spannungshaltung bis hin zu einem aktiven spannungsebenen- und netzbetreiberübergreifenden Blindleistungsmanagement. Es wurde bereits gezeigt, dass EEA eine Alternative und Ergänzung zur Errichtung von Blindleistungskompensationsanlagen im Blindleistungsmanagement darstellen. Dies kann auch volkswirtschaftliche Vorteile ergeben. Im Projekt Q-Integral wurden wichtige Fragestellungen des zukünftigen Blindleistungsmanagements in Verteilungs- und Übertragungsnetzen beantwortet. Das Folgeprojekt Q-Real umfasst das Blindleistungsmanagement in der realen Anwendung: Netzplanung, Netzbetrieb und Blindleistungsquellen für Übertragungs- und Verteilnetze.

Im Bereich der Spannungsqualität untersuchte das Team die Auswirkungen ansteigender Durchdringungen von PV-Systemen, Elektrofahrzeugen, Heimspeichersystemen



Abbildung 2: Ladeinfrastruktur für Vermessungen von Elektrofahrzeugen, Foto: TU Braunschweig, Henrik Herr

und Power-to-Heat-Anlagen auf Spannungsqualitätsmerkmale im Niederspannungsnetz. Auf Basis von Labormessungen und Feldmessungen wurden wichtige Erkenntnisse erarbeitet. Zudem werden Regelungen entwickelt, um die Spannungs-

qualität im Niederspannungsnetz auch bei steigender Zahl von leistungselektronischen Komponenten zu erhalten.

### Energiemanagement und Energiewirtschaft

Das Team „Energiewirtschaft und Energiemanagement“ besteht aus 11 wissenschaftlichen Mitarbeitern und drei Laboringenieuren, die sich mit der wirtschaftlich und technisch optimalen Integration von Erneuerbaren Energien in das heutige und zukünftige Energiesystem befassen. Kernpunkt der Forschung ist die Erstellung und Untersuchung von innovativen Betriebsstrategien für Energiemanagementsysteme sowie die Entwicklung von zukünftigen Geschäfts- und Marktmodellen im Kontext einer regenerativ geprägten Stromerzeugung. So wird zum Beispiel untersucht, inwiefern Erzeuger, Verbraucher und Speicher Systemdienstleistungen für das Netz, z. B. in Form von Flexibilitäten, bereitstellen können und wie diese vermarktet werden können. Durch computergestützte Simulationen, Labor- und Feldversuchen können verschiedene Markt-, Integrationskonzepte und Betriebsstrategien abgebildet und bewertet werden. Die Praktiken der Energiesystemmodellierung finden Anwendung in der Entwicklung vieler verschiedener Tools zur Energiesystemanalyse und bilden zugleich die Grundlage vieler Forschungsprojekte, wodurch eine projektübergreifende Zusammenarbeit im elenia Institut ermöglicht wird. Die Energiesystemmodellierung umfasst hierbei ein breites Spektrum, z. B. Co-Simulationen und HiL-Tests im quasidynamischen Zeitbereich.

Im institutseigenen Energiemanagementlabor können mit Hilfe einer Wärmepumpe, Ladesäulen, variabel einstellbaren Lasten und Generatoren sowie Batteriespeichern voll-flexibler Prosumer abgebildet und konzeptionierte Energiemanagementstrategien auf Herz und Niere überprüft werden. Darüber hinaus werden Feldmesskampagnen durchgeführt, die Aufschlüsse über aktuelle Stromverbräuche und -Erzeuger geben sowie im Labor entwickelte Strategien in Feldtests validiert.



Abbildung 3: Verschiedene Komponenten für Laborversuche, Foto: TU Braunschweig, Jonathan Ries

#### SCHWERPUNKTNAME

#### Schwerpunkt Aktives Verteilnetz

#### SCHWERPUNKT-MENTOR

#### Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel

✉ bernd.engel@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391 7740

#### NETZDYNAMIK UND SYSTEMSTABILITÄT

#### Timo Sauer, M.Sc.

✉ t.sauer@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391 7721

#### NETZBETRIEB UND NETZPLANUNG

#### Gian-Luca Di Modica, M.Sc.

✉ g.di-modica@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391 7704

#### ENERGIEWIRTSCHAFT UND ENERGIEMANAGEMENT

#### Henrik Wagner, M.Sc.

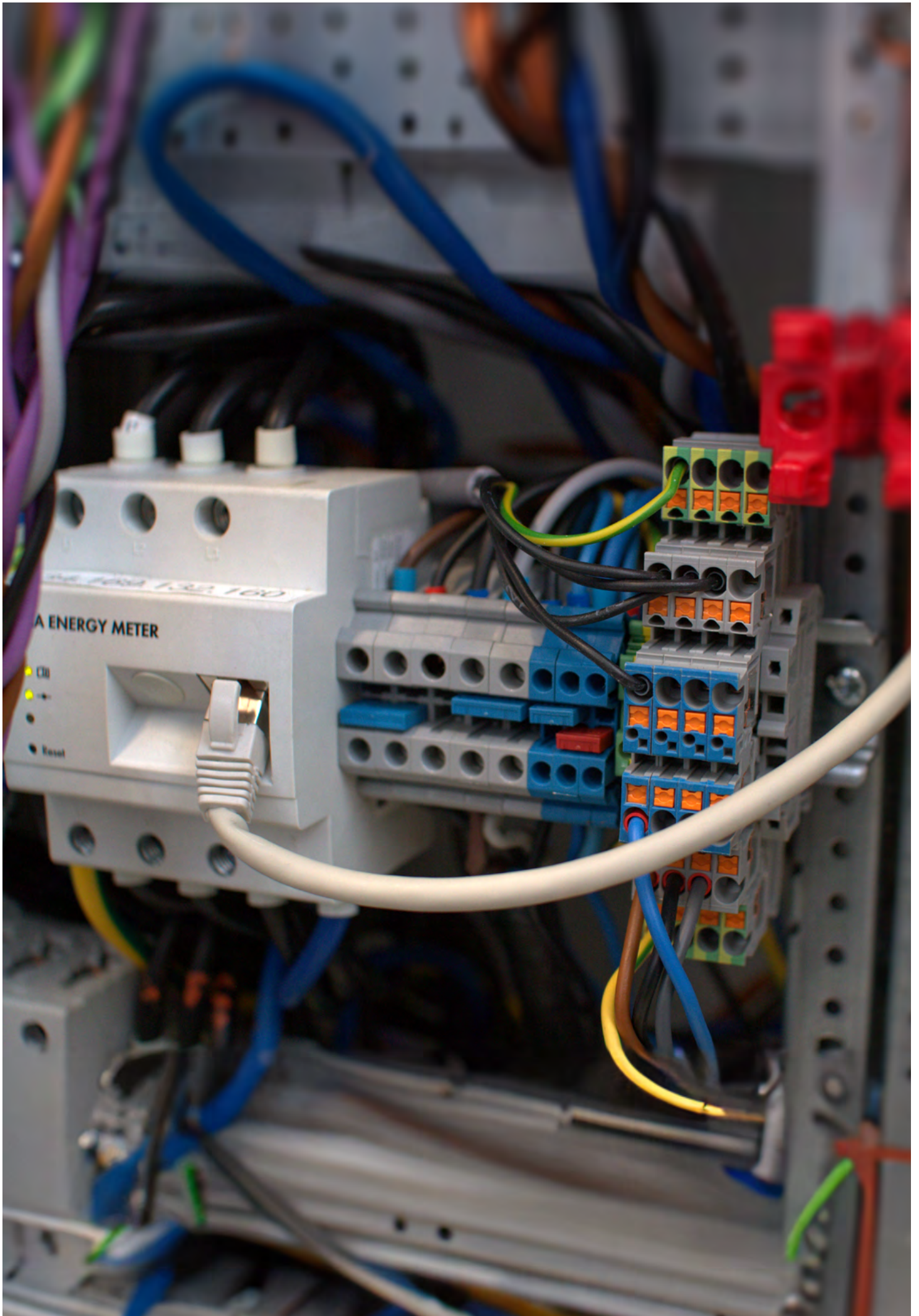
✉ henrik.wagner@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391 9718

#### WEBSEITE

<https://www.tu-braunschweig.de/elenia/forschung/aktives-verteilnetz>





# Schwerpunkt Elektromobilität





# Netz- und Systemintegration von batterieelektrischen Fahrzeugen und Batterietechnik

Im Rahmen des Strategieprozesses der TU Braunschweig hat sich die Mobilität als ein zentraler Schwerpunkt herauskristallisiert. Dieser Fokus auf Mobilität wird durch die erstmalige Einführung des Masterstudiengangs „Elektromobilität“ im Wintersemester 2014/2015 besonders betont. Das elenia ist aktiv in die Umsetzung dieses Studiengangs durch eine Vielzahl von Vorlesungen involviert. Darüber hinaus ist das elenia in interdisziplinären Forschungsprojekten zur Elektromobilitätsforschung aktiv eingebunden, dank der Forschungsinfrastruktur des Niedersächsischen Forschungszentrums Fahrzeugtechnik (NFF) und der Battery LabFactory Braunschweig (BLB). Unsere Expertise erstreckt sich hierbei insbesondere auf die Bereiche System- und Netzintegration von Elektrofahrzeugen sowie Batterietechnik.

## Netz- und Systemintegration

Die Elektromobilität nimmt in Deutschland zunehmend an Fahrt auf. 470.559 batterieelektrische Fahrzeuge und 362.093 Plug-in Hybride wurden im Jahr 2022 neu zugelassen. Die Gesamtanzahl betrug dadurch am 1. Januar 2023 1.013.009 für batterieelektrische Fahrzeuge und 864.712 für Plug-in Hybride. Die Entwicklung der Zahlen ist exponentiell. Daher beschäftigen wir uns am elenia intensiv mit einer breiten Palette von Fragestellungen, die im Zusammenhang mit der künftigen Integration von Elektrofahrzeugen in das Stromnetz sowie ihrer

aktiven Rolle auftreten. Diese Themen sind besonders im Team für Netzbetrieb und Netzplanung vertreten. Im Rahmen des Forschungsprojekts *LISA4CL Laden – induktiv, schnell, autonom für City Logistik* werden Konzepte für ein netz- und erzeugungsorientiertes Laden von Elektrofahrzeugen entwickelt und eingehend untersucht. Im Projekt Netflexum, das im September 2022 startete, wird unter anderem das bidirektionale Laden untersucht. Darüber hinaus wird das Elektrofahrzeug im Team Energiewirtschaft und Energiemanagement als eine wichtige Komponente in umfassenden Gesamtsystembetrachtungen berücksichtigt.

Das Forschungsfeld der Netzintegration erstreckt sich von grundlegenden Netzanalysen bis hin zu netzdienlichen Ladekonzepten. Im elenia führen wir vor allem Simulationen durch, um die Aufnahmefähigkeit von Niederspannungsnetzen für Elektrofahrzeuge zu untersuchen. Dabei verfügen wir über umfangreiche Erfahrungen in Bezug auf Ladeverhalten und den Energiebedarf in verschiedenen Szenarien. Auf dieser Grundlage arbeiten wir an der Weiterentwicklung von Ansätzen zur Minimierung der Auswirkungen von Ladevorgängen auf das Energieversorgungsnetz, die bereits in der Vergangenheit entwickelt wurden.

Neben der Netzintegration von Elektrofahrzeugen konzentrieren wir uns am elenia auch auf die Entwicklung von erzeugungsorientierten Ladealgorithmen, die darauf abzielen, den Energieverbrauch basierend

auf dezentraler Energieerzeugung zu steuern. Elektrofahrzeuge eignen sich hierfür besonders gut, da sie als große Verbraucher über erhebliches Potenzial zur Flexibilität verfügen. Diese entwickelten Algorithmen werden in Simulationen, im Labor und in realen Fahrzeugtests erprobt und validiert.

Die Kommunikation zwischen Elektrofahrzeugen, Ladeinfrastruktur und einem übergeordneten Backend spielt eine entscheidende Rolle bei der Integration von Elektrofahrzeugen in Netz- und Energiesysteme. Diese Kommunikation ist beispielsweise für die Steuerung der Ladeleistung zur Unterstützung des Netzbedarfs oder für die Umsetzung von Ladeplänen im Rahmen erzeugungsorientierter Ladevorgänge von großer Bedeutung. Abbildung 1 zeigt die Kommunikationsinfrastruktur einer Laborladesäule des elenia.



Abbildung 1: Kommunikationsinfrastruktur für eine Labor-DC-Ladesäule, Foto: TU Braunschweig, Henrik Herr



Abbildung 2: Vermessung von Elektrofahrzeugen an elenia-Ladepunkten, Foto: TU Braunschweig, Gian-Luca Di Modica

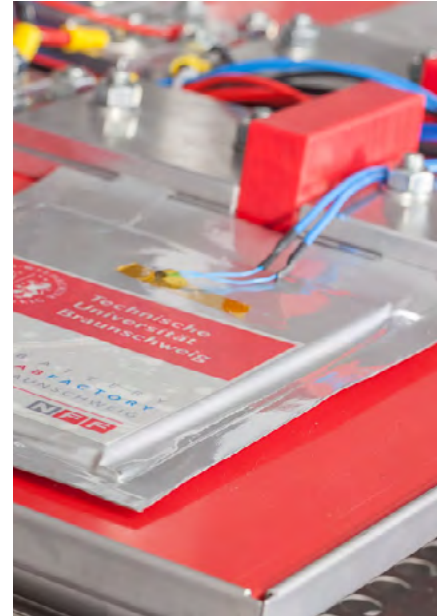


Abbildung 3: Batteriezeile aus BLB Produktion im elenia Zelltester, Foto: TU Braunschweig

Für unsere Forschungsarbeiten im Bereich Elektromobilität und den damit verbundenen netzbezogenen Fragestellungen verfügt das elenia über eine umfassende Infrastruktur. Neben unseren Laboreinrichtungen stehen uns mehrere Ladesäulen zur Verfügung, die über eine Kopplung in die Laborinfrastruktur integriert werden können. Abbildung 2 zeigt beispielhaft die Nutzung der Ladesäulen im Rahmen einer Vermessung.

### Batterietechnik

Ein wichtiges Forschungszentrum für die Batterietechnik am elenia stellt die BLB dar. Das Forschungsspektrum umfasst den gesamten Wertschöpfungskreislauf von der Material- und Elektrodenherstellung über die Zellfertigung bis hin zur Systemintegration und zum Recycling zur Schließung des Materialkreislaufes (vgl. Abb. 4). Die BLB bündelt die Kompetenzen von 9 Instituten der TU Braunschweig, der TU Clausthal, der Leibniz Universität Hannover, des Fraunhofer Instituts für Schicht- und Oberflächentechnik IST sowie der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt Braunschweig

(PTB). Diese Zusammenarbeit eines transdisziplinären Konsortiums in einem Joint Lab ist einzigartig in der deutschen Forschungslandschaft.

Als aktives Mitglied der BLB und hauptverantwortliches Institut für die Formierung, Alterung und Charakterisierung forschen wir am elenia an entsprechenden Fragestellungen und erweitern unsere Expertise. In Zusammenarbeit mit der PTB sind Forschungsaktivitäten im Bereich der Alterungsuntersuchungen an Batteriemodulen sowie elektrische und thermische Sicherheitstests im Fokus. Das Team Batterietechnik beschäftigt sich mit einem breiten Spektrum an Forschungsthemen auf Zell- sowie Modulebene. Die erzielten Forschungsergebnisse fließen als aktuelle Inhalte in die Mitgestaltung der Lehre ein. Die Forschungsfelder lassen sich in vier Bereiche kategorisieren: Batterieformierung, Batteriediagnose- und sicherheit, Batterieentzug- und alterung, Batteriediagnose- und sicherheit sowie Second Life und Recycling.

Innerhalb der Produktionskette von Batteriezellen repräsentiert die Formie-

rung den Flaschenhals eben dieser, da der Schritt zeit – und damit kostenintensiv ist. Die Formierung bezeichnet den finalen Produktionsschritt und dient der elektrischen Aktivierung der Batteriezellen. Aktuelle Forschungsarbeiten im Projekt FormEL beschäftigen sich mit der modellgestützten sowie experimentellen Optimierung der Formierung, der Identifikation von sensitiven Einflussparametern und der Ermittlung von Quality Gates zur Bewertung der Zellqualität.

Ein vielseitiges und übergeordnetes Forschungsfeld stellt die Batteriediagnose und -sicherheit dar. In den Batterielaboren werden verschiedene messtechnische Untersuchungen an Batteriemodulen und -zellen durchgeführt, um die Qualität sowie den Zustand kenngrößenbasiert zu bewerten. So werden u. a. die elektrischen Eigenschaften durch Belastung mit verschiedenen Strom- und Spannungsprofilen sowie die energetischen Eigenschaften durch konstante Strombelastung ermittelt. Mittels Strom-, Innenwiderstands- und Impedanzmessungen kann die elektrische Leistungsfähigkeit sowie der Batteriezu-

stand bestimmt werden. Im Projekt PolySafe werden innovative Stromkollektoren mit Schmelzsicherung in den Batteriezellen verbaut, die bei interne Zellkurzschlüssen auslösen, sodass ein thermisches Durchgehen verhindert wird.

Nach der Formierung und damit dem BoL (Begin of Life) der Batterien werden experimentelle Langzeitzyklisierungen durchgeführt, um die elektrochemische Performance der Zellen im Betrieb zu charakterisieren und Rückschlüsse auf Alterungsmechanismen zu schließen. Ziel im Forschungsprojekt FastChargeLongLife ist

eine alterungsadaptive Schnellladestrategie zu entwickeln, die den Batteriezellen gleichzeitig eine lange Lebensdauer zusichert.

Das Graduiertenkolleg CircularLIB untersucht skalierbare, wirtschaftlich effiziente und ökologisch nachhaltige Prozesstechnologien entlang des Material- und Produktionskreislaufes von Batterien. Ziel ist es entlang des gesamten Materialkreislaufes Methoden zur Wiedergewinnung und Wiederverwendung der Materialien zu entwickeln, was einen geschlossenen Kreislauf ermöglichen soll.



Abbildung 4: Einordnung der Batterietechnik-Forschungsprojekte des elenias in verschiedene Forschungsfelder

SCHWERPUNKTNAMEN

**Schwerpunkt Elektromobilität**

SCHWERPUNKT-MENTOR

**Dr.-Ing. Frank Lienesch (PTB)**

✉ Frank.Lienesch@ptb.de

☎ +49 531 - 592 9090

NETZ- UND SYSTEMINTEGRATION

**Gian-Luca Di Modica, M.Sc.**

✉ g.di-modica@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391 7704

BATTERIETECHNIK

**Oliver Landrath**

✉ o.landrath@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391 7742

WEBSEITE

<https://www.tu-braunschweig.de/elenia/forschung/elektromobilitaet>





# Forschungsberichte

<b>AG-Kooperation</b> .....	38
NetFlexum .....	38
SiNED: Schutzsysteme in Verteilnetzen .....	42
SiNED: Netzdienliche Prosumer-Haushalte .....	44
<b>Batterietechnik</b> .....	46
Adaptive Schnellladestrategien .....	46
Neueste Entwicklungen im Bereich Batteriesicherheit und Recycling .....	48
InForm (Cluster InZePro) .....	50
<b>DC Systeme und Schaltgeräte</b> .....	52
Smart Modular Switchgear II .....	52
Elektrisches Flugzeug .....	54
Hochspannungsleistungsschalter der Zukunft .....	56
<b>Hochspannungs-, Vakuum-, &amp; Plasmatechnik</b> .....	58
Grundlagenforschung an Vakuum-Leistungsschaltern für zukünftige Anlagen .....	58
Isolierstofftechnik .....	60
<b>Energiewirtschaft und Energiemanagement</b> .....	62
flexess – Flexibilisierung des Energiesystems .....	62
Intelligente Lösungen für MFH mit Energiespeichern .....	64
Zukunftslabor Energie .....	66
KEMAL .....	68
Energy-4-Agri .....	70
MozuBi .....	72
Marktgestützte Beschaffung von Momentanreserve .....	74
Batteriespeicher Kompatibilitätstest .....	75
<b>Netzplanung und Netzbetrieb</b> .....	76
Forschungsprojekt LISA4CL .....	76
Forschungsprojekt U-Quality .....	78
Blindleistungsmanagement .....	80
Vergütung von Blindleistung im Übertragungsnetz .....	82
<b>Netzdynamik und Systemstabilität</b> .....	84
ALPHEUS – Innovatives Pumpspeicherkraftwerk .....	84
H <sub>2</sub> Terminal Braunschweig .....	86
Netzregelung 2.0 .....	88
MetroSDL .....	90
Grid Forming Seminar .....	92



## NetFlexum

### Neue Möglichkeiten zur Erbringung von Systemdienstleistungen durch netzdienliche Prosumersysteme

#### Motivation & Ziele des Vorhabens

Aufgrund der Klimakrise und der damit verbundenen Energiewende befindet sich das Energienetz im Wandel. Durch den Ausstieg der Atom- und Kohlekraftwerke entfällt deren Beitrag zu den Systemdienstleistungen (SDL). Diese werden in Zukunft von erneuerbaren Energien gedeckt. Durch den Wegfall der Synchrongeneratoren der Kraftwerke entfällt die von diesen Generatoren bereitgestellte Trägheit in der Übertragungsnetzebene. Diese sogenannte

Momentanreserve ist ein Teil der Frequenzhaltung und trägt zur Systemstabilität bei. Um weiterhin Stabilität gewährleisten zu können, sollen die stark zunehmenden Erzeuger in der Niederspannungsebene genutzt werden. Diese können unter anderem durch netzbildende Wechselrichter zur Frequenzhaltung beitragen. In einem zukünftigen Energienetz werden netzbildende Wechselrichter in Kombination mit netzfolgenden Wechselrichtern eingesetzt, wie in Abbildung 1 zu erkennen ist.

Das Gesamtziel des Projekts ist es, zur sicheren und erfolgreichen Einführung von netzbildenden Wechselrichtern in Prosumer-Haushalten beizutragen und somit an Lösungen für mehr Netzdienlichkeit, Flexibilität und Wirtschaftlichkeit von Prosumer-Haushalten zu arbeiten. Die Anbindung der erneuerbaren Energiequellen und Speichersysteme soll hierbei an ein hauseigenes Gleichstromnetz erfolgen. Das Projekt wird in Zusammenarbeit mit dem IMAB, der PTB, Temes und SMA bearbeitet. Die

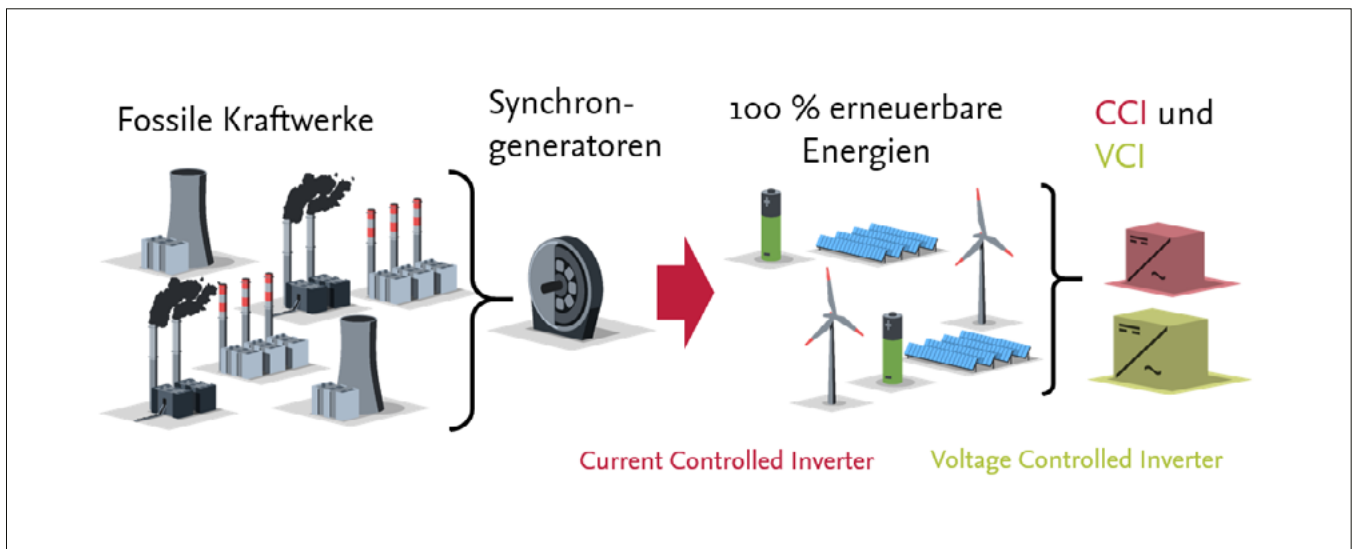


Abbildung 1: Entwicklung des Energienetzes

Teilvorhaben der TU Braunschweig befassen sich mit der Bereitstellung nicht-frequenzgebundener SDL (z. B. Momentanreservebereitstellung und dynamischer Blindstromeinspeisung) und mit dem Schutz des Gleichstromnetzes.

### Prosumer -Typhaushalte und EMS-Betriebsstrategien

Zunächst sollen im Rahmen des Projekts Betriebsstrategien für ein Energy Management System (EMS) erstellt werden. Diese haben das Ziel, zur Frequenzhaltung beizutragen. Es handelt sich dabei beispielsweise um eine priorisierte Reihenfolge des Einsatzes der Prosumer-Komponenten zur Bereitstellung von Flexibilität. Daran angeknüpft werden verschiedene Typhaushalte erstellt. Hierbei werden typische Anlagenausstattungen für Prosumer identifiziert und für diese Haushalte Last-Zeitreihen erstellt, um im Anschluss Abschätzungen darüber zu treffen, was diese für einen Beitrag zur Frequenzhaltung haben können. Dies wird zunächst anhand von Simulationen ermittelt. Zusätzlich wird auch das Elektroauto als Komponente zur Bereitstellung von Flexibilitäten betrachtet. Dabei wird das Elektroauto nicht nur unidirektional geladen, sondern auch als zusätzlicher Batteriespeicher bidirektional genutzt, um die Eigenverbrauchsquote im Haushalt zu erhöhen.

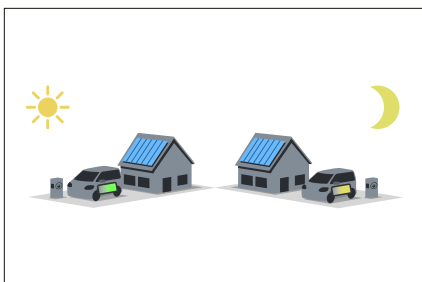


Abbildung 2: Bidirektionales Laden im Prosumer-Haushalt

### Lastkollektive für netzbildende Wechselrichter

Um zu untersuchen, welchen Belastungen netzbildende Wechselrichter im zukünftigen Energienetz bei der Bereitstellung von SDL haben, werden Lastkollektive erstellt. Dafür wird ein MATLAB Simulink Modell genutzt. Es ist eine Regelung für den netzbildenden Wechselrichter implementiert, welche mit einem Netzmodell verknüpft wird. Dies ist in Abbildung 3 dargestellt.

Insbesondere sollen die Belastungen bei der Bereitstellung der nicht-frequenzbe-

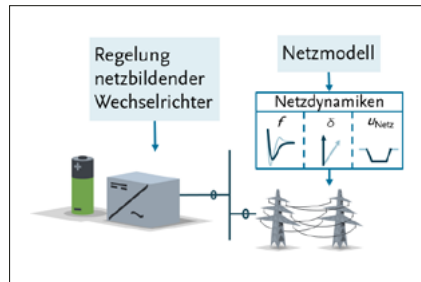


Abbildung 3: Ansatz zur Erstellung der Lastkollektive für den netzbildenden Wechselrichter

zogenen SDL, der Momentanreservebereitstellung und der dynamischen Blindstromeinspeisung, simuliert werden. Für die Simulationen werden unterschiedliche Szenarien getestet. Variiert wird dabei z. B. bei dem Frequenzgradienten, der Spannungseinbruchtiefe und unterschiedlichen Netzszenarien. Außerdem sollen die alltäglichen Belastungen und Worst-Case-Szenarien wie ein System-Split untersucht werden. Im Netzdynamiklabor werden die simulativen Untersuchungen anschließend im Rahmen eines Demonstratoraufbaus validiert. Ziel ist es, die Machbarkeit des Zusammenwirkens und der Wechselwirkungen zwischen netzbildenden Wechselrichtern und EMS im dynamischen Zeitbereich exemplarisch für Momentanreservebereitstellung und dynamische Blindstromeinspeisung zu zeigen. Zum Schluss folgt noch eine wirtschaftliche Bewertung der Erbringung von SDL aus diesen Prosumer-Haushalten.

### DC-Schutzkonzeptentwicklung

Die Verwendung von Gleichstrom in Wohngebäuden erlaubt eine Effizienzsteigerung durch den Wegfall von DC/AC- und AC/DC-Umwandlungsverlusten, stellt das Schutzsystem allerdings auch vor neue Herausforderungen. Fehlerströme steigen aufgrund der geringeren Netzinduktivität schneller an und verlöschen anders als bei Wechselstrom aufgrund des fehlenden Nulldurchgangs nicht.

Zum Entwurf eines passenden DC-Schutzsystems ist eine Anforderungsanalyse unerlässlich, die anhand von Netzsimulationen durchgeführt werden kann. Es wurden Simulationen verschiedener Topologien des DC-Netzes bestehend aus Active-Front-End-Umrichter (AFE), Elektroauto, Second-Life-Batterie, Photovoltaik-Generator, Lastwechselrichter, DC-Bus mit konstanter Spannung sowie mehreren DC/DC-Stellern in MATLAB/Simulink erstellt. Anhand dieses Modells wurden mehrere Arbeitspunkte, der Wechsel zwischen den Arbeitspunkten sowie verschiedene Kurzschluss-Fehlerfälle (Leiter-Leiter und Leiter-Erde an verschiedenen Stellen im Netz) untersucht und ausgewertet. Basierend auf den verwendeten Netzparametern wurde ein Katalog zur Abgrenzung der zulässigen Betriebsbedingungen vom Fehlerfall erstellt, auf dessen Grundlage ein Schutzsystem entwickelt werden kann.

Das in Abbildung 4 dargestellte schalterlose Schutzkonzept scheint im Projekt NetFlexum vielversprechend und zeichnet

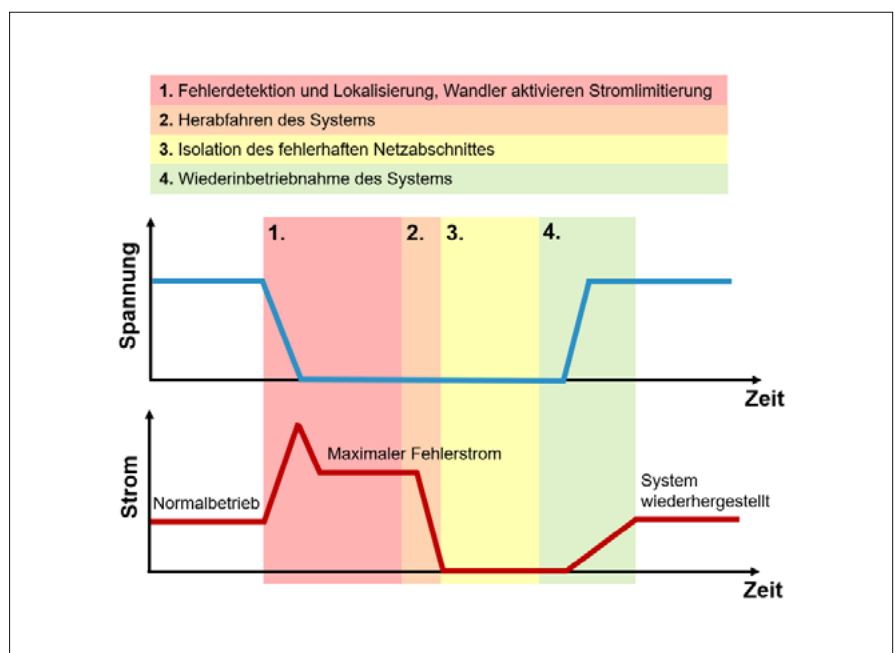


Abbildung 4: Das schalterlose Schutzkonzept im Fehlerfall

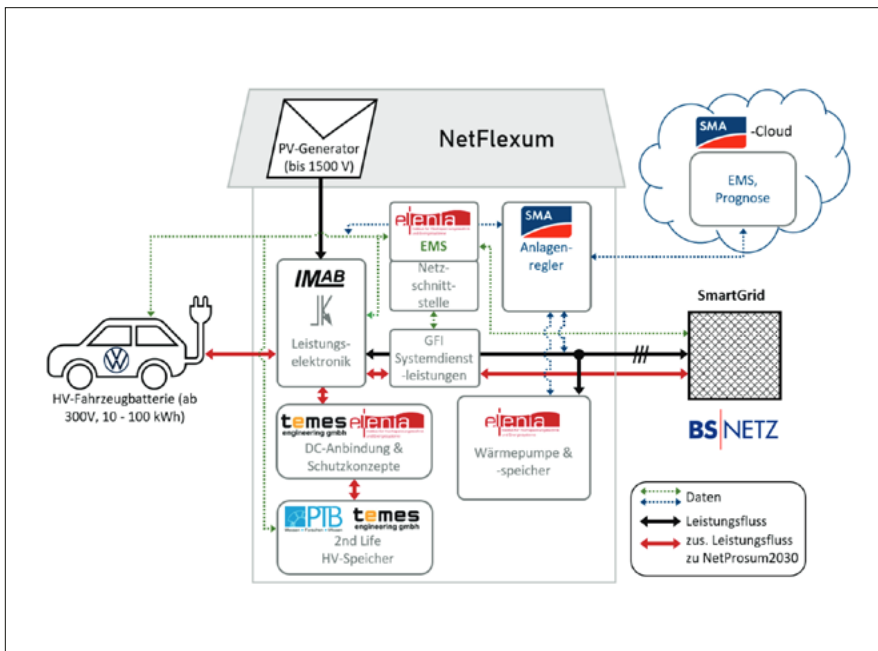


Abbildung 5: Projektstruktur NetFlexum

sich besonders durch hohe Geschwindigkeit und Robustheit aus. Moderne Leistungselektronik hat die intrinsische Fähigkeit, Fehlerströme auf einen beliebigen Maximalwert zu begrenzen (z. B. Buck-Converter, Vollbrücken MMC, back-to-back VSC). Sollte der Fehler bestehen bleiben, muss der Fehler trotz Strombegrenzung erkannt und der Converter ausgeschaltet werden. Anschließend wird mit Trennschaltern galvanisch getrennt. Regelungstechnisch gibt es mehrere Möglichkeiten zur Strombegrenzung, z. B. die Sollwertbegrenzung in Kaskadenregelung oder die Erhöhung des Droop-Widerstandes.

### Zusammenarbeit der Arbeitsgruppen

Die Arbeitspakete des elenia sind eng miteinander verknüpft. Die von der AG Energiesysteme erstellten Lastkollektiven stellen Randbedingungen für die Auslegung des Schutzsystems von der AG Energietechno-

logien dar. Die Bereitstellung von Momentanreserve fordert Überlastfähigkeit von der Leistungselektronik und eine entsprechende Kalibrierung des Schutzsystems. Transiente Überströme sind zuzulassen und vom Fehlerzustand zu unterscheiden. AG Energiesysteme liefert die Betriebszustände, die in den Netzsimulationen der AG Energietechnologien im Rahmen der Anforderungsanalyse verwendet werden. Umgekehrt können sich aus den Anforderungen der neuen Schutzkonzepte auch noch erweiterte Bedingungen für die Regelung des netzbildenden Wechselrichters ergeben.

In Abbildung 5 ist die Projektstruktur und die Zusammenarbeit der Projektpartner dargestellt. Hier ist zu erkennen, an welchen Stellen das elenia beteiligt ist und wie die Projektteile miteinander verknüpft sind. Es wird gemeinsam an einer Lösung für zukünftige Prosumersysteme gearbeitet, die zur Systemstabilität beitragen können.

### PROJEKT

# NETFLEXUM

Next Generation verbrauchsnahe PV-Kombisysteme für Haushalt und Gewerbe: Untersuchung, Realisierung und Qualifizierung integraler Konzepte und sicherer Lösungen für mehr Netzdienlichkeit, Flexibilität und Wirtschaftlichkeit.

### LAUFZEIT

September 2022 – August 2025

### ANSPRECHPARTNER / KONTAKT

Johanna Grobler

✉ j.grobler@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391 7760

Fabian Benedikt Witt

✉ fabian-benedikt.witt@

tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391 7703

Lukas Ebbert

✉ l.ebbert@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391 9727

### PROJEKTPARTNER



TU Braunschweig  
IMAB – Institut für elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen



SMA Solar Technology AG



Temes Engineering GmbH



PTB – Physikalisch Technische Bundesanstalt

### ASSOZIIERTE PARTNER



### GEFÖRDERT DURCH

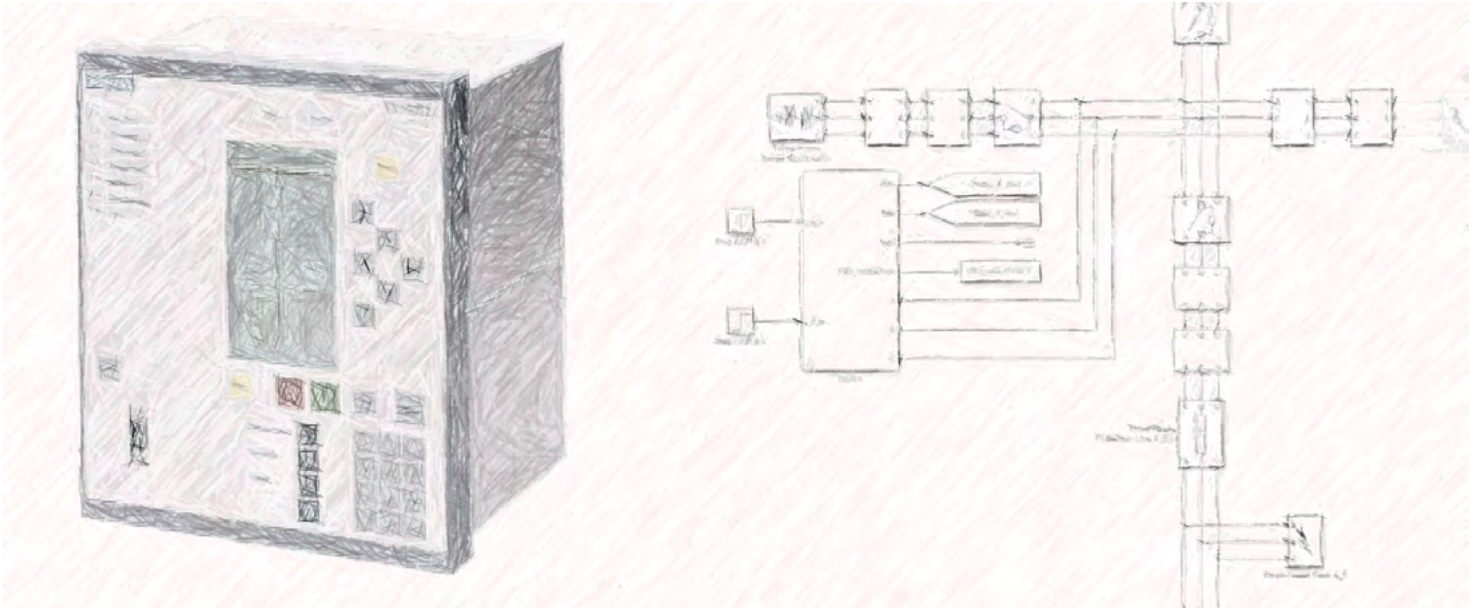


### KOORDINIERT DURCH

TU Braunschweig IMAB – Institut für elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen







## SiNED: Schutzsysteme in Verteilnetzen

### Validierung neu entwickelter Schutzkonzepte in einer skalierten Laborumgebung

Die zunehmende Einspeisung erneuerbarer Energien in das Verteilnetz über umrichterbasierten Anlagen besitzt einen wesentlichen Einfluss auf die Funktionalität konventioneller Schutzsysteme. Im Rahmen des Projekts SiNED – „Systemdienstleistungen für sichere Stromnetze in Zeiten fortschreitender Energiewende und digitaler Transformation“ wird dieser Einfluss genauer analysiert, um die eingesetzten Schutzsysteme so weiterzuentwickeln, dass sie auch im zukünftigen Stromnetz sicher und zuverlässig sind. Gerade dies bildet für die Erbringung von Systemdienstleistungen eine grundlegende Anforderung.

#### Zusammenfassung der ersten Projektphase

In der ersten Projektphase wurden Referenznetze definiert, um den Einfluss vermehrter umrichterbasierter Einspeisung auf konventionelle Schutzsysteme mit Hilfe von Simulationen zu untersuchen. Es zeigte sich, dass besonders die Konfiguration der Zwischeneinspeisung vorgelagerte Distanzschutzsysteme in der Funktionalität negativ beeinflusst. Ursache ist, dass die Parallelschaltung von umrichterbasierter Anlage und Kabel während eines Fehlers zu einer gemessenen Impedanz führt, die vom kon-

ventionellen Schutz nicht korrekt interpretiert werden kann.

Um die negative Beeinflussung der Schutzsysteme zu verringern, wurden mehrere Konzepte verfolgt. Zum einen erfolgte eine Anpassung des Distanzschutzsystems derart, dass die sogenannte Fehlerimpedanz herausgerechnet wird. Dadurch können die konventionellen Schutzeinstellungen beibehalten werden. Zum anderen wurde die umrichterbasierte Anlage mit zusätzliche Algorithmen versehen, um im Fehlerfall definierte Ströme einzuspeisen, wodurch kritische Ausprägungen der Fehlerimpedanz verringert werden. Auch dann können konventionelle Schutzeinstellungen erhalten bleiben.

#### Entwicklung einer skalierten Laborumgebung

Um die entwickelten Schutzkonzepte zu validieren, werden diese in einer Laborumgebung erprobt. Diese ist so ausgelegt worden, dass sie einem skalierten Mittelspannungsnetz mit 400 V statt 20 kV entspricht. Netzfehler können bis zu einem maximalen Strom von 63 A gefahren werden. Die Kabelnachbildungen sind in Form von Pi-Ersatzschaltbildelementen realisiert, wobei die konzentrierten Parameter so ska-

liert sind, dass sie eine ähnliche Dynamik wie Mittelspannungskabel aufweisen.



Abbildung 1: Integrierte Laborkomponenten, Foto: TU Braunschweig, Marc René Lotz

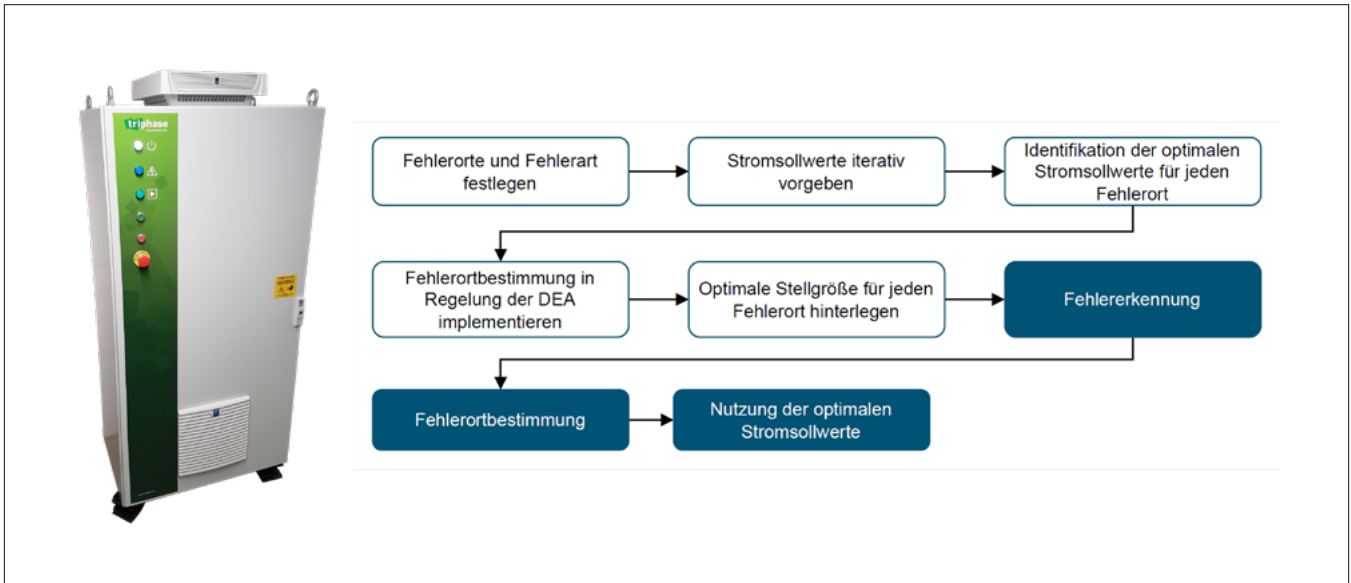


Abbildung 2: Leistungsverstärker mit implementierten Algorithmen,  
Foto: TU Braunschweig, Marc René Lotz

Zu den weiteren Eigenschaften der Laborumgebung gehört ein Steuerungskonzept, mit welchem beliebige Fehlerarten, bezogen auf Netzfehler, für definierbare Fehlerdauern und mit variierenden Fehlerimpedanzen erzeugt werden können. Somit ist es möglich, die zuvor simulativ entwickelten Szenarien in der Laborumgebung nachzubilden.

Ein Echtzeitsimulator (dSPACE SCALEXIO) dient als Plattform für die Implementierung von Schutzsystemen, deren Adaption, und die Ansteuerung der umrichterbasierten Anlage. Zudem kann das gesamte System gesteuert und Messwerte aufgenommen werden. Die beschriebenen Komponenten sind in einen Schaltschrank integriert, der in Abbildung 1 zu sehen ist. Als umrichterbasierte Anlage wird ein getakteter Leistungsverstärker (Triphase PM15) verwendet. Dieser bietet eine Plattform, auf dem eigene Algorithmen implementiert werden können. Zudem ist eine Kommunikationsschnittstelle zum Echtzeitsimulator vorhanden, wodurch eine Ansteuerung und die Auslagerung weiterer Algorithmen möglich sind.

**Ausblick**

Die Inbetriebnahme der Laborumgebung ist bereits erfolgt, so dass nun in einem ersten Schritt die Ergebnisse der simulativen Untersuchungen ebenfalls experimentell analysiert werden können. Anschließend werden die neu entwickelten Schutzkonzepte implementiert und validiert. Abbildung 2 zeigt das Ablaufdiagramm eines dieser Konzepte.

Die umrichterbasierte Anlage soll während eines Netzfehlers Ströme so einspeisen, dass die vom vorgelagerten Distanzschutzsystem gemessene Fehlerimpedanz hinsichtlich ihres Imaginärteils minimal wird. Dadurch wird der negative Einfluss deutlich reduziert. Vorab müssen dafür optimale Stromsollwerte bestimmt werden. Neben der Fehlererkennung ist auch ein Algorithmus zur Fehlerortbestimmung notwendig, der entwickelt wurde und auf Auswertung der Trajektorie der Netzimpedanz am Ort der umrichterbasierten Anlage basiert.

Insgesamt demonstriert dieses Konzept neben neuen Schutzkonzepten, welche Rolle umrichterbasierten Anlagen bei Fehlern und der Konfiguration von Schutzsystemen in Zukunft bei vermehrter Integration einnehmen können.

PROJEKT



**SiNED**

Systemdienstleistungen für sichere Stromnetze in Zeiten fortschreitender Energiewende und digitaler Transformation

LAUFZEIT

**2019–2024**

ANSPRECHPARTNER / KONTAKT

**Marc René Lotz**

✉ m.lotz@tu-braunschweig.de

☎ +49 5331 939 4322 0

PROJEKTPARTNER

**Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, OFFIS e.V., Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Leibniz Universität Hannover, TU Clausthal**

GEFÖRDERT DURCH



**Niedersächsisches Ministerium für Wissenschaft und Kultur**

Zusätzliche Förderung von Wissenschaft und Technik in Forschung und Lehre aus Mitteln des Niedersächsischen Vorab

KOORDINIERT DURCH

**TU Braunschweig – elenia**



## SiNED: Netzdienliche Prosumer-Haushalte

### Systemdienstleistungen für das Stromnetz aus Anlagen von modernen Haushalten in der Niederspannungsebene

Das gesellschaftlich und politisch getriebene Wegfallen großer Erzeugungsanlagen wie Kern- oder Kohlekraftwerke hat einen wesentlichen Einfluss auf die Bereitstellung netzdienlicher Funktionen für einen reibungslosen Betrieb von Stromnetzen. Nachdem die großen Generatoren dieser Kraftwerke in den letzten Jahrzehnten größtenteils für die Bereitstellung von Systemdienstleistungen (SDL) zuständig waren, fällt diese Aufgabe in Zukunft den in der Anzahl steigenden Umrichter-basierten Anlagen im Verteilungsnetz zu. Im Rahmen des Projekts SiNED wird an der Weiterentwicklung der bisherigen SDL für die Stromnetze der Zukunft gearbeitet. Dabei werden insbesondere die Möglichkeiten und resultierende veränderte Anforderungen berücksichtigt, die auf der fortschreitenden Energiewende sowie zunehmender Digitalisierung basieren.

#### Wandel der Haushalte und Herausforderungen der Flexibilitätsbereitstellung

Die Niederspannungsnetze waren jahrzehntelang durch den starren und kaum zu beeinflussenden Verbrauch an den Haushaltsanschlüssen gekennzeichnet. Seit wenigen Jahrzehnten können Haushalte je-

doch zunehmend durch PV-Anlagen ihren Netzbezug reduzieren und teilweise so viel Leistung produzieren, dass diese in das Niederspannungsnetz eingespeist wird. Weitere moderne Haushaltsanlagen sind Batteriespeichersysteme (BSS), Wärmepumpen (WP) und Elektrofahrzeuge (EV). Diese Prosumer-Anlagen sind neben der Erbringung

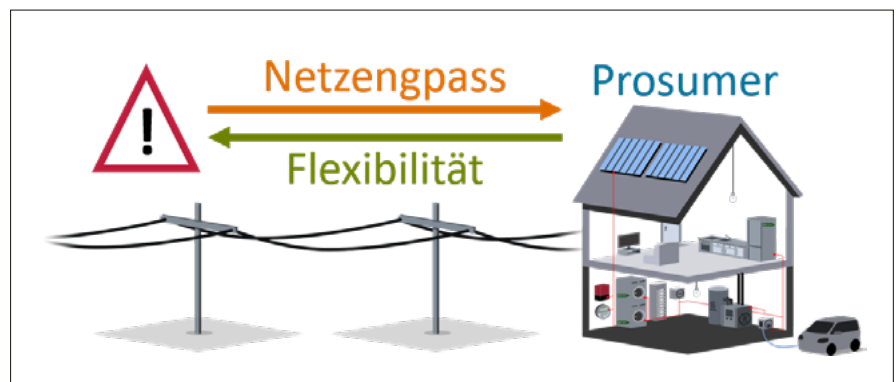


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Bereitstellung von Systemdienstleistungen durch Prosumer-Haushalte, Grafik: Carsten Wegkamp

ihrer primären Aufgabe – bei häuslichen BSS ist dies z. B. die Zwischenspeicherung von PV-Strom zur Eigenverbrauchsmaximierung – in der Lage, eine netzdienliche Funktion wahrzunehmen. Dies liegt daran, dass die Anlagen Flexibilität besitzen, ihren Leistungsbezug oder Einspeisung zeitlich und in der Höhe zu variieren, und über Umrichter an das Stromnetz angeschlossen sind, weshalb ihr Arbeitspunkt einfach und schnell steuerbar ist. Identifizierte Potentiale zu einem Beitrag liegen dabei in den SDL Spannungshaltung, lokales Engpassmanagement sowie Frequenzhaltung und Momentanreserve. Dadurch könnte z. B. ein Ausbau der Stromnetze durch zusätzliche Leitungen reduziert werden.

### Ziele des Projektes

Neben der groben Analyse von regulatorischen Fragestellungen und wirtschaftlichen Machbarkeit liegt der Fokus in den Untersuchungen am elenia auf der technischen Ausgestaltung.

Innerhalb des Projekts werden zuerst die Potentiale zur Bereitstellung von SDL analysiert mit Hilfe einer Abschätzung der Durchdringung der Prosumer-Anlagen für die Jahre 2020 und 2030. Anschließend wird untersucht, inwiefern die genannten Komponenten einen Beitrag zu lokalen (Spannungshaltung, Engpassmanagement) und globalen SDL (Frequenzhaltung) liefern können. Einen der Schwerpunkte bildet dabei der Vergleich der Spannungshaltung durch Prosumer-Anlagen über Blindleistungsbereitstellung mit alternativen Spannungshaltungskonzepten wie regelbaren Ortsnetztransformatoren. Insgesamt wird dabei der Einfluss der SDL-Bereitstellung durch Prosumer auf die Niederspannungsnetze sowie das Integrationspotential moderner Anlagen untersucht mit dem Ziel, möglichst viele PV-Anlagen, EV, WP und BSS in die deutschen Niederspannungsnetze integrieren zu können, ohne dass es zu kritischen Netzsituationen kommt.

Die Konzepte zur Bereitstellung von SDL durch moderne Prosumer-Anlagen wird sukzessive in die bestehende, eigene Simulationsumgebung eSE – elenia Simulation Environment integriert. eSE wurde bereits im Vorgängerprojekt NEDS – Nachhaltige Energieversorgung Niedersachsen entwickelt und wird um verschiedene Modelle erweitert. Dazu zählen diverse Spannungshaltungskonzepte, Komponenten

wie regelbare Ortsnetztransformatoren und Strangregler oder auch die koordinierte Steuerung der Erbringung von SDL.

### Zwischenergebnisse und Ausblick

Im Projektverlauf wurden bereits einige spannende und vielversprechende Ergebnisse erzielt. Die Charakteristika und Spezifikationen der einzelnen Systemdienstleistungen sowie die zugehörigen Bedingungen der Erbringung wurden analysiert. Diverse Spannungshaltungskonzepte wurden simulativ miteinander verglichen und sowohl gegeneinander als auch zu den aktuellen Anschlussrichtlinien gegenübergestellt. Dabei konnte eine Empfehlung für die verschiedenen Prosumer-Anlagen aus netztechnischer Sicht gegeben werden. Außerdem wurde ein Modell für den zentral koordinierten, wirtschaftlich optimalen Abruf von Flexibilität für lokale SDL im Niederspannungsnetz entwickelt und erprobt. Die Ergebnisse, exemplarisch in Abbildung 2 zu sehen, zeigen die deutliche Möglichkeit zur Verbesserung der lokalen Netzstabilität durch die effiziente, koordinierte Nutzung der Prosumer-Flexibilität

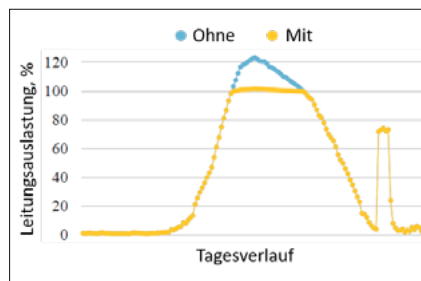


Abbildung 2: Exemplarisches Simulationsergebnis zur Leitungsauslastung ohne und mit Einsatz der Flexibilität aus Prosumer-Haushalten, Quelle: eigene Auswertungen

auf. Dies gilt sowohl für die Strombelastung von Leitungen (Engpassmanagement) als auch für Spannungsprobleme an Netzknoten. Darüber hinaus zeigen aktuelle Untersuchungen ein Potential zur Verbesserung der Netzauslastung bei einem netzdienlichen Betrieb von häuslichen BSS, ohne die Wirtschaftlichkeit für den Speicherbesitzer signifikant zu verändern. Außerdem wurde das Potential zum Beitrag von Prosumer-Anlagen zur Frequenzhaltung mit ihrer Flexibilität simulativ analysiert und ein hoher, möglicher Deckungsgrad des Regelleistungsbedarf alleine durch Haushalte insb. tagsüber und im Sommer festgestellt, wobei der BSS einen hohen Anteil daran trägt.

Im weiteren Verlauf sind für das Projekt abschließende simulative Untersuchungen geplant, die eine Einschätzung des Potentials zur SDL-Erbringung durch Prosumer-Komponenten möglich machen. Darüber hinaus wird eine labor-technische Validierung von einer Auswahl der entwickelten und simulativ getesteten Ideen und Konzepte angestrebt. Dazu werden sowohl das Energiemanagementlabor als auch das Netzdynamiklabor verwendet, um Effekte von Prosumern auf das Stromnetz zu identifizieren und den netzdienlichen Abruf von Flexibilität beim Prosumer zu validieren.

#### PROJEKT



#### SiNED

Systemdienstleistungen für sichere Stromnetze in Zeiten fortschreitender Energiewende und digitaler Transformation

#### LAUFZEIT

2019–2024

#### ANSPRECHPARTNER / KONTAKT

**Carsten Wegkamp, M.Sc.**

✉ c.wegkamp@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391 7756

#### PROJEKTPARTNER

**Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, OFFIS e.V., Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Leibniz Universität Hannover, TU Clausthal**

#### GEFÖRDERT DURCH

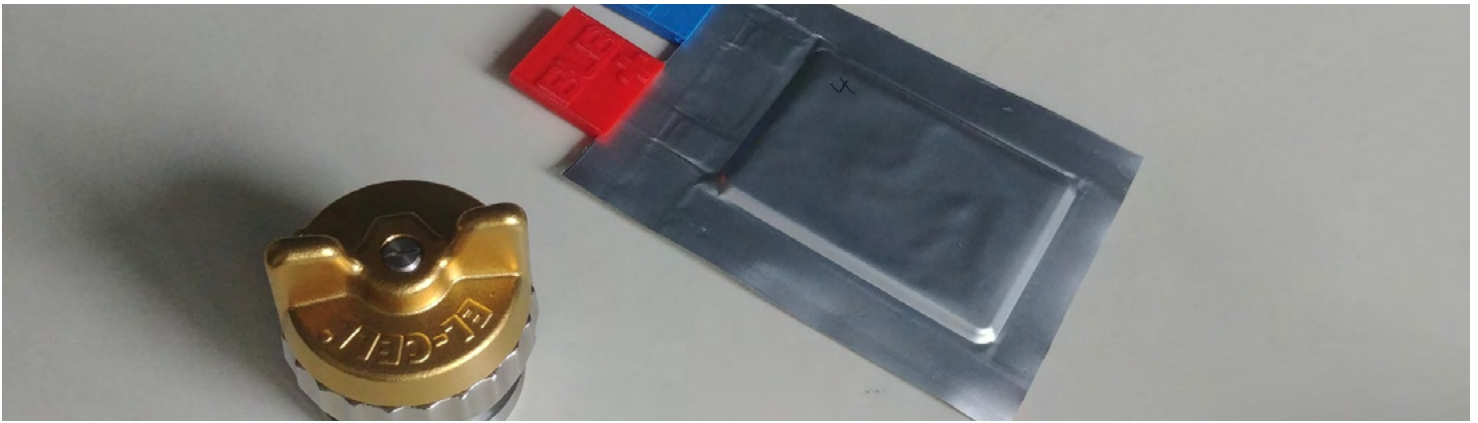


**Niedersächsisches Ministerium für Wissenschaft und Kultur**

Zusätzliche Förderung von Wissenschaft und Technik in Forschung und Lehre aus Mitteln des Niedersächsischen Vorab

#### KOORDINIERT DURCH

**TU Braunschweig – elenia**



## Adaptive Schnellladestrategien

### Modellbasierte Bewertung der Betriebsgrenzen verschiedener Zellsysteme zur Auslegung alterungsadaptiver Schnellladestrategien

Eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst die Verbraucherakzeptanz der Elektromobilität. Die Begriffe Kosten, Energieeffizienz, Sicherheit, Nachhaltigkeit, Reichweite und Leistungsfähigkeit fallen in diesem Zusammenhang immer wieder. Darüber hinaus ist eine lange Lebensdauer von Lithium-Ionen-Batteriezellen sowie eine kurze Ladezeit dieser im Betrieb für den Erfolg von Elektrofahrzeugen entscheidend. Die Anforderungen an die Schnellladefähigkeit kommen dabei aus der jeweiligen Anwendung, werden aber häufig durch das Materialsystem und Zelldesign limitiert. Hinzu kommt, dass sich die Zelleigenschaften durch die Batteriealterung verschlechtern. Insbesondere Schnellladevorgänge können dabei zu einer beschleunigten Alterung führen. Deshalb werden die Betriebsgrenzen häufig sehr pessimistisch ausgelegt, um sicherheitskritische Prozesse und beschleunigte Alterungsvorgänge wie das Lithium-Plating zu vermeiden. Eine vielversprechende Alternative ist die Bestimmung von alterungsabhängigen Betriebsgrenzen zur entsprechenden Anpassung der Schnellladestrategie. Dieser Ansatz ist jedoch mit Herausforderungen verknüpft, weil eine alterungsbedingte Anpassung der Betriebsgrenzen von nicht unmittelbar messbaren Zuständen des Material- und Zellsystems abhängt.

#### Projektziel

Das Projekt FastChargeLongLife adressiert diese Herausforderung und entwickelt eine

Methodik für die modellgestützte Bewertung verschiedener Zellmaterialsysteme in Bezug auf die maximalen Lade-Betriebsgrenzen in Abhängigkeit des Alterungszustands. Zu diesem Ziel wird ein gekoppelter Modellansatz verwendet, welcher echtzeitfähige Ersatzschaltbild-Modelle und detaillierte physiko-chemische Degradationsmodelle miteinander verbindet (vgl. Abb. 1). Dabei wird eine modellbasierte Skalierbarkeit der Materialdaten vorgesehen, um die Modellparameter von kleinen Zellformaten im 3-Elektroden-Format auf großformatige Pouch-Zellen zu übertragen. Auf Basis der modellbasiert ermittelten Betriebsgrenzen werden alterungs-adaptive Schnellladestrategien abgeleitet, welche sicherheitskritische Degradationseffekte vermeiden. Dies wird für verschiedene Zellmaterialsysteme vorgenommen, welche dadurch hinsichtlich der alterungsabhängigen Schnellladefähigkeit miteinander verglichen werden können. Durch die optimierten Schnellladestrategien sollen die Ladezeit und Lebensdauer, um mindestens 10% im Vergleich zu State-of-the-Art Schnellladestrategien ohne

alterungsabhängige Anpassung verbessert werden.

#### Auslegung der Schnellladestrategien

Die Auslegung der State-of-the-Art Referenzschnellladestrategien für verschiedene Zellmaterialsysteme dient als Grundlage für eine spätere alterungsabhängige Optimierung der Schnellladestrategien. Die Basis der Referenzschnellladestrategien bietet ein am Institut entwickeltes Elektroden-Ersatzschaltbildmodell, welches die Elektroden separat voneinander betrachtet und somit die Steuerung der Anodenspannung ermöglicht. Über die Festlegung einer minimalen Anodenspannung oberhalb von 0 V während der Schnellladung kann somit Lithium-Plating vermieden und eine beschleunigte Alterung reduziert werden. Zur Parametrierung und Validierung des Modells werden verschiedene Charakterisierungsverfahren wie Kapazitätstests, Current-Interrupt-Tests bei verschiedenen Ladezuständen (SOC) und C-Raten-Tests an kleinformatigen Zellen im 3-Elektroden-Format angewandt. Der Zelltyp ist eine

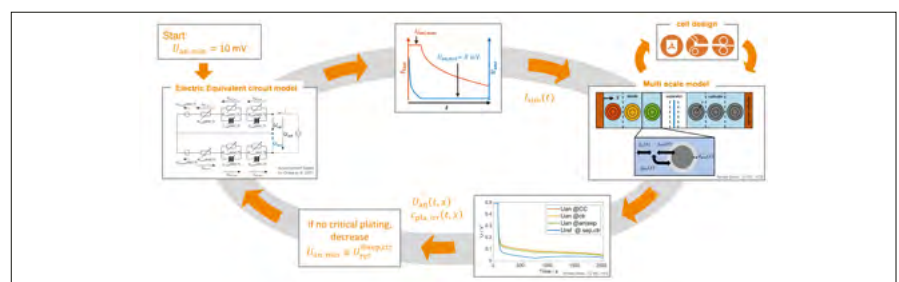


Abbildung 1: Modellkopplung zwischen Elektroden-Ersatzschaltbild-Modell und physikochemischen Modell

PAT-Cell der EL-Cell GmbH mit ca. 8 mAh und einer Lithium-Referenzelektrode am Separator, die es erlaubt, die Elektrodenpotentiale zu bestimmen. In Abhängigkeit der Vorgabe des maximalen Ladestroms, der minimalen Anodenspannung und des zu erreichenden SOC nach der Schnellladung gibt das Modell eine entsprechende Ladestrategie vor. Insgesamt werden je Zellmaterialsystem zwei Referenzschnellladestrategien definiert. Die erste Ladestrategie (Ref A) ergibt sich für eine Ladung von 0–80% SOC, einer minimalen Anodenspannung in Höhe von 10 mV sowie einem maximalen Ladestrom in Höhe von 3 C. Die zweite Referenzladestrategie (Ref B) fundiert ebenfalls auf diesen Randbedingungen, wird jedoch auf Basis eines um 50% höheren Innenwiderstands der Zelle dimensioniert.

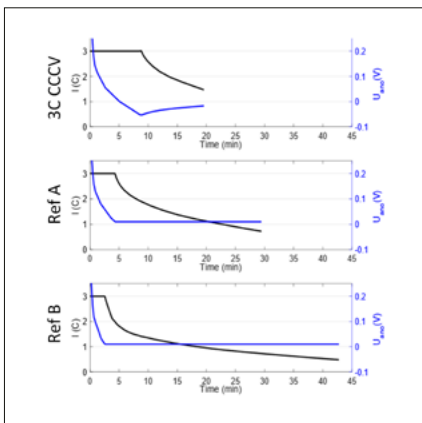


Abbildung 2: Referenzladestrategien, C-Rate in schwarz, Anodenspannung in blau

Die drei Liniendiagramme (vgl. Abb. 2) zeigen den Zell- und Anodenspannungsverlauf für eine gemessene Schnellladung mit 3 C CCCV (Maximale Zellspannung = 4,2 V) sowie für die simulierten Profile Ref A und Ref B. Das betrachtete Zellmaterialsystem beruht auf der Zellchemie NMC622/G, die Umgebungstemperatur beträgt 20 °C. Bei der 3 C CCCV-Schnellladung beträgt die Ladezeit 19 min beim ersten Zyklus, jedoch sinkt die Anodenspannung auf bis

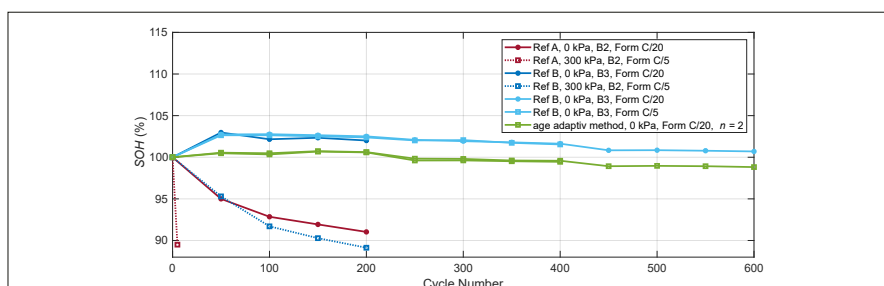


Abb. 3: Schnellladezyklisierung von multilayer Pouch-Zellen mit Ref A, Ref B und adaptiver Ladestrategie

zu -50 mV, wodurch Lithium-Plating während des Ladevorgangs auftritt und die Zellalterung bei einer Zyklisierung mit dieser Ladestrategie deutlich beschleunigt wird. Ref A und Ref B weisen Ladezeiten in Höhe von 29 min bzw. 42 min bei gleichzeitiger Vermeidung von Lithium-Plating und somit einer langsameren Zellalterung auf.

### Ergebnisse

Die 3-Elektroden werden mit den Referenzladestrategien (Abbildung 2) zyklisiert. Nach einer festgesetzten Anzahl von Schnellladezyklen werden elektrochemische Charakterisierungstest sowie optische Post-Mortem-Analysen durchgeführt. Die Zellen, die mit 3 C CCCV zyklisiert werden, zeigen nach 100 Schnellladezyklen einen Kapazitätsverlust (Kapazitätstest: 0,5 C CCCV) zwischen 12–21%, wohingegen die Zellen mit Ladestrategie Ref A einen Kapazitätsverlust von 1–3% aufweisen. Bei den Post-Mortem-Untersuchungen können bei den Zellen mit 3 C CCCV Zyklisierung im Gegensatz zu den Zellen mit Ref A Zyklisierung deutliche Lithiummetallabscheidungen identifiziert werden.

Die Ladestrategien werden auf mehrlagige Pouch-Zellen mit einer Kapazität von 1,35 Ah hochskaliert. Bei den Pouch-Zellen wird aus produktionstechnischen Gründen ein anderer Separator verwendet, bei dem sich herausstellt, dass dieser die Schnellladefähigkeit reduziert.

In Abbildung 3 sind die Ergebnisse der Schnellladezyklisierung mit und ohne externen Verspannungsdruck der Zellen abgebildet. Es zeigt sich, dass der Separator bei Verspannung eine schlechtere Porosität aufweist, sodass die unverspannten Zellen einen deutlich geringeren Kapazitätsverlust aufzeigten. Bei den unverspannten Zellen stellt sich heraus, dass durch den anderen Separator ein deutlich größerer Kapazitätsverlust beim Zyklisieren mit Ref A vorliegt, als bei den 3-Elektroden-Zellen. Die Ladestrategie Ref B hingegen zeigt im Vergleich

PROJEKT

**FastChargeLongLife**

---

LAUFZEIT

**Oktober 2020 – März 2024**

---

ANSPRECHPARTNER / KONTAKT

**Oliver Landrath**  
 ✉ o.landrath@tu-braunschweig.de  
 ☎ +49 531 391 7742

---

PROJEKTPARTNER

**InES (TU Braunschweig)**  
**IPAT (TU Braunschweig)**

---

GEFÖRDERT DURCH

zum Kapazitätstest direkt vor dem Schnellladezyklisieren nach 600 Schnellladezyklen keinen Kapazitätsverlust. Basierend auf dem Spannungsprofil der Ladestrategie Ref A wird eine adaptive Ladestrategie abgeleitet. Dafür wird aus dem Spannungsprofil von Ref A eine nahezu konstante Spannungsphase identifiziert und als CV Phase in die adaptive Ladestrategie implementiert. Dadurch passt sich der Strom individuell an die jeweiligen Zellewiderstände an und die Ladezeit kann im Vergleich zu Ref B in den ersten 400 Zyklen im Durchschnitt über 10% reduziert werden (Abbildung 4)

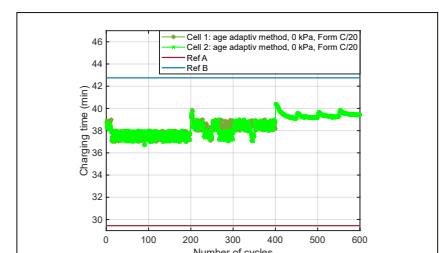
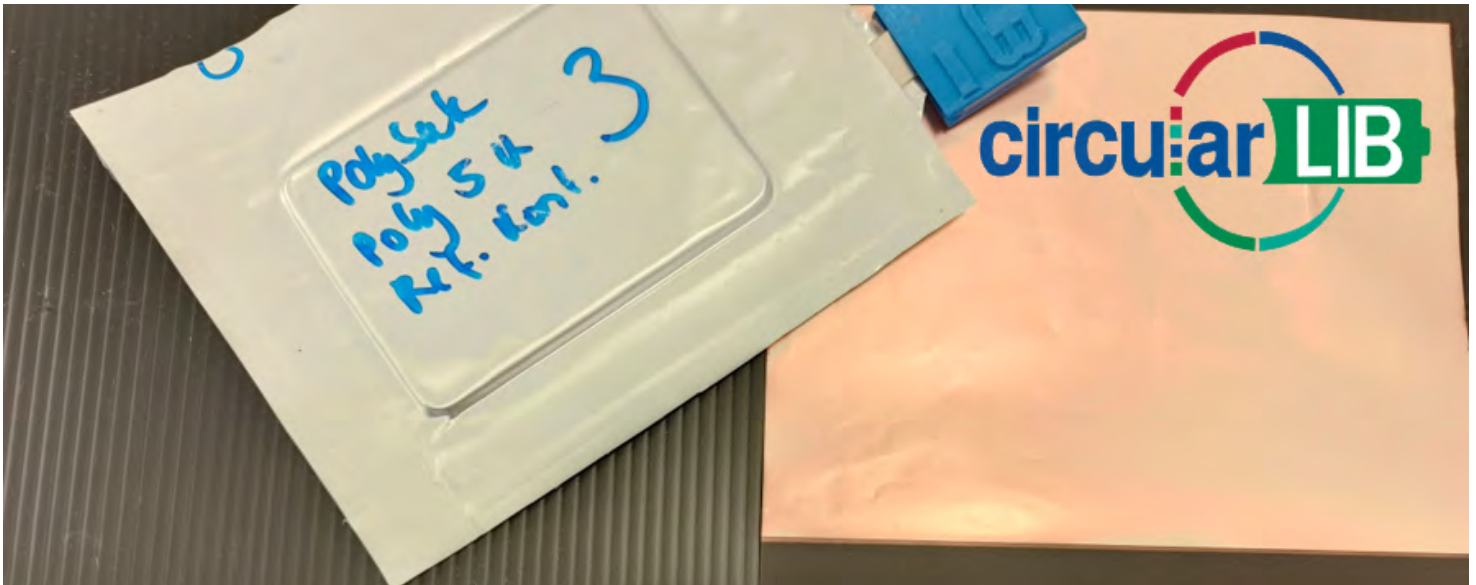


Abbildung 4: Ladedauer über Zyklen mit Ref A, Ref B und adaptiver Ladestrategie



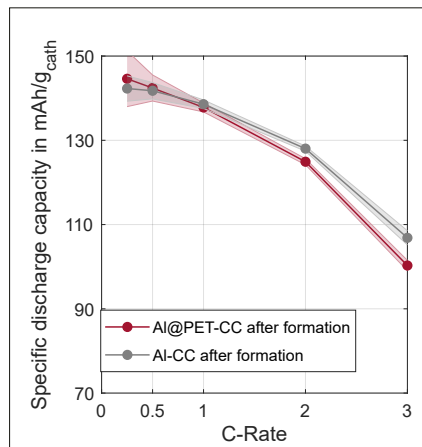
## Neueste Entwicklungen im Bereich Batteriesicherheit und Recycling

### Optimierung der wirtschaftlichen Integration verschiedener Materialien in bestehende Prozessketten

Die wachsende Nachfrage nach Batterien in Bereichen wie Elektrofahrzeugen, erneuerbaren Energiesystemen und tragbarer Elektronik treibt die Suche nach innovativen Lösungen in den Bereichen Batteriesicherheit und Recycling voran. In diesem Artikel werden zwei Projekte am elenia vorgestellt, die unterschiedliche Ansätze verfolgen, aber das gemeinsame Ziel teilen, Batteriematerialien in bestehende Prozessketten wirtschaftlich zu integrieren.

#### PolySafe

Das Projekt PolySafe verfolgt einen Ansatz, mit dem die intrinsische Sicherheit durch innovative Metall-Polymer-Komposit-Stromkollektoren gesteigert wird. Das in den Stromkollektoren enthaltene Polymer erweicht bzw. schmilzt bei einem internen Kurzschluss, sodass der elektronische Leitpfad zerstört wird, was letztendlich das Ereignis lokal begrenzt und das thermische Durchgehen der gesamten Zelle verhindert. Zusätzlich erlaubt die Kombination von Metallschicht und Polymersubstrat einen Gewichts- und Dickenvorteile und damit den sparsamen Einsatz von Materialressourcen.



Entladekapazität verschiedener Metall-Polymer-Komposit-Batteriezellen bei verschiedenen C-Raten

#### CircularLIB

Das Graduiertenkolleg CircularLIB widmet sich skalierbaren, wirtschaftlich effizienten und ökologisch nachhaltigen Prozesstechnologien sowie den zugehörigen Diagnose- und Simulationsmethoden entlang des Material- und Produktionskreislaufes von Batterien. Entlang des gesamten Materialkreislaufes von der Material(re)synthese, Materialkonditionierung und -formulierung, Elektroden- und Zellproduktion,

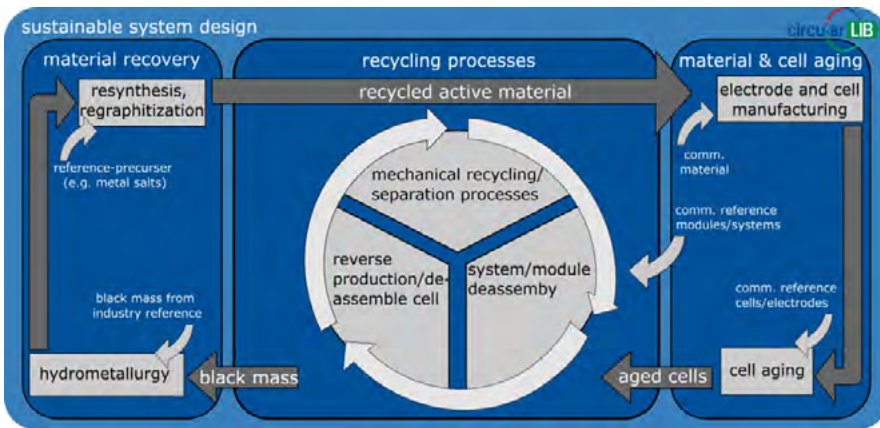
Batterienutzung sowie Recycling werden Methoden zur Wiedergewinnung und Wiederverwendung von Materialien mit dem Ziel untersucht einen geschlossenen Kreislauf zu schaffen.

#### Zwischenübersicht und Ergebnisse

Zur Bewertung Zellqualität werden Kenngrößen nach der Formierung, der ersten elektrischen Aktivierung der Zelle und während der Alterung aufgenommen. Diese kenngrößenbasierte Methode wurde am elenia in verschiedenen Forschungsarbeiten etabliert. Dazu gehören unter anderem die Kapazität, der innere Widerstand und die Abnahme des Gesundheitszustandes (SOH) über die Zeit.

Eine Sonderform des Kapazitätstests ist der C-Ratentests. Das Ziel des C-Ratentests besteht darin, die Strombelastbarkeit der Zellen anhand der Kapazität bei variierenden Stromraten zu ermitteln. Dieser wird zur Erfassung der Zellperformance zunächst nach der Formierung durchgeführt. Alterungseffekte werden mithilfe des C-Ratentests ermittelt, indem dieser in definierten Abständen während der Zyklisierung





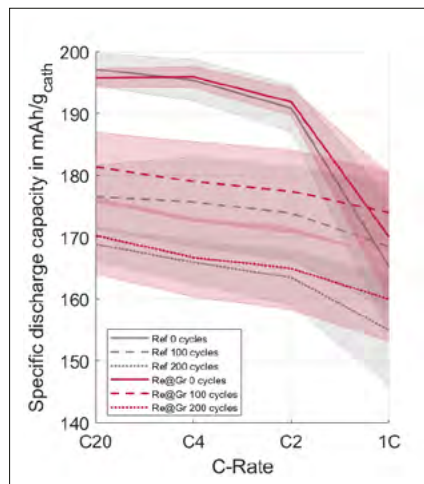
Projektstruktur Graduiertenkolleg CircularLIB

wiederholt wird. Als Zyklisierung wird dabei das zyklische Laden und Entladen einer Zelle bezeichnet, mit welchem der reale Betrieb einer Batteriezelle simuliert wird. In dem Projekt PolySafe wird die Qualität und die Performance der Zellen, die auf Basis des Metall-Polymer-Komposit-Stromkollektors (Al@PET-CC) gefertigt wurden, im Vergleich zu den Zellen, die als Referenz einen Metall-Stromkollektor besitzen (Al-CC), analysiert. Die Untersuchung erfolgt unter anderem mithilfe des C-Ratentests, mit dem gezeigt werden konnte, dass die Zellvariationen bei Stromraten von 0,2 C bis 3 C über eine vergleichbare Entladekapazität verfügen.

Neben erhöhter Sicherheit gilt es auch gesetzliche Vorgaben einzuhalten, so auch solche zum Recycling. Mitte 2023 traten Gesetze in Kraft, dass ab 2027 nicht nur Mindestmengen für aus Altbatterien zurückgewonnene Materialien festgelegt sind, sondern auch ein Mindestzyklanteil in neuen Batterien vorgeschrieben wird. Dafür bedarf es eines sorgfältig ausgearbeiteten Recyclingprozesses, der die Sammlung von Altbatterien sowie deren aufwendige Verarbeitung durch mechanische, thermische und chemische Verfahren umfasst. Dadurch können diverse wertvollen Materialien in Batteriequalitätsstandard zurückzugewon-

nen und erneut in den Produktionskreislauf eingeführt werden.

Doch insbesondere die Zerkleinerung der Batterien trägt dazu bei, dass ein erheblicher Anteil an Verunreinigungen in der zurückgewonnenen schwarzen Masse enthalten ist. Am elenia wird der Einfluss dieser Verunreinigungen bewertet und wiedergewonnenes Material analysiert. So konnte mithilfe eines C-Raten Tests – wie im Projekt PolySafe – gezeigt werden, dass sich resynthetisiertes Graphit nach Alterung ähnlich zur Referenz verhält.



Entladekapazität verschiedener resynthetisierter Batteriezellen bei verschiedenen C-Raten

PROJEKT

**Polysafe**

LAUFZEIT

**Juni 2021 – Mai 2024**

ANSPRECHPARTNER / KONTAKT

**Merit Holdorf**

✉ m.holdorf@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391 7763

PROJEKTPARTNER

**iPAT, ifs, IWF, Fraunhofer IST, Fraunhofer FEP, von Ardenne, Varta, Brückner Maschinenbau**

ASSOZIIERTE PROJEKTPARTNER

**BMW, Rena**

PROJEKT

**Graduiertenkolleg CircularLIB**

LAUFZEIT

**März 2021 – Februar 2025**

ANSPRECHPARTNER / KONTAKT

**Anna Rollin**

✉ anna.rollin@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391 9734

PROJEKTPARTNER

**ifs, ITC, IWF, iPAT, InES, IÖNC, KI, AIP, IAP, IFAD (TU Clausthal), IOC (TU Clausthal), ICVT (TU Clausthal), ISSE (TU Clausthal), FKP (Leibnitz Uni Hannover), Fraunhofer IST**

GEFÖRDERT DURCH





## InForm (Cluster InZePro)

### Entwicklung intelligenter Formieranlagen zur Optimierung und Diagnose von Zelleigenschaften

Maßgeschneiderte Batterien mit automatisierter Qualitätsbeurteilung sind der Schlüssel zu einer intelligenten und hochproduktiven Formierung für eine konkurrenzfähige Batterieproduktion höchster Qualität am Industrie 4.0 Standort Deutschland. Die Formierung ist der letzte entscheidende Produktionsschritt, welcher maßgeblich über die spätere Leistung, Sicherheit und Langlebigkeit entscheidet. Dieses Projekt hat das Ziel mittels zweier intelligenter Optimierungskreisläufe die Formierung zu beschleunigen und qualitativ zu optimieren. Hierbei wird mittels KI und physiko-chemischer Modelle aktiv in die Formierung eingegriffen, um einen sicheren Prozess zu gewährleisten (z. B. Verhindern der Über-/Unterschreitung der Temperatur) und positive Zelleigenschaften zu erzielen. Hierbei soll gezeigt werden, dass es möglich ist bei verkürzten Prozesszeiten maßgeschneiderte Batterien z. B. hinsichtlich verbesserter elektrischer Eigenschaften oder Lebensdauer zu formieren und bedarfsgerechte Formierungsprozeduren beschleunigt zu entwickeln. In diesem Projekt wird daher das Clusterziel der KI in der Produktion adressiert indem auf Basis der Digitalisierung eine innovative Anlagentechnik etabliert wird. Die physiko-chemische Grundlage hierzu ist die Erzeugung der sogenannten

Solid Electrolyte Interphase (SEI) während der ersten Lade- und Entlade-Zyklen. Die SEI ist eine komplexe Korrosionsinterphase aus Elektrolyt und Elektrodenmaterial, welche über Passivierung ein weiteres korrodieren des Elektrolyts verhindert. Ist die SEI inhomogen, beschädigt oder von schlechter Qualität verkürzt sich die Lebenszeit einer Batterie bis hin zur Dendritenbildung und Explosion. Durch aktive Regelung des Prozesses durch KI und physiko-chemische Batteriemodelle soll eine homogene und qualitativ hochwertige SEI-Schicht erreicht werden, welches zu verbesserten elektrischen Eigenschaften und einer längeren Lebensdauer bei verkürzter Prozesszeit führt. Dabei werden die physiko-chemischen Modelle unter anderem mit KI-Methoden, wie z. B. dem „erklärbaren“ sequentiellen maschinellem Lernen gekoppelt, um einzelne Batterieeigenschaften gezielt zu verbessern.

Die KI gibt hierbei optimale Experimentierpläne vor, welche Funktion und Modell gleichermaßen verbessern. Die Modelle sollen ebenfalls zur automatisierten Qualitätsbeurteilung genutzt werden, um die Produktivität und Ausbringung zu erhöhen sowie den Ausschuss zu reduzieren. Zusätzlich wird durch kooperative Mensch-Maschine Offline Analytik die Möglichkeit geschaffen

eine Verknüpfung von Grundlagen- und Produktionsforschung zu leisten. Gesamtziel dieses Projektes ist die Gestaltung von intelligenten Batterieformationsanlagen zur Beschleunigung, Prozesskostensenkung und Qualitätssteigerung von Lithium-Ionen-Batterien auf Basis von KI und Digitalisierung in der Produktion. Damit werden die wesentlichen Ziele zur Verbesserung der „Produktionskosten“, „Produktqualität“ und „Produktivität“ des Kompetenzclusters signifikant unterstützt. Die erarbeiteten Methoden und Konzepte können insbesondere für die Forschungsfertigung Batteriezelle (FFB) sowie in die Forschungsplattform für die industrielle Produktion von großen Lithium-Ionen-Zellen (FPL) integriert werden.

#### Das erste Laden einer Lithium-Ionen-Batterie- die Formierung

Die ersten Lade- und Entladezyklen einer Lithium-Ionen-Batterie während der Formierung haben einen entscheidenden Einfluss auf die Performance, Alterung und Sicherheit. Aufgrund des niedrigen Potentials der negativen Elektrode wird der Elektrolyt zersetzt und bildet dabei die passivierende Solid-Electrolyte-Interphase (SEI). Die SEI wurde in mehreren Reviews hinsichtlich des Aufbaus und Materialwechselwirkungen, Eigenschaften und Charakterisie-

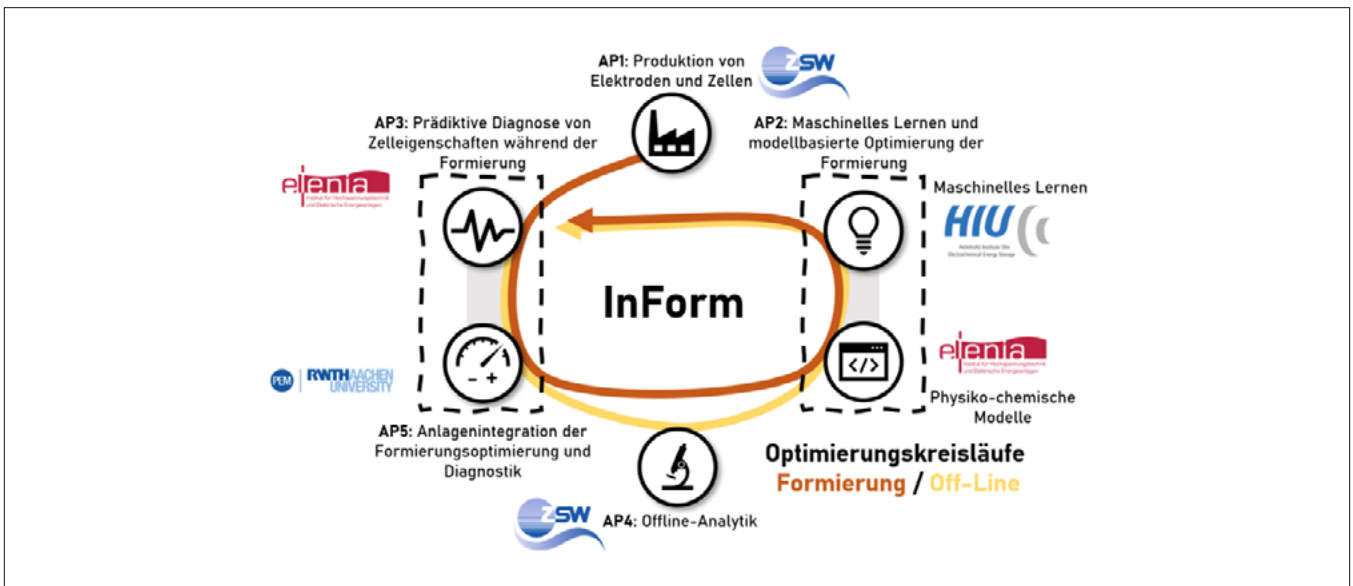


Abbildung 1: Arbeitspakete der InForm- Projektpartner

rungsmethoden sowie elektrochemischen Zusammenhängen untersucht. Mit den Prozedurparametern der Formierung sollen die strukturellen und morphologischen Eigenschaften der SEI kontrolliert eingestellt werden, um die Zelleigenschaften und Prozessdauer positiv zu beeinflussen. Es existieren nur vereinzelt Studien zum Einfluss der Prozessparameter wie Tempe-

ratur, Stromdichte, Spannungsprofile und diverser Materialien. Eine systematische Untersuchung und Diskussion des Einflusses der Prozessparameter während der Formierung fehlt.

Dabei hat die Wahl der Formierstrategie einen entscheidenden Einfluss auf die SEI-Schichtmorphologie und damit auf Zelleigenschaften, wie z. B. die Alterungseigenschaften. Dabei besteht die SEI-Schicht aus mehreren Phasen, welche insgesamt die Eigenschaften bestimmen.

Es gibt bereits erste Modellierungsansätze zur Berücksichtigung der SEI-Schicht als homogene Schicht oder als Multiskalenmodellierung auf Basis der Monte Carlo Methode zur Simulation der Schichtstruktur. Nachteilig an solchen Modellen ist jedoch eine komplexe und aufwendige Modellparametrierung und oftmals nicht direkt validierbare Ergebnisse. Konventionelle molekular-dynamische Modelle sind auf sehr kurze Zeitskalen begrenzt und können daher nicht für Simulationen von technisch relevanten Prozesszeiten eingesetzt werden. Im Gegensatz dazu ermöglichen physikalische Ersatzschaltbildmodelle mit intrinsischen Zustandsinformationen die Simulation und Prädiktion von internen Zelleigenschaften. Außerdem können solche Modelle auch dazu genutzt werden, um die maximalen Betriebsgrenzen während der Formierung zu bestimmen, welche keine schädliche Degradationseffekte hervorrufen.



Abbildung 2: Optische Batteriezeile zur in-Operando-Diagnose von Elektroden während der Formierung

PROJEKT

**InForm**

LAUFZEIT

**2021 – 2024**

ANSPRECHPARTNER / KONTAKT

**Torben Jennert, M.Sc.**

✉ [torben.jennert@tu-braunschweig.de](mailto:torben.jennert@tu-braunschweig.de)

☎ +49 531 391 9732

PROJEKTPARTNER

**HIU, Ulm**  
**RWTH, Aachen**  
**ZSW, Ulm**

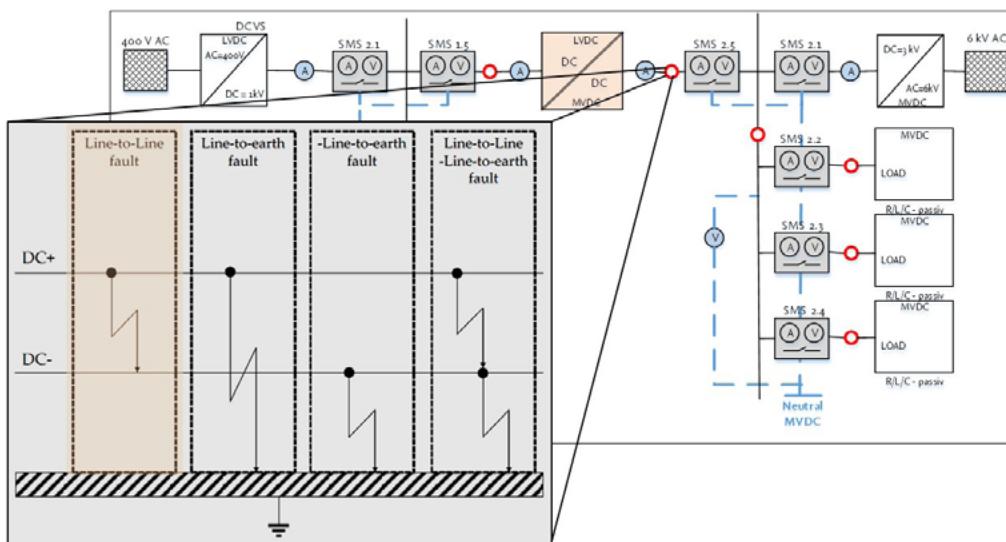
GEFÖRDERT DURCH



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

KOORDINIERT DURCH

**Helmholtz-Institut Ulm**  
**Elektrochemische Energiespeicherung**  
 (JunProf. Dr.-Ing. Helge S. Stein)



## Smart Modular Switchgear II

### Modulares Schutzsystem zur selektiven Fehlerabschaltung in Mittelspannungs-Gleichstrom-Netzkonfigurationen

Neben der DC-Übertragung (HGÜ) ergeben sich derzeit sowie zukünftig weitere Anwendungen der DC-Technologie. Zu nennen sind hier vor allem: Serverfarmen, Industrienetze, Übertragungsnetze und Gebäudenetze. Im Forschungsprojekt Smart Modular Switchgear II (SMS II) werden die Themenbereiche Schutztechnik, Schaltgeräte und Netzverhalten bearbeitet. Für die Untersuchungen der zukünftigen DC-Netzstrukturen wird ein Demonstrationsnetz mit mehreren Spannungsebenen aufgebaut. Mit diesem können verschiedenen Netztopologien nachgebildet werden. Die entwickelte Schutztechnik und die Schaltgeräte werden an diesem Aufbau getestet. Die Rückwirkungen der Netzdynamik auf das Schaltverhalten und die Fehlerdetektion werden im Zuge dessen ermittelt. Das Demonstrationsnetz ist als bidirektionale Übertragungsfunktion zwischen Schutztechnik und Schaltgerät zu verstehen. Zukünftig wird für die Untersuchung von ausgedehnten DC-Netzstrukturen ein PHIL-Labor im skalierten Maßstab aufgebaut.

Das Projekt SMS-II wird im Jahr 2024 abgeschlossen. In der ersten Projekthälfte (2019–2020) wurden diverse Fragestellungen und Entwicklungen im Bereich 1 kV

bearbeitet. Folgende Meilensteine und Forschungsergebnisse sind erzielt worden:

- 1.) Prüfung von 1 kV-Hybridschaltern
- 2.) Aufbau, Verifizierung und Validierung einer Simulation für einen DC-DC-Wandler mit dual active Bridge
- 3.) Auswahl und Qualifizierung eines geeigneten Messmittels zur Untersuchung der emittierten EMV-Störungen eines DC-Netzes
- 4.) Design, Kalibrierung und Implementierung von 1 kV Spannungssensoren
- 5.) Errichtung, Inbetriebnahme, elektrische Vermessung und Charakterisierung von diversen Betriebsfällen des 1 kV DC-Demonstrationsnetzes
- 6.) Anbindung des 380 V SMS-I DC-Netzes
- 7.) Errichtung eines Systemprüfstandes zur Verifizierung des Schutzsystems
- 8.) Validierung des Schutzsystems für zwei Spannungsebenen im Demonstrationsnetz (380 V, 1 kV)

Im zweiten Projektabschnitt (2021–2023) lag der Fokus auf der Erweiterung des Demonstrationsnetzes und der Ertüchtigung

sämtlicher Peripherie für die 3 kV-Ebene. Folgende Ziele wurden erreicht:

- 1.) Definition von Schaltgerätetopologien für MVDC Netze
- 2.) Definition einer MVDC-Netztopologie mittels simulativ gestützter Voruntersuchungen
- 3.) Entwurf, Aufbau und Untersuchung eines 3 kV-Hybridschaltgerätes
- 4.) Wiederinbetriebnahme und Aufrüstung des 6 kV Mittelspannungsabganges am elenia zur Versorgung der MVDC-Netzebene
- 5.) Planung, Entwurf und Umsetzung einer Leitwarte zur Steuerung der Laborkomponenten
- 6.) Aufbau MVDC AFE für +/- 1,5 kV und zugehöriger Kühlung

Der Aufbau des 3 kV-Netzes, sowie die Anpassung der Messtechnik werden bis zum Ende des Jahres abgeschlossen sein. Anschließend wird das Schutzsystem im Demonstrationsnetzverbund (1 kV, 3 kV) validiert. Die Erkenntnisse der abgeschlossenen Arbeitspakete werden in den nachfolgenden Teilabschnitten erläutert.

**Schutztechnik**

Im bisherigen Projektverlauf wurde ein modulares Schutzkonzept zur Identifizierung, Lokalisierung, Klassifizierung und selektiven Abschaltung von Stromfehlern in DC-Netzen bei Nennspannungen bis 1 kV und untersucht und stetig weiterentwickelt. Dabei wurden verschiedene Netztopologien betrachtet, welche sich bspw. auch durch unterschiedliche Spannungsebenen und deren Kopplung mittels DC-DC-Wandlern auszeichnen. Das Konzept des Schutzsystems beruht auf der permanenten Überwachung des Systemzustandes mittels Spannungs- und Stromsensoren, welche an den im Netz verwendeten Schaltgeräten installiert sind. Die Daten der Sensoren werden in einer zentralen Schutzeinheit zusammengeführt bevor dort über einen FPGA-Controller weitere, abgeleitete Größen aus den Messwerten berechnet werden. Die gemessenen und berechneten Größen dienen der Entscheidungsfindung des Schutzalgorithmus. Abhängig von der dynamischen Zustandsänderung des Demonstrationsnetzes, werden unterschiedliche Einschätzungen des aktuellen Status durch die Schutzeinheit vorgenommen und ggf. Handlungsanweisungen in Form von Schaltbefehlen an die Schaltgeräte weitergeleitet, um möglichst selektiv eine Fehlerklärung durchzuführen.

Die dezentrale Anwendung des Schutzalgorithmus auf verteilten Controllern war ein wesentlicher Meilenstein der ersten Projekthälfte. Das System wurde auch für die 3 kV-Ebene weiterentwickelt und zum Projektabschluss in dieser validiert.

**Demonstrationsnetz**

Der multispannungslevel-DC-Demonstrator ist modular und bidirektional gemäß Tabelle 1 und Abbildung 2 aufgebaut. Durch eine variables Stecksystem können auf der LVDC-Ebene Netzstrukturen frei verschaltet werden. Für die Qualifizierung des genannten Schutzsystems für die MVDC-Ebene wurde eine Anforderungsanalyse durchgeführt. Darauffolgend wurden ausgewählte Systemzustände untersucht, um eine effiziente (Design of Experiments) Parametrisierung des Schutzsystems vorzunehmen. Die dadurch ermittelte Kennlinie der Fehlergrößen erlaubt es, das Schutzsystem effizient auf diverse Netztopologien einzustellen.

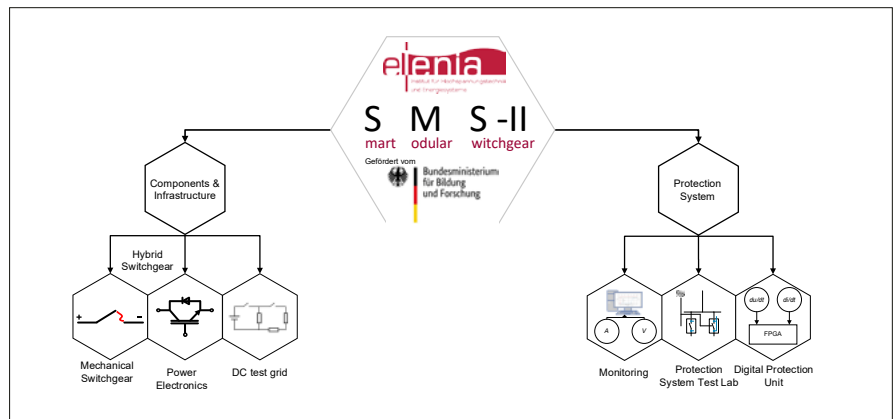


Abbildung 1: Projektschwerpunkte Smart Modular Switchgear II

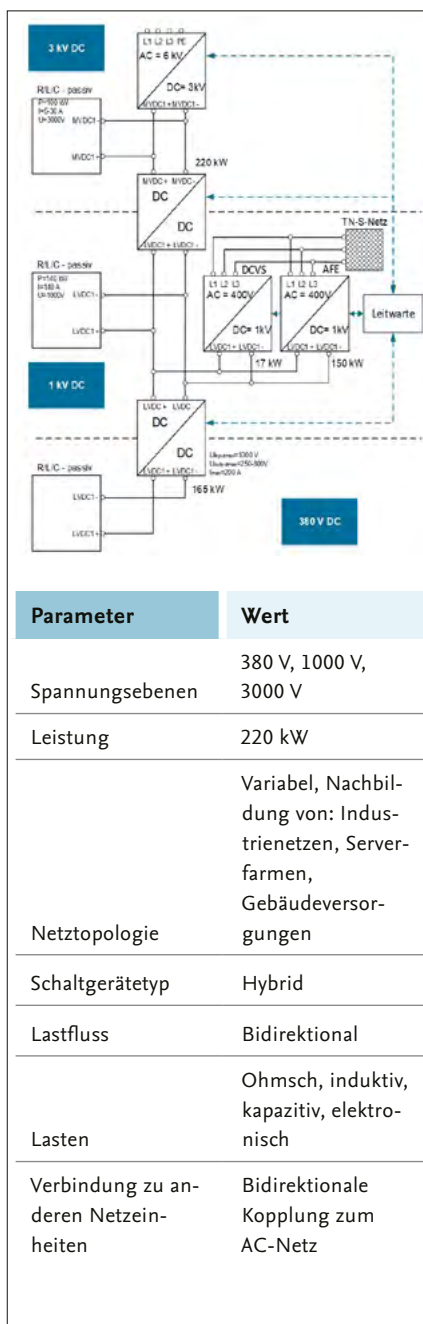


Abbildung 2: Blockschaltbild und Kenndaten des Demonstrationsnetzes

PROJEKT



**Smart Modular Switchgear II**

LAUFZEIT

2019–2024

ANSPRECHPARTNER / KONTAKT

Lars Claaßen

✉ l.claassen@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391 9715

PROJEKTPARTNER

**E-T-A Elektrotechnische Apparate GmbH, Physikalisch Technische Bundesanstalt PTB, Siemens Energy AG, Phoenix Contact GmbH & Co. KG, IEMV, IMAB**

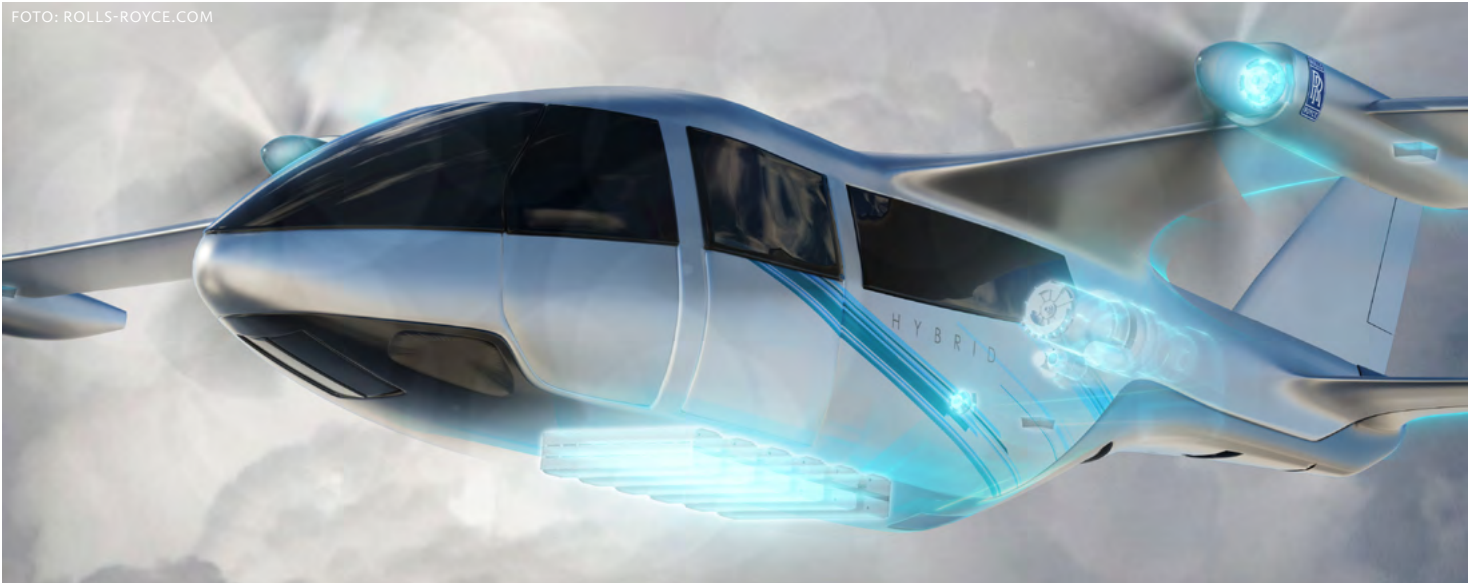
GEFÖRDERT DURCH



Bundesministerium für Bildung und Forschung

KOORDINIERT DURCH

**TU Braunschweig – elenia (L. Claaßen)**



# Elektrisches Flugzeug

## Sichere und zuverlässige Elektrische und Thermische Netzwerke für hybrid-elektrische Antriebssysteme

Um dem Klimawandel entgegenzuwirken, haben viele Länder, darunter auch EU-Länder, das Übereinkommen von Paris formuliert und unterzeichnet. Im Rahmen dieses Übereinkommens hat sich die EU verpflichtet, die Treibhausgasemissionen bis 2030 um mindestens 55 % unter das Niveau von 1990 zu senken und bis 2050 die Klimaneutralität zu erreichen. Die Umstellung auf eine nachhaltige und umweltfreundliche Luftfahrt ist ein wesentlicher Bestandteil der Erreichung dieses Ziels.

### ETHAN Projekt

Viele Projekte wie ETHAN, SE2A und MOBILISE haben Forschungen zu verschiedenen Arten von Elektroflugzeugen durchgeführt. Das Projekt ETHAN („Sichere und zuverlässige Elektrische und Thermische Netzwerke für hybrid-elektrische Antriebssysteme“) konzentriert sich auf die elektrischen und thermischen Systeme des Hybrid-Elektroflugs. In diesem Projekt arbeiten die TU Braunschweig, Rolls-Royce Deutschland, BTU, KIT, LUH, TU Darmstadt und TUM gemeinsam an der Entwicklung umweltfreundlicher und zuverlässiger Luftfahrtsysteme. An dem Projekt sind drei Institute der Technischen Universität

Braunschweig beteiligt. Dazu gehören das Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen (IMAB), das Institut für Hochspannungstechnik und Energiesysteme (elenia), und das Institut für Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV). Die Hauptaufgaben vom elenia Institut unterteilen sich in folgende drei Teile:

- 1.) Entwicklung eines elektrischen Netzwerkmodells
- 2.) Entwicklung eines Schutzsystems bzw. Schutzalgorithmus
- 3.) Validierung des Schutzkonzepts

Der Schwerpunkt liegt auf Hybridelektroflugzeugen auf Basis der CS23 (Certification Specifications 23, herausgegeben von der EASA). Es handelt sich um ein Zubringerflugzeug (englisch Commuter Aircraft) mit einer maximalen Passagierkapazität von neun Personen. Bei diesem Hybridelektroflugzeug werden mehrere Gasturbinen mit Elektroantrieben kombiniert, um die Treibhausgasemissionen zu reduzieren und den Flugkomfort und die Gesamteffizienz zu verbessern.

In diesem Projekt wird zunächst das elektrische Netzwerkmodell simuliert. Bei

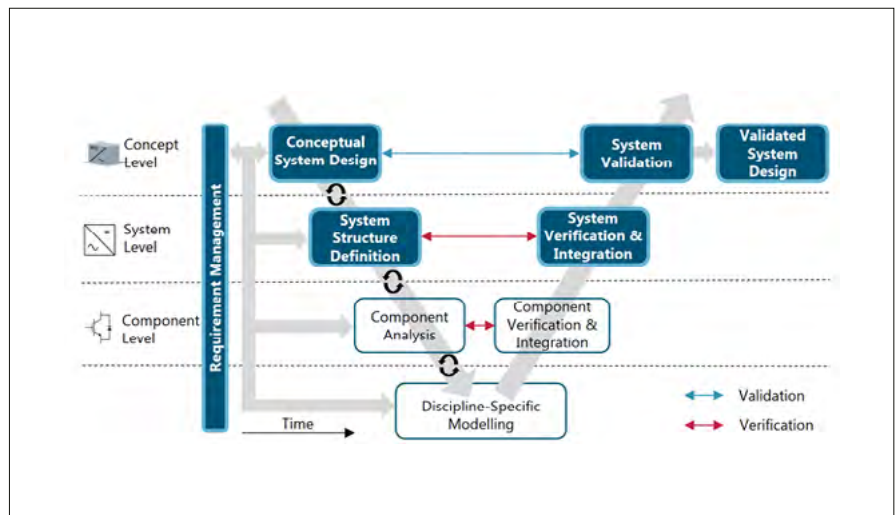


Abbildung 1: V-Modell, Foto: TU Braunschweig, Melanie Hoffmann

der weiteren Entwicklung von Schutzkonzepten für Bordnetze wird modellbasiertes Systems Engineering (MBSE) eingesetzt. Das V-Modell kann diesen Vorgang sehr gut veranschaulichen (siehe Abbildung 1)

Derzeit ist die Simulation des elektrischen Netzwerkmodells abgeschlossen. Basierend darauf werden die Fehlerfälle analysiert und die Anforderungen an das Schutzsystem ermittelt. Dabei werden die Anforderungen an Kosten, Gewicht, Volumen, Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Wartbarkeit und Sicherheit als zentrale Punkte besprochen, analysiert und festgelegt. Anschließend werden entsprechende Schutzsysteme jeweils auf Konzept-, System- und Komponentenebene entwickelt. Verschiedene Schutzsystemstrategien werden verglichen und die am besten geeignete ausgewählt. Für diese Strategie wird dann die Topologie des Schutzsystems auf Systemebene ermittelt und im elektrischen Netzwerk integriert. Die Komponenten wie beispielsweise Mess-, Schutz- und Steuergeräte werden dann entsprechend ausgewählt bzw. entwickelt. Danach wird das gesamte elektrische Bordnetz, das aus der Simulation und den Hardwaregeräten (z. B. Hybridschaltern) besteht, durch Echtzeitsimulator und HIL-System getestet. Damit wird überprüft, ob das Systemdesign den Anforderungen entsprechen.

Da es keinen Stromnulldurchgang gibt, kann der beim Ausschaltvorgang entstehende Störlichtbogen im Gleichstromsystem nicht automatisch gelöscht werden. Dies ist eine Herausforderung für Schutzsysteme. Daher ist die Untersuchung des Lichtbogens auch ein Schwerpunkt bei der

Entwicklung von DC-Schutzsystemen. Bei Leistungstests von Schutzkomponenten (z. B. Schaltern) wird eine Niederdruckkammer eingesetzt, um den Luftdruck der Flugumgebung zu simulieren (siehe Abb. 2).

Der Luftdruck in der Niederdruckkammer wird durch eine Vakuumpumpe gesteuert. Auf einer Seite der Kammer befindet sich ein Sichtfenster. Durch das Sichtfenster wird eine Hochgeschwindigkeitskamera auf den Schalter gerichtet, um die Lichtbogenbewegung während des Ausschaltvorgangs aufzuzeichnen (siehe Abbildung 3).

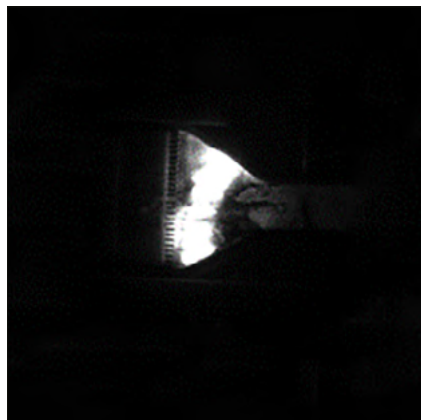


Abbildung 3: Lichtbogen beim Ausschaltvorgang (aufgezeichnet mit Hochgeschwindigkeitskamera)

**Software**

PSCAD, Simulink und Enterprise Architect sind drei häufig verwendete Tools in diesem Projekt. Das elektrische Netzwerkmodell ist in MATLAB/Simulink und PSCAD simuliert. Als Modellierungswerkzeug für die Systementwicklung wird Enterprise Architect bei der Entwicklung von Schutzsystemen eingesetzt.

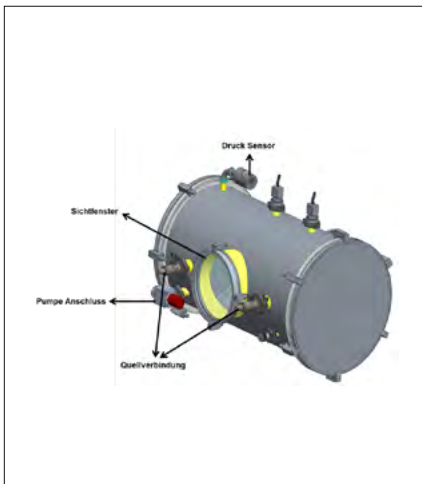


Abbildung 2: Niederdruckkammer, Quelle: Tobias Kopp



Abbildung 4: Tools, Quelle: mathworks.com, pscad.com, sparxsystems.de

PROJEKT

**ETHAN**

LAUFZEIT

**2022–2024**

ANSPRECHPARTNER / KONTAKT

**Fanke Zeng**

✉ f.zeng@tu-braunschweig.de

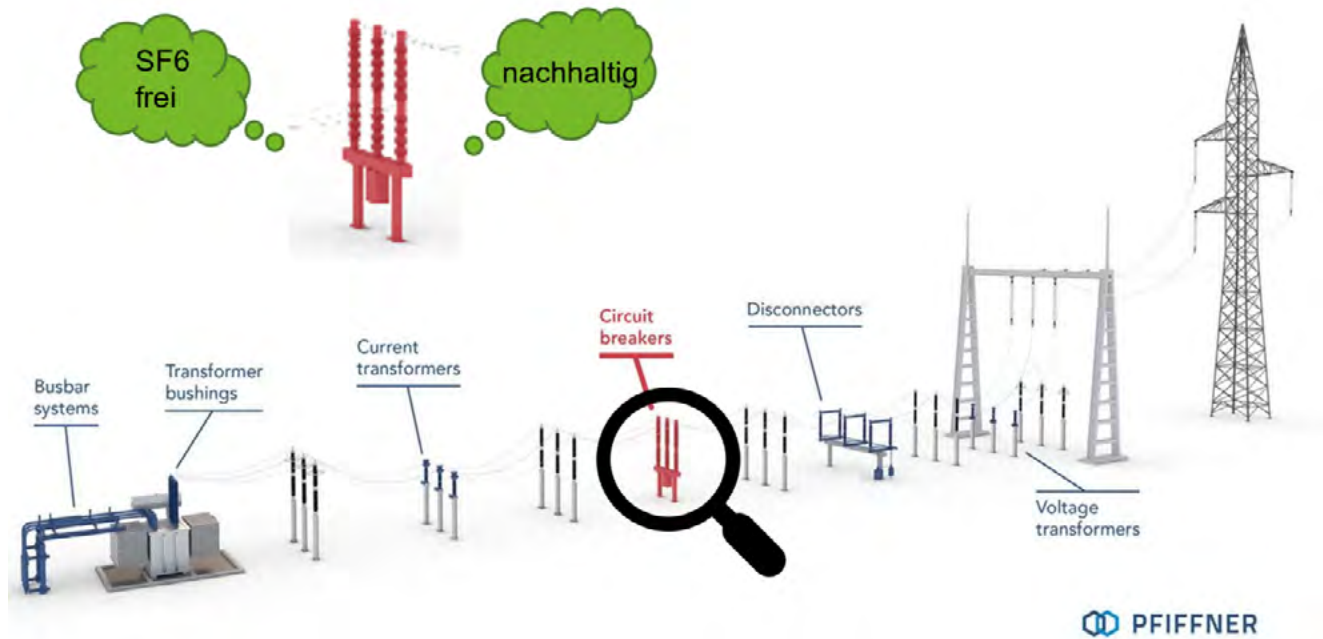
☎ +49 531 391 9736

PROJEKTPARTNER



GEFÖRDERT DURCH





## Hochspannungsschalter der Zukunft

### Warum ein flouergasfreier Leistungsschalter in der Hochspannungstechnik sinnvoll ist

SF<sub>6</sub> bietet in der Energietechnik hervorragende elektrische Eigenschaften, ist jedoch extrem klimaschädlich mit einem CO<sub>2</sub>-Äquivalent von 25.184. Angesichts steigender Nachfrage, insbesondere durch den Netzausbau für erneuerbare Energien, entwickelt das elenia Institut für Hochspannungstechnik und Energiesysteme an der TU Braunschweig mit der PFIFFNER-Gruppe flouergasfreie Leistungsschalter für den Hochspannungsbereich. Diese sollen SF<sub>6</sub> ersetzen und umweltfreundlichere Lösungen bieten, um die negativen Klimaauswirkungen zu minimieren. Damit wird ein wichtiger Beitrag zur Nachhaltigkeit in der Energietechnik geleistet.

Wesentlicher Bestandteil des Projektes die bisher bearbeitet wurden sind thermische und dielektrische Untersuchungen des Löschgases, entsprechend erfolgt die Gliederung dieses Berichtes.

#### Thermische Untersuchungen des Prüfgases

Als ein Teil der Untersuchungen soll die thermische Löschkraft der zu untersuchenden Gase charakterisiert werden. Dazu wird der Prüfaufbau der Dissertation von Dirk Bösche (siehe Seite 99) in abgewandelter Form verwendet. Der Aufbau ermög-

licht die Untersuchung der Wiederverfestigung des Gases bzw. der Schaltstrecke bei variabler Einstellung des Kontaktabstandes, der Belastungsdauer und der Belastung der Schaltstrecke. Dabei können die Versuche unabhängig von den Eigenschaften des Antriebs durchgeführt werden. Über eine entsprechende Prüfschaltung können dann Verfestigungsgeschwindigkeiten bei verschiedenen Bedingungen verglichen werden. Dadurch ist es möglich, das Verhalten verschiedener Gase und Drücke auf die

thermische Verfestigung der Schaltstrecke qualitativ zu charakterisieren.

Es soll untersucht werden wie die Drücke verschiedener Prüfgase die thermische Verfestigung beeinflussen. Der Aufbau muss entsprechend um ein Prüfgefäß erweitert werden, in welches das Schaltgerät eingebaut werden kann. In Zusammenarbeit mit einem externen Hersteller wurde ein Gefäß konfiguriert entsprechend der im Projekt festgelegten Anforderungen entworfen (siehe Abbildung 1).

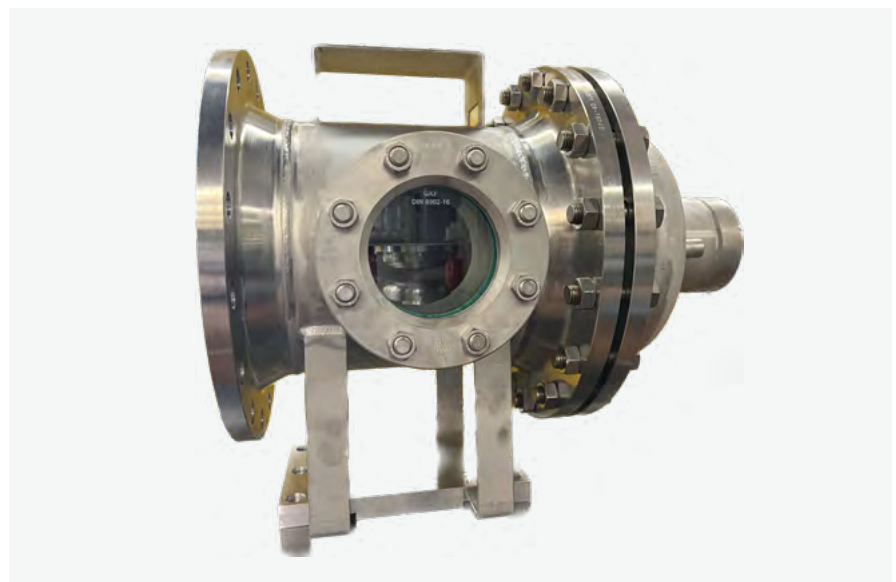


Abbildung 1: Prüfaufbau AP2, Foto: TU Braunschweig, Patrick Vieth





Titelbild: Einsatzgebiet der Leistungsschalter im Hochspannungsbereich. Bildnachweis: Pfiffner Group/Tiedemann/Vieth

Ein Schauglas ermöglicht die Nutzung einer Hochgeschwindigkeitskamera, um das (Rest)Plasma während des Versuches zu untersuchen. Über diverse elektrische Durchführungen kann der Prüfaufbau im inneren kontaktiert werden. Über die Gasdurchführungen kann der Behälter evakuiert werden um die Umgebungsluft zu entfernen. Anschließend kann über eine Gasflasche das Prüfgas bei Drücken bis zu 11 bar eingeleitet werden und Versuche durchgeführt werden. Ein Sicherheitsventil und Manometer ermöglichen die Einstellung des Drucks ohne die Betriebsgrenzen zu überschreiten.

### Dielektrische Untersuchungen des Prüfgases

In einem weiteren Teil des Projektes sollen die dielektrischen Eigenschaften der Prüfgase genauer betrachtet werden. Dabei soll vor allem die Durchschlagsfestigkeit der unterschiedlichen Gase bei verschiedenen Drücken, Elektrodenabständen und Elektrodenoberflächen bestimmt werden. So soll festgestellt werden, welches der zu untersuchenden Prüfgase die beste Alternative für einen flourgasfreien Leistungsschalter darstellt.

Um die Durchschlagsfestigkeit der Gase bei verschiedenen Drücken untersuchen zu können, wird ein Druckgefäß verwendet, in das eine variierbar verschraubte Elektrodenanordnung eingebracht werden kann (siehe Abbildung 2). Durch die Verschraubung der Elektroden könne verschiedene Elektrodenabstände eingestellt werden. Das Druckgefäß ist größtenteils durchsichtig, sodass es optisch möglich ist, einen Durchschlag zwischen den Elektroden von einem Überschlag am Gefäß zu unterscheiden. Nach dem Einbau oder einer Veränderung des Abstandes der Elektroden ist in dem Gefäß ein Rest normaler Umgebungsluft vorhanden. Um den Einfluss dieser Restluft oder von vorherigen eingefüllten Gasgemischen auf die Messungen zu minimieren, kann über einen Gasanschluss das Gefäß evakuiert werden. Über den gleichen Anschluss wird anschließend das Prüfgas in das Prüfgefäß geleitet. Der Druck im Gefäß kann dabei durch ein Manometer überprüft

werden. Ein Überdruckventil am Boden des Gefäßes verhindert das Überschreiten der Druckgrenzen. Zum Abschluss eines Versuches kann das Prüfgas über einen Schlauch ins Freie geleitet werden. Sowohl bei den Messungen der thermischen als auch bei den Messungen der dielektrischen Untersuchungen wird ein System mit Messsatelliten genutzt, die die Messergebnisse über Lichtwellenleiter ans Messpult weiterleiten. So kommt eine galvanische Trennung vom Messaufbau zustande.



Abbildung 2: Prüfaufbau AP3, Foto: TU Braunschweig, Laura Tiedemann

In einem ersten Schritt der dielektrischen Untersuchungen werden die Prüfgase mit einer Blitzstoßspannung belastet. Für die Erzeugung der Blitzstoßspannung wird in der Hochspannungshalle des elenia eine zweistufige Schaltung nach Marx genutzt. In einem nächsten Schritt sollen die verschiedenen Prüfgase mit weiteren Spannungsformen belastet werden.

#### PROJEKT

**PEEL**

#### LAUFZEIT

**2023–2025**

#### ANSPRECHPARTNER / KONTAKT

**Patrick Vieth**

✉ p.vieth@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391 9725

**Laura Tiedemann**

✉ laura.tiedemann@

tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391 7736

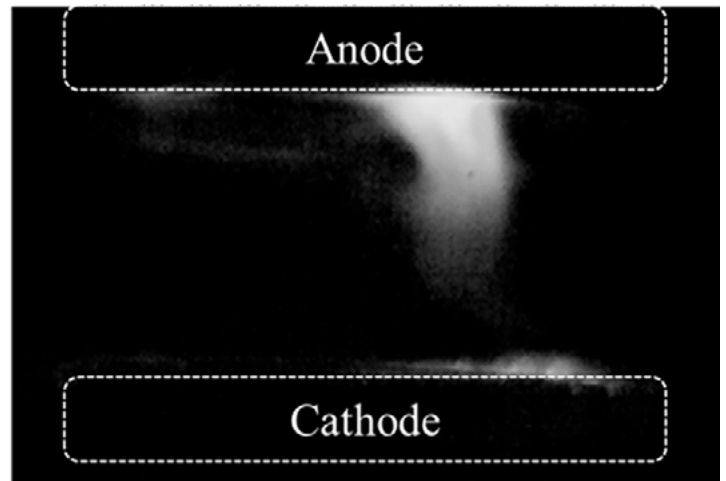
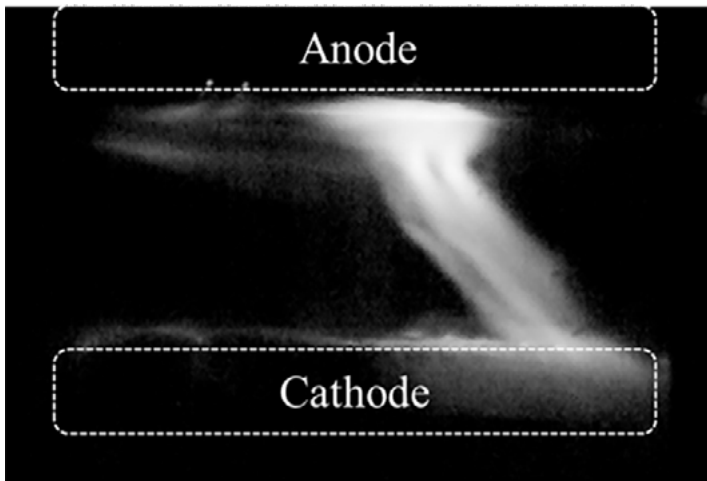
#### PROJEKTPARTNER



**Pfiffner Messwandler AG**

#### GEFÖRDERT DURCH

**Industrieprojekt (Pfiffner)**



## Grundlagenforschung an Vakuum-Leistungsschaltern für zukünftige Anlagen

### Als SF6-freier Leistungsschalter hat der Vakuumschalter Potential für den Einsatz in der Hochspannung, wir tragen dazu bei!

Da das weit verbreitete Isolier- und Schaltgas Schwefelhexafluorid (SF<sub>6</sub>) ein Treibhauspotenzial von 23.500 mal CO<sub>2</sub> hat, ist die Energietechnik bestrebt dieses zu ersetzen. Neben alternativen Gasen und technischer Luft kommt als Ersatz auch Vakuum als Isolier- und Schaltmedium in Frage. Vakuum besticht vor allem durch die Klimaneutralität und Wartungsfreiheit von Vakuumschaltgeräten. Aufgrund dieser Vorteile steigt der Anteil von Vakuumschaltanlagen in der Mittelspannung seit Jahren an. Unsere Forschung trägt durch das bessere Verständnis einzelner Aspekte zur Entwicklung von Hochspannungs-Vakuum-Leistungsschaltern bei.

#### Dielektrik

Die degressive Charakteristik der elektrischen Festigkeit des Vakuums über den Abstand macht es schwierig, die Vorteile der Vakuumschalttechnik auch im Hochspannungsbereich zu nutzen. Daher ist die elektrische Festigkeit von Vakuum-Leistungsschaltern ein wichtiges Forschungsgebiet. Neben der übermäßigen Vergrößerung des Abstandes wird die Reihenschaltung mehrerer Vakuumschalter als Möglichkeit für hohe Spannungen genutzt. Dabei ist der Spannungsverteilung besondere Auf-

merksamkeit zu widmen, da sich die Spannungsverteilung über der Reihenschaltung aufgrund von parasitären Kapazitäten verschiebt. Dies hat zur Folge, dass die Spannung über dem obersten Vakuumschalter höher ist als die über den Anderen. Um die Spannungsverteilung trotz der parasitären Kapazitäten im Gleichgewicht zu halten, werden Steuerkondensatoren eingesetzt. Am elenia wird die Verwendung von Feldsteuerungen aus Metallschirmen untersucht, die das elektrische Feld kapazitiv steuern.

#### Plasmaparameter

Neben den dielektrischen Beanspruchungen im offenen Zustand des Vakuumschalters ist auch die Beherrschung von höher werdenden Kurzschlussströmen und transienten Spannungen während der Ausschaltung zu gewährleisten. Das Ausschalten einer Schaltstrecke wird durch einen feststehenden und beweglichen Kontakt realisiert. Während das Auftreten eines Fehlers wird der bewegliche Kontakt vom feststehenden entfernt. Bei dieser Ausschaltung kommt es aufgrund der hohen thermischen Beanspruchungen durch den Kurzschlussstrom zum Aufschmelzen der Kontaktoberflächen und Metaldampf ver-

teilt sich im Inneren des Vakuumschalters. Durch die leitfähigen metallischen Partikel kommt es zur Entstehung eines Plasmasäule, dem sogenannten Vakuumbogen (siehe Titelbild). Durch das geometrische Kontakt-design der Schaltkontaktstücke wird dieser Bogen aufgrund von magnetischen Kräften in eine Rotationsbewegung geführt und die Kontaktstücke werden gleichmäßig abgenutzt. Am elenia werden TMF-Kontakte (Transversal Magnetische Felder) untersucht, die im Mittelspannungsbereich stark verbreitet sind. Um diese auch für höhere Spannungsbereichen einsatzfähig zu machen, gibt es unterschiedlichen Forschungs- und Entwicklungsansätze. Wir untersuchen hohe Kontakthöhe bis 45 mm und die Ausschaltung von zwei Vakuumschaltern in Reihe. Dabei wird das Bogenverhalten während der ganzen Ausschaltung mit einer High-Speed-Kamera (s. Abbildung 1) beobachtet und mit gemessenen elektrischen Parametern verglichen, um eine möglichst detaillierte Aussage über das Plasmaverhalten zu erhalten. Die Entstehung und anschließende Löschung des Plasmas wird erforscht, um eine gute Schalterperformance auch für höhere Spannungsebenen zu ermöglichen.

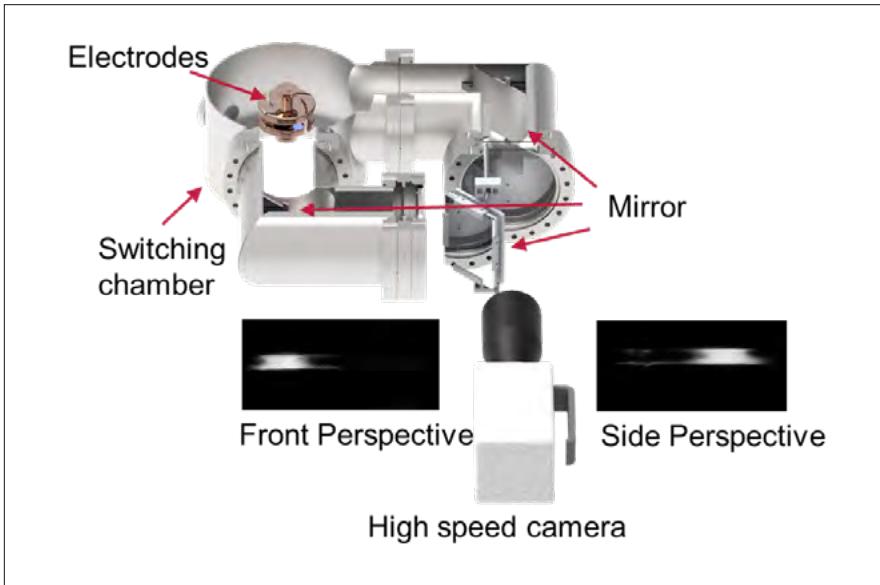


Abbildung 1: schematischer Aufbau der optischen Vakuumbogenbeobachtung mit der High Speed Kamera

### Bogenanalyse

Während der Ausschaltuntersuchungen kann der Vakuumbogen auf zwei unterschiedliche Arten beobachtet werden. Am elenia wird die Beobachtung des Bogens durch eine High-Speed-Kamera ermöglicht und mit entsprechender Spiegelanordnung in eine 3D-Darstellung nachgebildet (s. Abbildung 1). Unser Projektpartner, das Fachgebiet Hochspannungstechnische Betriebsmittel und Anlagen an der TU Darmstadt setzt verteilt um die Kammer Hall-Sensoren ein (s. Abbildung 2). Die Ausschläge auf den Hall-Sensoren zeigen die Lokalität des Vakuum Bogens auf. Diese beiden Methoden werden in einem DFG geförderten Projekt mit einander verglichen und verifiziert. Dabei werden bspw. Parameter wie Bogenge-

schwindigkeit und Anzahl von Bogenrotationen untersucht wie es in Abbildung 3 dargestellt wird. Zu sehen ist die Bewegung des Bogens beim Auseinanderziehen der Kontaktstücke.

Im Rahmen des Projektes wurde ein Modell-Schalter entwickelt, der gleichzeitig optische und magnetische Untersuchungen ermöglicht. Dadurch wurde zunächst das magnetische Messverfahren bestätigt. Anschließend tragen grundlegende Versuche zu einem besseren Verständnis des Lichtbogenverhaltens bei. Dieses Verständnis dient dann der Weiterentwicklung kommerzieller Vakuum-Leistungsschalter. Aufgrund der erfolgreichen Arbeit und Ergebnisse wurde das Projekt verlängert.

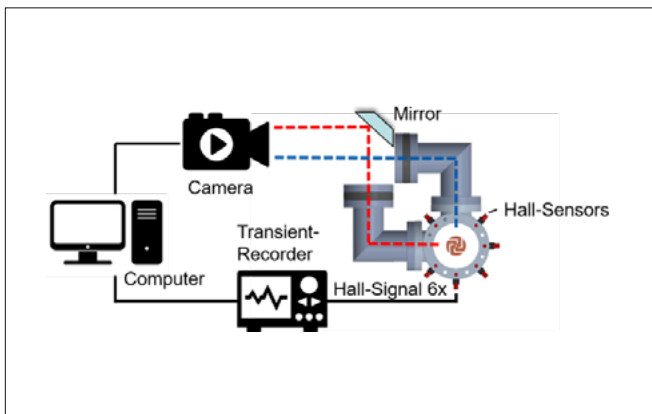


Abbildung 2: schematischer Aufbau der gleichzeitigen optischen und magnetischen Lokalisierung des Vakuum Bogens

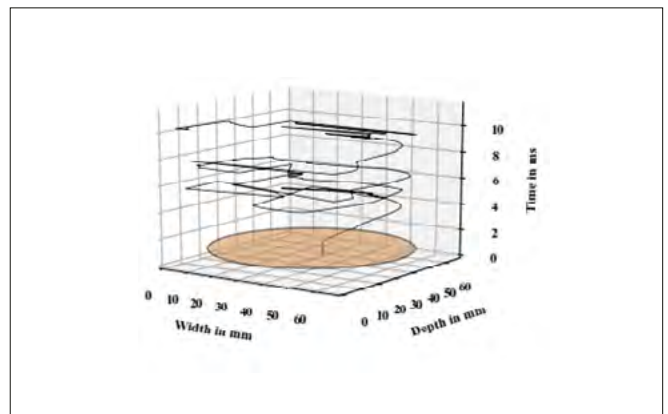


Abbildung 3: Bewegung des Vakuum Bogens beim Öffnen der Kontaktstücke unter Hochstrombelastung

#### PROJEKT

**MoLiboA**

#### LAUFZEIT

**September 2023 – Februar 2026**

#### PROJEKTPARTNER

**HST TU Darmstadt**

#### GEFÖRDERT DURCH



**Deutsche Forschungsgemeinschaft**

#### PROJEKT

**EUDo, EUlaS & Dielektrik**

#### LAUFZEIT

**EUDo II & EUlaS:**

Januar 2021 – Dezember 2022

**EUDo III & Dielektrik:**

Januar 2023 – Dezember 2025

#### ANSPRECHPARTNER / KONTAKT

**Timo Meyer**

✉ timo.meyer@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391 9739

**Karen Flügel**

✉ k.fluegel@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391 7785

#### PROJEKTPARTNER





## Isolierstofftechnik

### Mit 3D-Druck in die Energietechnik

Rapid Prototyping ist eine Methode in der modernen Produktentwicklung. Mit additiven Fertigungsverfahren, wie zum Beispiel Fused Filament Fabrication (FFF), werden Prüfkörper Schicht für Schicht aus einem thermoplastischen Material gedruckt. Verbesserungen am Prüfkörper können direkt implementiert, gedruckt und erneut geprüft werden. Um diese Verfahren zu qualifizieren, werden am elenia verschiedene dielektrische Prüfungen an diesen Materialien durchgeführt.

Die Elektromobilität beschäftigt sich derzeit intensiv mit der Entwicklung und Erforschung von optimierten elektrischen Antrieben und den entsprechenden Technologien für zukünftige Mobilitätskonzepte. Insbesondere schnelle Spannungsanstiege und schnell schaltende Wide-Bandgap-Leiter stellen wesentliche Anforderungen an die Isolationssysteme in Elektroautos dar. Diese Anforderungen führen zu einer Überbeanspruchung des Isolationssystems. Um diese Einflüsse und Auswirkungen zu untersuchen, werden schnell herstellbare und leicht anpassbare Prüfkörper mit konstanter Qualität benötigt. Die Fused Filament Fabrication (FFF) könnte hierfür eine ge-

eignete Methode sein. FFF ist ein additives Fertigungsverfahren, bei dem ein thermoplastischer Kunststoff Schicht für Schicht zu Bauteilen ausgehärtet wird.

Der Herstellungsprozess erfolgt werkzeuglos und ohne Formen direkt auf Basis von CAD-Daten. Der Füllgrad, die Drucktemperatur, Musterfüllung und viele weitere Druckparameter können variiert werden, was die resultierenden dielektrischen Eigenschaften beeinflusst. Dies ermöglicht eine ressourcenschonende Produktion und optimales Bauteildesign. Die dielektrischen Eigenschaften verschiedener Materialien, die im FFF-Verfahren hergestellt werden, erreichen zwar noch nicht die dielektrischen Eigenschaften konventionell hergestellter Dielektrika, stellen jedoch eine Alternative dar, wenn die dielektrischen Eigenschaften eine untergeordnete Rolle spielen. Insbesondere für speziell gefertigte Bauteile, die konventionell nur mit großem Aufwand hergestellt werden können, können sie wichtig sein. Ein weiteres additives Verfahren, der Stereolithographie-Druck (SLA), hat den Vorteil, dass keine prozessbedingten Hohlräume entstehen, was zu einer wesentlich besseren Druckqualität

führt. Allerdings sind diese Standardharze nicht dielektrisch ausgelegt und weisen beispielsweise eine schlechtere elektrische Durchschlagsfestigkeit oder einen hohen Verlustfaktor auf.

#### Mit dem CT-Scan den Durchblick behalten

In Kooperation mit dem Institut für Angewandte Mechanik (IAM) wurde eine Reihe von Prüfkörpern mithilfe eines Mikro-CT gescannt. Die CT-Aufnahme zeigt deutlich die regelmäßig auftretenden Hohlräume in der Isolation, die während des Druckprozesses entstehen. Diese Hohlräume können erhebliche Ausmaße annehmen und sind auf die Druckeinstellungen zurückzuführen. Die gedruckte Schicht beginnt und endet jeweils an dieser Position, was zur Bildung dieser Fehlerquellen führt. Diese Fehler haben wiederum erhebliche Auswirkungen auf die dielektrischen Eigenschaften der Prüfkörper. Die Qualität des 3D-Drucks zeigt starke Schwankungen. Die CT-Scans bieten interessante Einblicke in die Struktur der Testobjekte und tragen dazu bei, den Druckprozess besser zu verstehen und weiter zu verbessern.

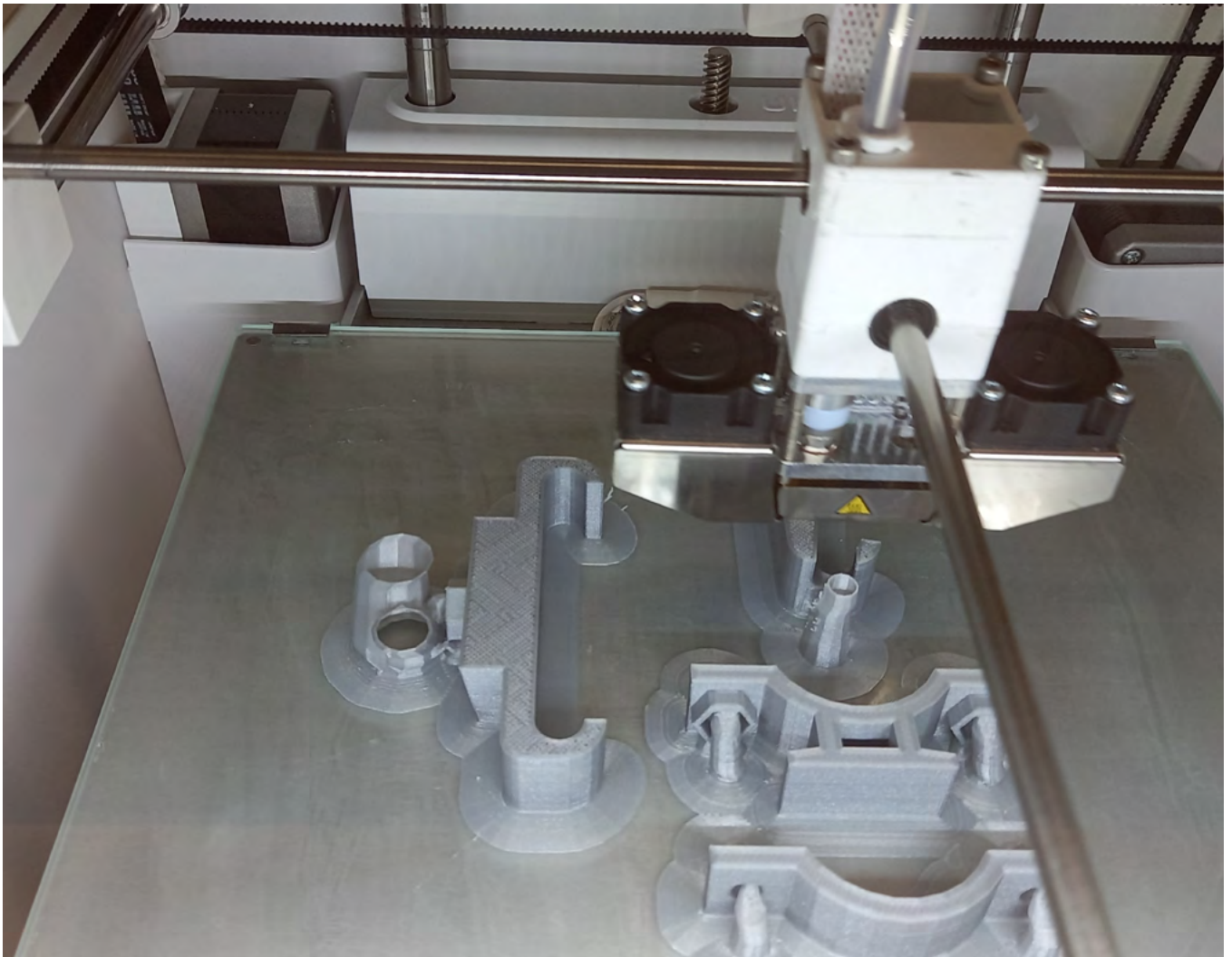


Abbildung 1: 3D-gedruckte Prüfkörper

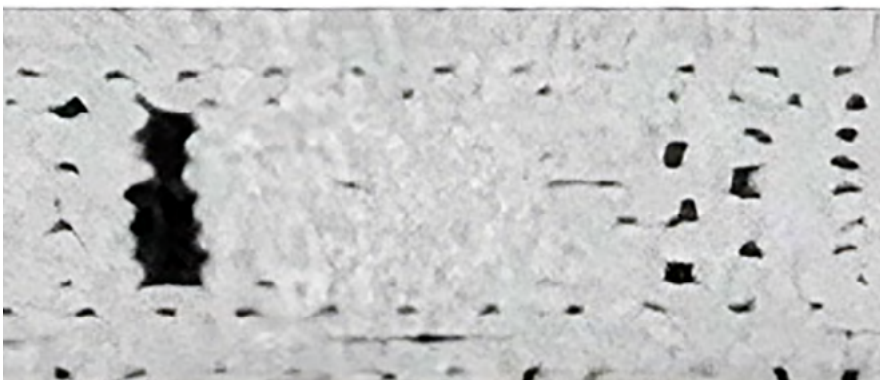
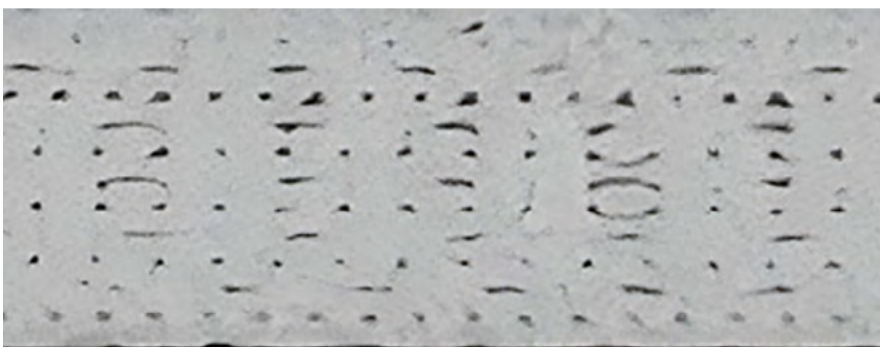


Abbildung 2: CT-Scan von 3D-gedruckten Prüfkörpern

PROJEKT

**Robuste Isoliertechnik**

LAUFZEIT

**November 2019 – laufend**

ANSPRECHPARTNER / KONTAKT

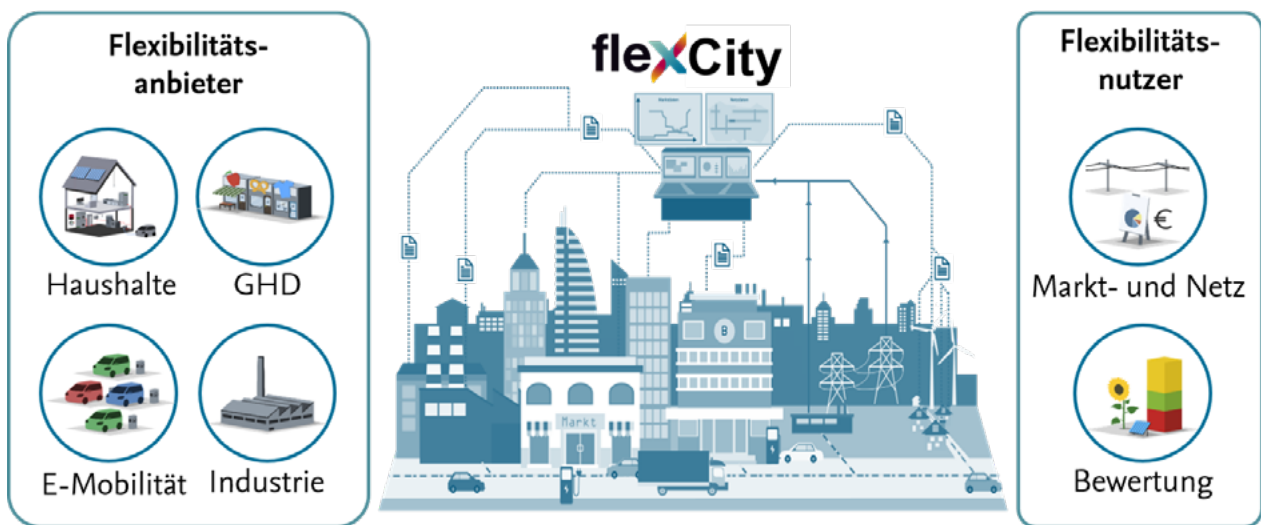
**Maik Kahn**

✉ [m.kahn@tu-braunschweig.de](mailto:m.kahn@tu-braunschweig.de)

☎ +49 531 391 7741

PROJEKTPARTNER

**Volkswagen AG – Group Innovation**



## flexess – Flexibilisierung des Energiesystems

### Entwicklung von Strategien und Lösungen zur Ausschöpfung zukünftiger Flexibilitätspotentiale

Die Energiewende und die damit verbundene Integration von erneuerbaren Energien in das Stromsystem bringen einen umfassenden Wandel in allen Bereichen der Energiebranche mit sich. Ein Schlüsselement zum Gelingen der Strom-, Wärme und Mobilitätswende ist der zielgerichtete Einsatz von Flexibilität, sprich die Veränderung von Einspeisung oder Entnahme der Wirkleistung in Reaktion auf ein externes Stromnetz- oder Preissignal.

#### Sektorenübergreifende Flexibilitätsbereitstellung

Für die Bereitstellung von Flexibilität werden die vier Fallstudien vollelektrische Haushalte, Gewerbe, Handel und Dienstleistungen, Industrieprozesse sowie Elektromobilität betrachtet. Neben potenziellen Anbietern von Flexibilitäten werden im Forschungsprojekt ebenfalls mögliche Flexibilitätsnutzer untersucht. Im Gegensatz zu den meisten verwandten Forschungsprojekten werden hierbei sowohl der netzorientierte Einsatz als auch die Vermarktung von Flexibilitäten an den relevanten Energiemärkten berücksichtigt. Die Teilsysteme werden mittels Co-Simulation in dem „flexCity“ genannten Gesamtsystem betrachtet.

#### Fahrplanbasierte Flexibilität

In flexess wurde ein fahrplanbasiertes Instrument entwickelt, um sektorübergreifend Flexibilität aus den genannten Fallstudien zu erschließen. Hierbei werden basierend auf den prognostizierten kostenoptimalen Residualleistungsverläufen (Referenzfahrplan) für den Prognosehorizont unter Berücksichtigung der technischen, regulatorischen und individualspezifischen Randbedingungen (Hüllkurve) alternative Fahrweisen (Alternativfahrpläne) der steuerbaren Anlagen bestimmt.

Die dabei entstehenden Kosten aufgrund eines erhöhten Netzstrombezugs oder Alterungseffekte, z.B. durch eine gesteigerte Anzahl an Vollzyklen des Batteriespeichers, werden als Fahrplankosten erfasst und dienen als Kostenbasis für die Vergütung der Flexibilität. Sämtliche Unsicherheiten, welche sich aus den Randbedingungen der Leistungsflussprognosen ergeben, können über einen probabilistischen Sicherheitsbeiwert mittels der Fahrpläne berücksichtigt werden.

Die Diskretisierung des Leistungsverschiebungspotentials in Form von Fahrplanscharren ermöglicht externen Flexibilitätsnutzern

eine bessere Planbarkeit sowie die Berücksichtigung von Nachholeffekten (Leistungsverschiebungen in Folge der ursprünglichen Leistungsänderung). Zudem bietet das standardisierte Produktdesign Vorteile bei der Aggregation von Flexibilitäten, was insbesondere für geringerer Leistungsklassen relevant ist, um Skaleneffekte zu nutzen. Darüber hinaus werden alle sensiblen Verbraucherdaten (z. B. Anwesenheitsprofile, Gerätespezifikationen) abstrahiert und die Entscheidung in welchem Umfang Flexibilität dritten Parteien zur Verfügung gestellt wird, verbleibt beim Betreiber der steuerbaren Anlage.

#### Analyse des Flexibilitätspotentials

Um die Aktualität und Bedeutsamkeit der Flexibilität zu verdeutlichen wurde zu Beginn des Forschungsprojektes fallstudien-spezifisch das aktuelle und zukünftige theoretische Potential zur Flexibilisierung bestimmt. Dieses auf Basis der Leistungsbereiche der steuerbaren Anlagen berechnete Potential spiegelt jedoch nicht die konkrete Flexibilität für die unterschiedlichen Nutzungsformen wieder, da technologische Rahmenbedingungen unberücksichtigt bleiben. Für die Bestimmung des praktischen, d.h. tatsächlich nutzbaren Po-

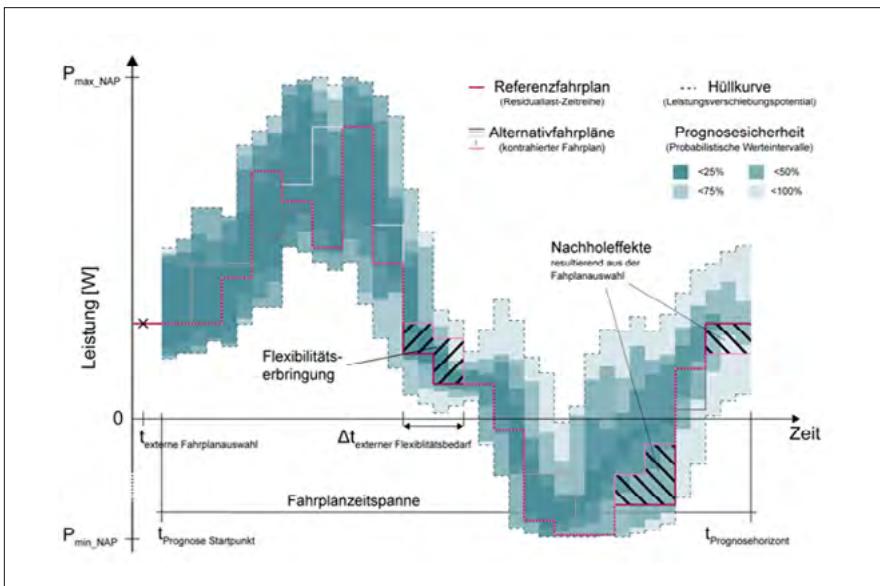


Abbildung 1: Schematische Darstellung fahrplanbasierter Flexibilitäten, eigene Darstellung

tentials wurden in flexess Modelle und fahrplanbasierte Flexibilisierungsalgorithmen für diverse Ausstattungsgrade bzw. Technologietypen entwickelt.

Das praktische Potential wurde durch die Darstellung als Heatmap veranschaulicht und damit auch für thematisch Außenstehende greifbar gemacht. Konsekutiv bietet die Darstellung als Barplot die Möglichkeit, nicht nur eine qualitative, sondern auch eine quantitative, zeitlich korrelierte Einordnung des Potentials in Folge einer Kontrahierung. Auf Anbieterseite lässt sich so auf einen Blick analysieren, wie die derzeit angebotene Flexibilität mit einer z. B. in der Vergangenheit erfolgten Nachfrage auf Nutzerseite optimal übereingebracht werden kann.

**Validierung im Feld- und Laborversuch**

Als funktionale Validierung für eine praktische Anwendbarkeit der Fahrplanmethodik wurde für die Fallstudie Haushalte im Energiemanagementlabor des elenias ein Demonstrator konzipiert und in Betrieb genommen. Dieser ermöglicht die Nachbildung des elektrisch-thermischen Verhalten von Haushalten. Mittels einem Simulink-Realtime basierten Rechensystems konnten die zuvor per linearer Optimierung berech-

neten Residuallastfahrpläne anlagenseitig disaggregiert und in Leistungsverläufe umgesetzt werden. Darüber hinaus begleitete das elenia in Zusammenarbeit mit dem Entwickler für Fuhrparkmanagementsoftware carano den Feldversuch bei den Berliner Verkehrsbetrieben. Anhand realer Buchungsdaten eines Flottenmanagementsystems konnten auf Basis verschiedener Ladestrategien Fahrplanscharen generiert und in Reaktion auf eine externe Fahrplanauswahl in Ladevorgänge umgesetzt sowie nachfolgend ihre Erbringung kontrolliert werden.

**Optimierter Einsatz von Flexibilität**

Die generierten Fahrplanschare ermöglichen Dritten die Flexibilität der unterschiedlichen Anbieter zu vergleichen und für eigene Nutzungszwecke zu kontrahieren. Im Forschungsprojekt wurden netz- und marktorientierte Anwendungen fokussiert. Für eine eindeutige Koordinationen zwischen den Netzbetreibern und Stromlieferanten/Flexibilitätsvermarktern wurde die Kommunikationsstruktur flexControl entwickelt. Diese steckt einen eindeutigen Rahmen für die Kontrahierung von Fahrplänen, deren Erbringungskontrolle und Abrechnungsmechanismen.

PROJEKT



flexess

LAUFZEIT

2019–2023

ANSPRECHPARTNER / KONTAKT

Mattias Hadlak

m.hadlak@tu-braunschweig.de

+49 531 391 9713

PROJEKTPARTNER

IWF, SMA, Carano, BVG, TLK, BS|NETZ, BS|ENERGY, REWE, GEWI, TransnetBW

GEFÖRDERT DURCH



Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

KOORDINIERT DURCH

TU Braunschweig – elenia

In Co-Simulationen konnte gezeigt werden, dass flexControl die gezielte Einsatzplanung unterstützt und konträre Signale von unterschiedlichen externen Nutzern unterbindet. Leistungsbedingte Netzengpässe, welche auf Grund der Elektrifizierung insbesondere in der Niederspannungsebene zukünftig auftreten können, konnten behoben werden. Für den marktorientierten Einsatz konnte ebenfalls gezeigt werden, dass durch die aggregierte Kontrahierung von Flexibilitäten die Beschaffung optimiert und damit die Kosten gesenkt werden können.

Sämtliche Ergebnisse zur Fahrplangenerierung, möglicher Erlöse und Kosten sowie die Konzepte zur Erbringungskontrolle und Abrechnungskonzepte werden im Abschlussbericht zusammengefasst und können über das TIB-Portal abgerufen werden.



## Intelligente Lösungen für MFH mit Energiespeichern

### Solar-Energie vor Ort erzeugen, speichern & teilen: mit gemeinsamer PV-Anlage, Speicher und Energiemanagementsystem

Energiespeicher sind für den Erfolg der Energiewende entscheidend, denn mit ihnen lässt sich vor Ort erzeugter Ökostrom flexibel nutzen. In Eigenheimen nimmt die Nutzung von Stromspeichern bereits zu. In Mehrfamilienhäusern (MFH) fehlen jedoch bislang die grundlegende Messtechnik und regulatorische Grundlagen zum Teilen von gespeicherter, lokal-erzeugter Energie. Konzepte zur Einbindung von PV-Speichersystemen in Mehrfamilienhäusern sind daher zwingend nötig.

Hürden bei der Umsetzung sind beispielsweise das Messstellenbetriebsgesetz und die technischen Richtlinien des BSI, die es durch Innovationen in der Messtechnik zu überwinden gilt. Denn beim Zugriff mehrerer Wohnparteien auf ein und denselben Stromspeicher muss stets exakt bestimmt und abgerechnet werden können, welche Strommengen durch welche Wohnpartei aus der häuslichen Stromerzeugungsanlage, dem Speicher oder aus dem öffentlichen Netz bezogen wurden. Diese Daten müssen eichrechtskonform erh-

oben und den relevanten Marktpartnern im Strommarkt zur Verfügung gestellt werden. Damit der günstigere, selbst erzeugte, grüne Strom künftig nicht nur im Eigenheim möglich ist, entwickelt das MELANI Projektkonsortium Konzepte zur Einbindung der Wohnungsnutzenden in die Energie- und Verkehrswende. Im Projekt sollen Fragen, wie sich eine gemeinsame Nutzung dezentraler Energieanlagen durch mehrere Akteure in Mehrfamilienhäusern technisch und energiewirtschaftlich realisieren lässt oder welche Geschäftsmodelle und Betriebskonzepte zur praktischen Umsetzbarkeit und zur Akzeptanz bei potentiellen Nutzern (Wohnungsnutzende, Energieversorger, Dritte) beitragen, geklärt werden.

#### Kernelemente des Projekts

Technische Innovationen wie die Entwicklung und Validierung mess- und abrechnungstechnischer Lösungen sowie zugehöriger Energiemanagement-Funktionen, IKT-Lösungen und Datendienste in Mehrfamilienhäusern stellen den Kernpunkt des mehrjährigen Forschungsprojekts dar. Die



Titelbild: Feldtestobjekt in Bielefeld, Foto: TU Braunschweig, Michel Meinert

Hauptaufgabe des elenia Instituts liegt dabei in der Entwicklung einer Daten- und Steuerungsplattform, die neben der Vernetzung sämtlicher Komponenten dazu dient, den Nutzenden eine Interaktionsmöglichkeit zu bieten. Dazu findet eine Sensibilisierung der Wohnungsnutzenden für ihr Verbrauchsverhalten durch Visualisierung statt. Darüber hinaus wird die Bewirtschaftung ihrer virtuellen Anlagenanteile ermöglicht, wodurch Anreize zu einer Änderung des Verbrauchsverhaltens gegeben werden können.

#### Entwicklung eines innovativen Energiemanagementsystems

Das oben genannte zentrale Element des Forschungsprojektes ist die Umsetzung einer zentralen Daten- & Steuerungsplattform, welche bereits fertiggestellt werden konnte. Sie enthält das Energiemanagementsystem (EMS) zur Steuerung von Komponenten und damit auch von Leistungsflüssen.

Um den speziellen Anforderungen des MELANI-Konzepts gerecht zu werden, wurde ein Python-basiertes Energiemanagementsystem entwickelt. Anforderungen sind hierbei unter anderem die Aufteilung physischer Speicher- und Erzeugungsanlagen in virtuelle Bestandteile sowie die Möglichkeit für die Wohnungsnutzenden Handel mit diesen zu betreiben. Zur Vermeidung einer Überlastung des Netzanschlusses wurde außerdem ein dynamisches Lastmanagement in das EMS integriert. Simultan ist ein konventionelles EMS programmiert worden, welches während der Versuchslaufzeit als Vergleichsobjekt dienen soll und im baugleichen Referenzgebäude laufen wird.

#### Intensive, erfolgreiche Tests im Labor

Um das eigens programmierte System zu validieren, erfolgte der Aufbau eines Demonstrators im Energiemanagementlabor des elenia Instituts. Dort wurden gemeinsam mit der PTB Tests des Gesamtkonzepts umgesetzt und die Integration der Rechen-einheit erfolgte. Im Vordergrund stand die fehlerfreie Kommunikation zwischen den verschiedenen Schnittstellen. Dazu gehört zum einen eine von Naturstrom entwickel-



te API (Programmierschnittstelle), in die verschiedene Werte zur Visualisierung für Wohnungsnutzende geschrieben werden können. Des Weiteren wurde eine umfangreiche Kommunikation zur Recheneinheit aufgebaut, um die Abrechnungswerte korrekt erstellen zu können. Dabei werden berechnete Leistungswerte aus dem EMS an die Recheneinheit übermittelt.



Abbildung 1: Elektronische Lasten, Foto: TU Braunschweig, Nils Hartau

Auch die Ansteuerung der einzelnen Komponenten wie beispielsweise der Ladesäule oder des Batteriespeichersystems (bestehend aus Batteriespeicher & -wechselrichter) und die Logiken und Trigger einzelner Teile der Betriebsstrategien konnten im Labor des elenia Instituts erfolgreich getestet werden. Die Abbildung zeigt verschiedene flexible, elektronische Lasten, welche während der Tests als Nachbildung der Haushaltslasten fungieren.



Abbildung 2: Teil des Versuchsaufbaus im Energiemanagementlabor, Foto: TU Braunschweig, Nils Hartau

Darüber hinaus wurden für das EMS Sicherheitsmaßnahmen entwickelt, die ein automatisches Anlaufen nach Stromausfall

sicherstellen sowie eine automatische Backup-erstellung der erhobenen Daten ermöglichen. Letzte Tests, die die Genauigkeit der Abrechnungswerte sicherstellen und Fehler im Dauerbetrieb ausschließen sollen, erfolgten in den vergangenen Wochen und Monaten, sodass nun alles bereit ist für den bevorstehenden Feldtest im Quartier Grünwald in Bielefeld.

### Startschuss für den Feldtest im Mehrfamilienhaus

Zum Berichtszeitpunkt steht der Beginn des Feldversuchs kurz bevor. Im MELANI-Gebäude (siehe Titelbild) wird ab Oktober 2023 das zuvor im Labor getestete Energiemanagementsystem mit allen dazugehörigen Komponenten laufen. Die PV-Anlage auf dem Dach des Mehrfamilienhauses ist installiert, die Speicher sind bereit zur Nutzung und die 12 Wallboxen zum Laden der Elektro-Autos der Wohnungsnutzenden wurden in der Garage montiert. Um dies alles möglich zu machen, gab es im Vorfeld regelmäßigen Austausch zwischen dem Konsortium, mit dem Anlagenbetreiber, dem Bauträger und der ausführenden Firma vor Ort. Bei den Abstimmungsrundern ging es neben technischen Aspekten beispielsweise auch um vertragliche Angelegenheiten. Des Weiteren ist das Referenzobjekt als zweiter, identischer Gebäudeteil zum Berichtszeitpunkt nahezu fertiggestellt, sodass die Wohnungsnutzenden zeitnah einziehen können.

### Und dann?

Während des gesamten Feldtestzeitraums sollen relevante Daten in 1-sekündlicher Messwertauflösung erhoben und ausgewertet werden. Forschungsdaten in dieser Qualität sind bislang kaum öffentlich vorhanden, weshalb sie für das elenia Institut von besonderer Bedeutung sind. Nach Projektende sollen diese dann für weitere Forschungsvorhaben genutzt werden.

Durch das Projekt kann der Geschosswohnungsbau für die Speichernutzung im Zusammenspiel mit regenerativer Energieerzeugung und neuen Verbrauchern aus der Sektorenkopplung Mobilität und Wärme erschlossen werden und damit einem weiteren Teil der Bevölkerung wirtschaftlich attraktiven Zugang zu lokal erzeugtem, innovativ bewirtschaftetem und günstigem Strom und zur Elektromobilität zu verschaffen. So steuern die entwickelten, in-

#### PROJEKT



#### MELANI

#### LAUFZEIT

November 2020–April 2025

#### ANSPRECHPARTNER / KONTAKT

##### Marcel Lüdecke

✉ m.luedecke@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391-9726

##### Michel Meinert

✉ m.meinert@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391-9728

##### Tamara Beck

✉ t.beck@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391-7702

#### PROJEKTPARTNER

**Naturstrom AG, SMA Solar Technology AG, PTB Braunschweig**

#### WEBSEITE

[www.projekt-melani.de](http://www.projekt-melani.de)



#### GEFÖRDERT DURCH



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

#### KOORDINIERT DURCH

**Naturstrom AG**

telligenten Verfahren und Betriebsweisen im Rahmen der Energie-, Mobilitäts- und Wärmewende im Wohnungssektor einen positiven Beitrag bei, wodurch auch die Aufnahmefähigkeit der Verteilungsnetze im urbanen Raum gesteigert werden kann.



## Zukunftslabor Energie

### Co-Simulationsbasierte Energiesystemanalyse von Quartieren und Entwicklung einer kollaborativen Forschungsplattform

Die Digitalisierung ist ein weltweiter Megatrend, der in verschiedenen Branchen neue Funktionen und Prozesse ermöglicht und diese miteinander vernetzt. Digitalisierte Energiesysteme eröffnen die Möglichkeit, einen wesentlichen Beitrag zur erfolgreichen Umsetzung der Energiewende zu leisten, indem sie einen effizienteren und nachhaltigeren Betrieb ermöglichen.



Abbildung 1: Das ZLE auf der Hannover Messe 2023, Foto: elenia, Henrik Wagner

Allerdings führt die Digitalisierung im sicherheitskritischen Energiesystem gleichzeitig zu neuen Wechselwirkungen und sensiblen Abhängigkeiten. Um die Wechselwirkungen zwischen den funktional gekoppelten und vernetzten Bereichen und Technologien in digitalisierten Energiesystemen systematisch zu untersuchen, ist eine effizientere Vernetzung der Energiesystemforschung erforderlich. Es ist notwendig, verschiedene Fachdisziplinen besser zu integrieren und die Ergebnisse der Forschung leichter in die Praxis umzusetzen. Das *Zukunftslabor Energie (ZLE)* formuliert auf Basis dieser Problemstellungen zwei zentrale Forschungsziele: die Erforschung und Entwicklung digitalisierter Energiesysteme und die Digitalisierung der Energiesystemforschung und -entwicklung.

#### Forschungsziele des Zukunftslabors Energie

Das erste zentrale Forschungsziel im ZLE untersuchen die Forscher:innen in fünf verschiedenen Durchstichszenarien welche mehrere technische Komponenten des Energiesystems miteinander verknüpfen. Die Durchstichszenarien untersuchen die folgenden Schwerpunkte und Fragestellungen: Nutzung der Flexibilität in Energiesystemen zum Ausgleich netzkritischer

Ungleichgewichte von Erzeugung und Verbrauch; Einfluss von Störungen in Informations- und Kommunikationstechnologie; Netzaufnahmefähigkeit von Quartieren für *Elektromobilität, Energieversorgung von Gebäuden sowie den Netzbetrieb* in digitalisierten Energiesystemen.

Für das zweite zentrale Forschungsziel entwickeln die Forscher:innen des ZLE eine kollaborative Forschungsplattform, um Forschungs- und Entwicklungsinteressen im Energiesektor zu bündeln und Forschungstätigkeiten transparent zu machen. Dazu wurden sechs verschiedene Elemente konzipiert: *Kompetenz* zur Darstellung fachlicher Expertise; *Methoden* in Form von Best Practices erfolgreicher Methoden und Modelle; *Core* als Bereich grundlegender Funktionen und technischer Abläufe, *Repository* als digitales Archiv nutzbarer Simulations- und Datenmodelle, *Simulation* zur Veranschaulichung und Analyse digitalisierter Energiesysteme und *Transparenz* zur Veröffentlichung von Forschungsergebnissen.

#### Untersuchung der Netzaufnahmefähigkeit für Elektromobilität

Für das Durchstichszenario *Elektromobilität* wurde anhand des Quartiers „Am Ölper Berge“ in Braunschweig, Niedersachsen die Netzaufnahmefähigkeit für Elektrofahrzeu-



Abbildung 2: Prototyp der ZLE Forschungsplattform, Foto: elenia, Henrik Wagner

ge unter Berücksichtigung der EN 50160 Norm für Spannungsqualität untersucht. Zur Untersuchung wurde mittels des mosaik-Frameworks eine Open-Source Co-Simulation entwickelt. Diese Co-Simulation ermöglicht die Modellierung und Verknüpfung verschiedener Schlüsselkomponenten des abzubildenden Quartierenergiesystems, einschließlich Komponentenmodelle, Steuerungsmodelle, Netzberechnungen und Datenspeicherung. Anhand einer Simulationsstudie wurde die Erhöhung der Netzaufnahmefähigkeit durch nutzerseitige Verbesserungsmaßnahmen in Form von Anlagen zur kooperativen Erzeugung und Speicherung von Erneuerbaren Energien sowie Koordinations- und Steuerungsalgorithmen untersucht. Entsprechend der Open Science Declaration des ZLE sind alle in diesem Rahmen entwickelten Modelle und zugehörigen Daten frei zugänglich. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die Integration von regenerativen Energiekomponenten ohne Steuerung im Energienetz keine nennenswerten Synergieeffekte für die Netzintegration von Elektrofahrzeugen erzielt. Jedoch führt die Kombination dieser Komponenten mit einem intelligenten Netzregelungsalgorithmus welcher das Flexibilitätspotential des Quartiers nutzt und/oder Ladestrategien zu einer erheblichen Steigerung der Netzaufnahmefähigkeit für Elektromobilität.

### Entwicklung des Kompetenzelements für die kollaborative Forschungsplattform

Kompetenz ist Bestandteil der fünf grundlegenden Elemente der zu entwickelnden Forschungsplattform des ZLE, vgl. Titelbild.

Das Ziel des Plattformelements ist die Darstellung der vielschichtigen Kompetenzen im ZLEEnergieforschungsnetzwerk. Die Darstellung der Kompetenz auf der Forschungsplattform basiert auf vier verschiedenen Subelementen: Profile (en: Profiles), Forschungsnetzwerke (en: Research Networks), Forschungscluster (en: Research Cluster) und Forschungslandkarte (en: Research Map) wie in Abbildung 2 dargestellt.

Das Subelement Profil stellt die Forschungskompetenzen und Interessen der Mitglieder:innen des ZLE-Energieforschungsnetzwerks dar. Hierzu werden verschiedene Informationen verwendet, u. a. eine Kurzbeschreibung, zugehörige Forschungsprojekte und wissenschaftliche Veröffentlichungen. Das Subelement Forschungsnetzwerk gibt eine Übersicht über mögliche verortete Forschungsnetzwerke. Potentielle Nutzer:innen können somit unmittelbar über ihre Mitgliedschaft in einem solchen Netzwerk einen Anknüpfungspunkt an die ZLE-Energieforschungsgemeinschaft finden. Im Subelement Forschungscluster erfolgt eine Gruppierung



Abbildung 3: ZLE Mitarbeiter Henrik Wagner im Meet the Scientist Format im phaeno Wolfsburg, Foto: Hochschule Ostfalia Braunschweig, Tobias Lege

#### PROJEKT



#### Zukunftslabor Energie

#### LAUFZEIT

Oktober 2019 – März 2025

#### ANSPRECHPARTNER / KONTAKT

Henrik Wagner

✉ henrik.wagner@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391 9718

#### PROJEKTPARTNER

**OFFIS e.V., DLR Institut für Vernetzte Energiesysteme, Leibniz Universität Hannover, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Hochschule Emden-Leer, Hochschule Ostfalia Braunschweig**

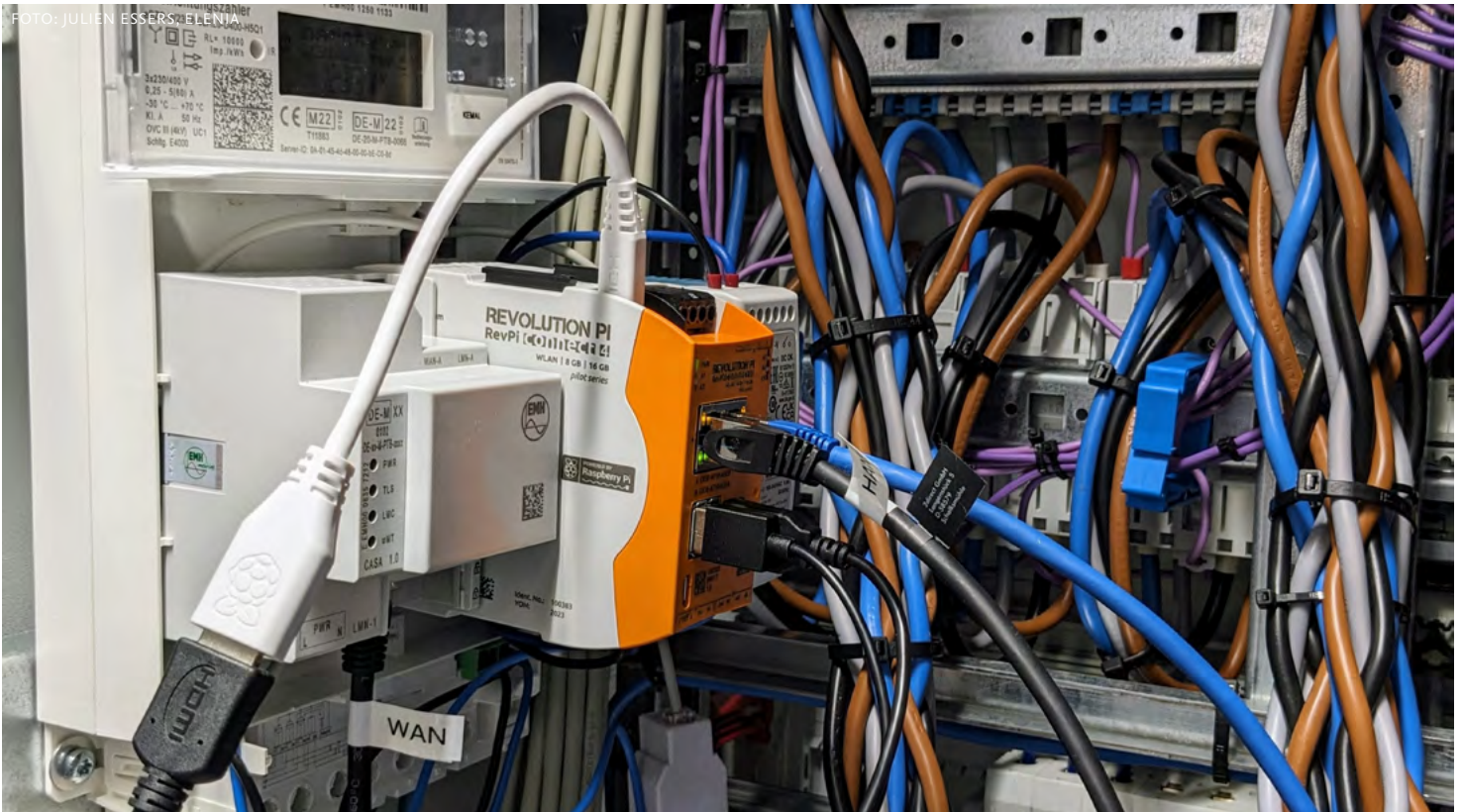
#### GEFÖRDERT DURCH



#### KOORDINIERT DURCH

**Zentrum für digitale Innovationen Niedersachsen**

von Kompetenzen anhand frei wählbarer Forschungscluster, z. B. Co-Simulation. Das vierte Subelement Forschungslandkarte stellt eine mögliche geographische Nähe von aktuellen und potentiellen zukünftigen Forschungspartner:innen und somit die Stärke des Netzwerkes graphisch dar.



## KEMAL

### KEMAL – Kundenorientiertes Energiemanagement mit autonomer Lastregelung

Durch den Smart-Meter-Rollout und die damit einhergehende Digitalisierung des Niederspannungsnetzes ergeben sich spannende neue Einsatzmöglichkeiten im Bereich des Energiemanagements. Innovative Versorgertarife mit attraktiven Preismodellen ermöglichen die effiziente Nutzung volatiler erneuerbarer Energien. Das Energie-

management optimiert hier nicht nur den Eigenstromverbrauch, sondern verschiebt auch Lasten automatisch in niedrigpreisige Zeitfenster und gewährleistet damit den wirtschaftlich günstigsten Betrieb für den Kunden.

Im Rahmen des Verbundvorhabens KEMAL, das in Kooperation mit den Partnern

EMH metering GmbH & Co. KG und der Hochschule Biberach durchgeführt wird, werden diese innovativen Möglichkeiten weiter erforscht und anwendungsnah entwickelt. Um die effiziente und gegen äußere Eingriffe gesicherte Laststeuerung zu realisieren, steht hierbei insbesondere auch die Integration der Smart-Meter-Techno-

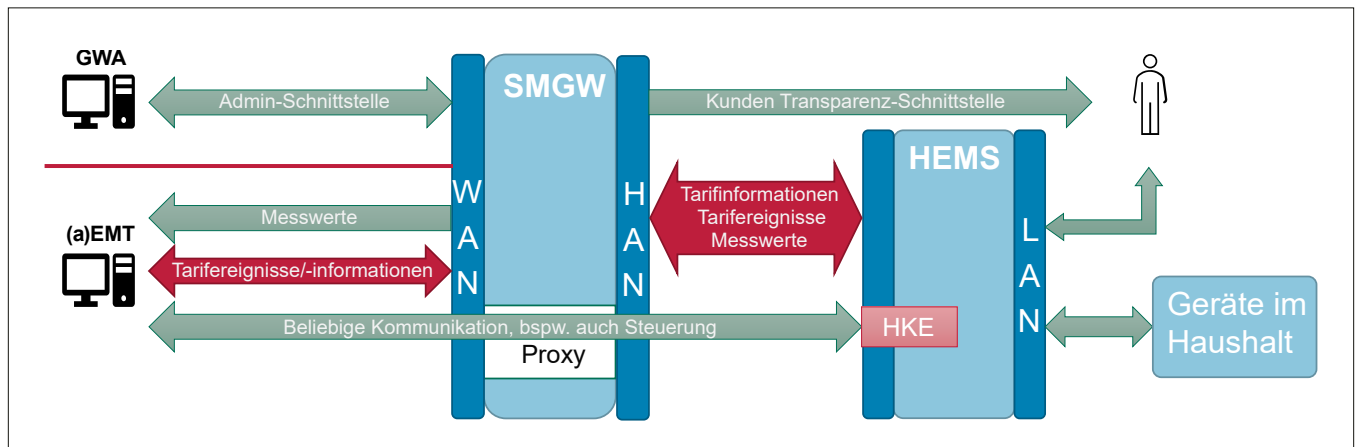


Abbildung 1: Schnittstellen an SMGW und HEMS. Funktionale Erweiterungen in Rot.

Grafik: Eike Niehs, elenia

logie im Fokus. Auf diesem Weg werden innovative Tarifmodelle ermöglicht, die Kund\*innen aktiv an der Energiewende partizipieren lassen.

### Energiemanagement mit dem intelligenten Messsystem

Die Implementierung von intelligenten Messsystemen (iMSys), bildet die Grundlage für die Digitalisierung der Energiewende und ist somit essenziell für das Erreichen unserer Klimaziele. Durch iMSys haben Verbraucher\*innen sowie Unternehmen die Möglichkeit ihren Stromverbrauch und die Einspeisung von selbst erzeugtem Strom, beispielsweise aus Photovoltaik-Anlagen transparent und zeitsynchron zu erfassen und den Nettobezug sowie die Netzlast effektiv und komfortabel zu steuern. Damit eröffnen iMSys neue Möglichkeiten, Erneuerbare-Energien-Anlagen und steuerbare Verbrauchseinrichtungen, wie Elektroautos oder Wärmepumpen, effizient in das Stromnetz zu integrieren.

Das intelligente Messsystem setzt sich lokal aus einem digitalen Basiszähler und einem Smart Meter Gateway (SMGW) zusammen, das in ein hochsicheres weitreichendes Kommunikationsnetz eingebunden ist. In KEMAL wird das iMSys als Messpunkt genutzt, um das Energiemanagement durchzuführen. Über die Transparenz- und Datenschnittstelle des Gateways können die relevanten Energie- und Leistungsdaten für das Energiemanagement abgegriffen und dem Home Energy Management System (HEMS) zur Verfügung gestellt werden. Die Kommunikation erfolgt hierbei zertifiziert gemäß den IT-Sicherheitsanforderungen der Technischen Richtlinie 03109 des Bundesamtes für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI).

### Untersuchungsziele

Im Rahmen von KEMAL wird der Lösungsansatz im Hinblick auf verschiedene Aspekte des Energiemanagements untersucht. Ein primäres Ziel besteht darin, zu ermitteln, inwieweit ein intelligentes Messsystem als Messpunkt für das Energiemanagement genutzt werden kann. Hierbei soll analysiert werden, ob die potenziell höheren Latenzen, die aufgrund der Verschlüsselung auftreten können, Auswirkungen auf das Energiemanagement von Prosumern haben.

Des Weiteren ist vorgesehen den Tarifanwendungsfall 5 zur Abbildung ereignisva-

riabler Tarife in das SMGW zu implementieren. Dabei sollen auch weitere potenzielle Lösungsansätze identifiziert werden. Diese Lösungen werden im Rahmen eines Demonstrators eingebunden und dargestellt. Zudem erfolgt eine Validierung der gefundenen Lösungen im Energiemanagement-Labor, um ihre Wirksamkeit und Anwendbarkeit zu testen.

Das Forschungsvorhaben KEMAL zielt somit darauf ab, einen vertieften Einblick in die Möglichkeiten des Energiemanagements mittels intelligenter Messsysteme zu gewinnen und dabei insbesondere die potenziellen Auswirkungen von Verschlüsselungsprozessen auf den Prosumer-Bereich zu untersuchen. Darüber hinaus wird angestrebt, neue Ansätze zur Umsetzung von Tarifmodellen zu entwickeln und zu validieren.

### Szenarien, Anforderungen und Defizitanalyse

Um die Effektivität und die Funktionalität des entwickelten Demonstrators sicherzustellen, wurden zu Beginn dieses Forschungsprojekts detaillierte technische System Use Cases zusammengefasst. Diese Use Cases beschreiben Anforderungen und Szenarien im realen Betrieb und bilden die Grundlage für die weitere Entwicklungs- und Implementierungsarbeit. Eine umfassende Defizitanalyse zu gesetzlichen und technischen Rahmenbedingungen steckte zu diesem Zeitpunkt den KEMAL Handlungs- und Lösungsrahmen ab.

Ein wesentlicher Schritt in der Entwicklung des Demonstrators ist die Beschreibung der Schnittstellensignale und -Funktionen, die notwendig sind, um die markt- und netzdienlichen Szenarien und Use Cases umzusetzen. Dies umfasst insbesondere die Kommunikation und Interaktion zwischen den verschiedenen Komponenten und Systemen, einschließlich der Steuerboxfunktion, dem HEMS, und dem SMGW. Zur Abbildung des neuen Tarifanwendungsfalls TAF 5 wird auf die vorhandenen Schnittstellen von HEMS und SMGW aufgesetzt und diese um neue Funktionalitäten erweitert.

### Erprobung unter Realbedingungen im Labor

Ein entscheidender Schritt ist der Aufbau des Demonstrators im elenia Energiemanagementlabor. Es werden gezielt Szenarien geschaffen, die eine realitätsnahe Nach-

#### PROJEKT

**KEMAL**

#### LAUFZEIT

**2021–2024**

#### ANSPRECHPARTNER / KONTAKT

**Eike Niehs**

✉ e.niehs@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391 7787

**Julien Essers**

✉ j.essers@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391 9716

#### PROJEKTPARTNER

**EMH metering GmbH & Co. KG,  
Hochschule Biberach**

#### GEFÖRDERT DURCH



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

#### KOORDINIERT DURCH

**EMH metering GmbH & Co. KG**  
(Dr. Rainer Frank)

stellung der Anwendungsfälle ermöglichen. Dies beinhaltet unter anderem die Einbindung von Prosumern mit unterschiedlichem Flexibilitätsgrad.

Im Fokus liegt die Validierung der Interaktionen aller Komponenten. Dies umfasst Testläufe, Simulationen und praxisnahe Anwendungen, um sicherzustellen, dass die entwickelten Systeme reibungslos zusammenarbeiten und die gesteckten Ziele erreichen.

Die Laborentwicklung ist somit ein entscheidender Meilenstein im Forschungsprojekt, da sie ermöglicht, die theoretischen Konzepte und Modelle in die Praxis umzusetzen und deren Funktionalität in einer kontrollierten Umgebung zu überprüfen. Dies bildet die Grundlage für weitere Erkenntnisse und Optimierungen im Verlauf des Projekts.



## Energy-4-Agri

### Gesamtkonzept und Modellierung von Agrarsystemen mit regenerativer Energieversorgung

Sowohl die Energieerzeugung als auch die Versorgung der Energiekunden stehen durch die Umsetzung der klimapolitischen Ziele vor großen Herausforderungen. Leistungsschwankungen während der Gewinnung z. B. aus wetterabhängiger Wind- oder Sonnenenergie sowie beim Energiebedarf (Elektromobilisierung im Individual- und Güterverkehr) erfordern neue ganzheitliche Konzepte für deren Berechnung. In diesem Zuge wird der Einsatz sogenannter „Smart Grids“ als Basis eines effizienten und zuverlässigen Systembetriebs vorangetrieben. Durch eine zukünftige Umstellung auf eine elektrische Versorgung der energieintensiven Feldbewirtschaftung bildet die Landwirtschaft einen wesentlichen Einflussfaktor auf dieses System.

#### Das Projekt Energy-4-Agri

Das Forschungsprojekt Energy-4-Agri „Gesamtkonzept und Modellierung von Agrarsystemen mit regenerativer Energieversorgung“ beschäftigt sich mit der Untersuchung und Modellierung von Gesamtkonzepten für Agrarsysteme mit regenerativer Energieversorgung zur Dekarbonisierung der Landwirtschaft im Kontext der Energiewende. Zusammen mit dem Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge (IMN), Institut für Geoökologie (IGÖ), der

Abteilung für Arbeits-, Organisations- und Sozialpsychologie (AOS) am Institut für Psychologie der Technischen Universität Braunschweig sowie dem Institut für Designforschung (IDF) der Hochschule für Bildende Künste in Braunschweig erfolgt eine ganzheitliche Konzeption und multikriterielle Bewertung der Energieversorgung für nachhaltige Agrarsysteme als Beitrag zur Dekarbonisierung der landwirtschaftlichen Produktion.

#### Feldmesskampagne auf Referenzbetrieben

Im Rahmen einer Feldmesskampagne wurden auf verschiedenen Landwirtschaftsbetrieben in Niedersachsen Messungen des elektrischen Strombedarfs sowie der Erzeugung durchgeführt. Dazu wurden gezielt einzelne Verbrauchsgruppen (z. B. Stallanlagen oder Kühllager) vermessen und deren Stromverbrauch anhand der Tierzahlen bzw. Erntemengen validiert. Zusammen mit dem Energiebedarf der elektrischen Landmaschinen können somit gesamtheitliche Aussagen zu elektrischen Energiesystemen in der Landwirtschaft getroffen werden.

#### Potenziale für Dach-Photovoltaikanlagen

In der Landwirtschaft sind vor allem große Dachflächen von Ställen, Lagerhallen,

Maschinenhallen und Verwaltungsgebäuden für die Installation von Dach-Photovoltaikanlagen geeignet. Im Jahr 2021 betrug die installierte Dach-PV-Leistung in der Landwirtschaft ca. 11 GWp und hatte damit einen Anteil von 18,8% an der gesamten installierten Leistung in Deutschland. Der überwiegende Teil der Anlagen wird volleinspeisend betrieben, der Eigenverbrauch spielt in der Landwirtschaft bisher nur eine untergeordnete Rolle. Um das weitere Ausbaupotenzial für Dach-Photovoltaikanlagen in der Landwirtschaft zu ermitteln und damit einen Beitrag zur klimafreundlichen Transformation des deutschen Energiesystems zu leisten, wurde eine Studie zum Status quo und Potenzialen für Dach-Photovoltaikanlagen in der Landwirtschaft veröffentlicht. Mit Hilfe von Daten aus dem Marktstammdatenregister, Daten der Agrarstrukturerhebung und typischen Gebäudemodellen wurden für jeden Landkreis in Deutschland die theoretischen Potenziale analysiert. Als Ergebnis konnte für Deutschland ein theoretisches Potenzial von 91,5 GWp ermittelt werden.

#### Potenziale für Agri-Photovoltaikanlagen

Parallel zur Entwicklung der Methodik zur Potenzialabschätzung für Dach-Photovoltaikanlagen wurde eine GIS-basierte Me-

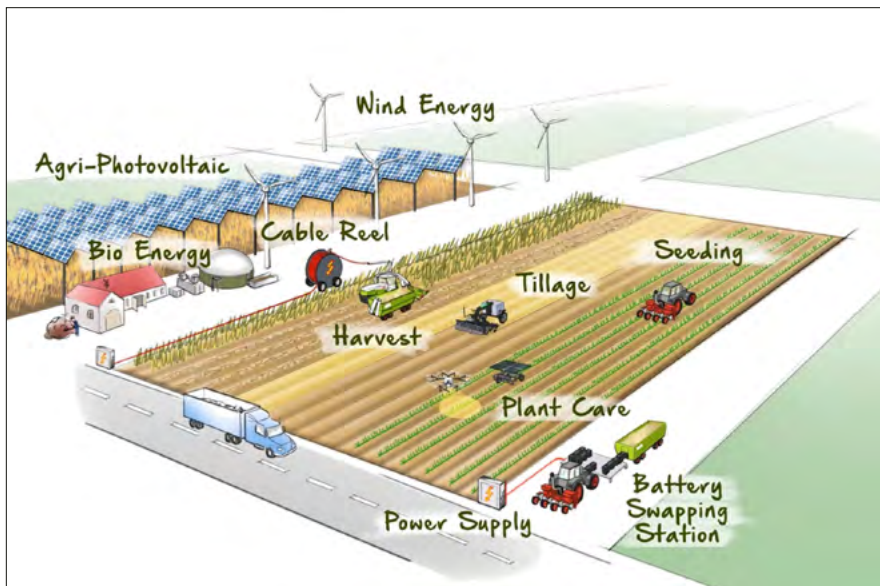


Abbildung 1: Konzeptbild einer elektrischen Feldbewirtschaftung mit regenerativer Energieversorgung,  
Foto: Johanna Frerichs, TU Braunschweig

thode zur Abschätzung des Potenzials für Agri-Photovoltaikanlagen entwickelt und veröffentlicht. Durch die Berücksichtigung typischer geografischer Hindernisse (z. B. Windenergieanlagen oder Stromnetzmasten) können für jedes Feld in Niedersachsen Aussagen zum technischen Potenzial getroffen werden. Die auf dem Feld gegebene Fruchtfolge sowie mögliche Feldneigungen werden dabei nicht berücksichtigt. Die Agri-Photovoltaikanlagen wird dabei auf einem im Feld platzierten Blühstreifen installiert, wodurch gleichzeitige Energie- und Pflanzenerzeugung sowie eine Erhöhung der Biodiversität möglich ist. Als Ergebnis wurde für Niedersachsen ein technisches Potenzial von 78 GWp ermittelt.

### Energieversorgung elektrisch betriebener Landmaschinen

Aus Sicht der Energieversorgung ist ein hoher Lastdeckungsgrad, geringe Netzanschlussleistungen verbunden mit geringen Lastspitzen und einem gleichmäßigen Stromverbrauch vorteilhaft. Neuartige Maschinenkonzept wie z. B. das kabelbetriebene Gantry-System mit einer Arbeitsbreite von 12 m können aus dieser Sicht nachteilig im Vergleich zum herkömmlichen Traktor mit einer Arbeitsbreite von 6 m sein, da die Simulation höhere Lastspitzen und eine

niedrigere Eigenversorgung mit einer Agri-Photovoltaikanlage gezeigt hat. Möglichkeiten zur Verbesserung der Eigenversorgung des Gantry-Systems ist die Verwendung eines Batteriespeichers oder die Verschiebung der Arbeitszeit auf dem Feld Richtung Mittag.

Weitere Energieversorgungsmöglichkeiten bestehen im Wechselkonzept von Batteriespeichern. Hierbei werden kleinere Batteriespeicher regelmäßig ausgewechselt und somit höhere Betriebszeiten für batteriebetriebene Landmaschinen auf dem Feld ermöglicht. Im Vergleich zu einer kabelgebundenen Energieversorgung ist der Energiebedarf beim Wechselkonzept durch das koordinierte Nachladen der nicht benötigten Batterien besser über den Tag verteilt, wodurch eine höhere Lastdeckung mit erneuerbaren Energien erreicht werden kann. Die Untersuchungen zeigen jedoch, dass batteriebetriebene Landmaschinen, sowohl mit festverbautem als auch wechselbaren Batteriespeichern nicht für alle Feldarbeiten in Frage kommen. Besonders bei den energieintensiven Verfahren wie der Grundbodenbearbeitung oder Ernte können z. B. wasserstoffbetriebene Landmaschinen eine Alternative darstellen.

#### PROJEKT

## ENERGY 4 AGRI

Energy-4-Agri

LAUFZEIT

2019–2023

ANSPRECHPARTNER / KONTAKT

Felix Klabunde

✉ f.klabunde@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391 9720

PROJEKTPARTNER

**Hochschule für Bildende Künste  
Braunschweig, Institut für mobile  
Maschinen und Nutzfahrzeuge,  
Institut für Psychologie, Institut  
für Geoökologie, Institut für  
Designforschung**

WEBSEITE

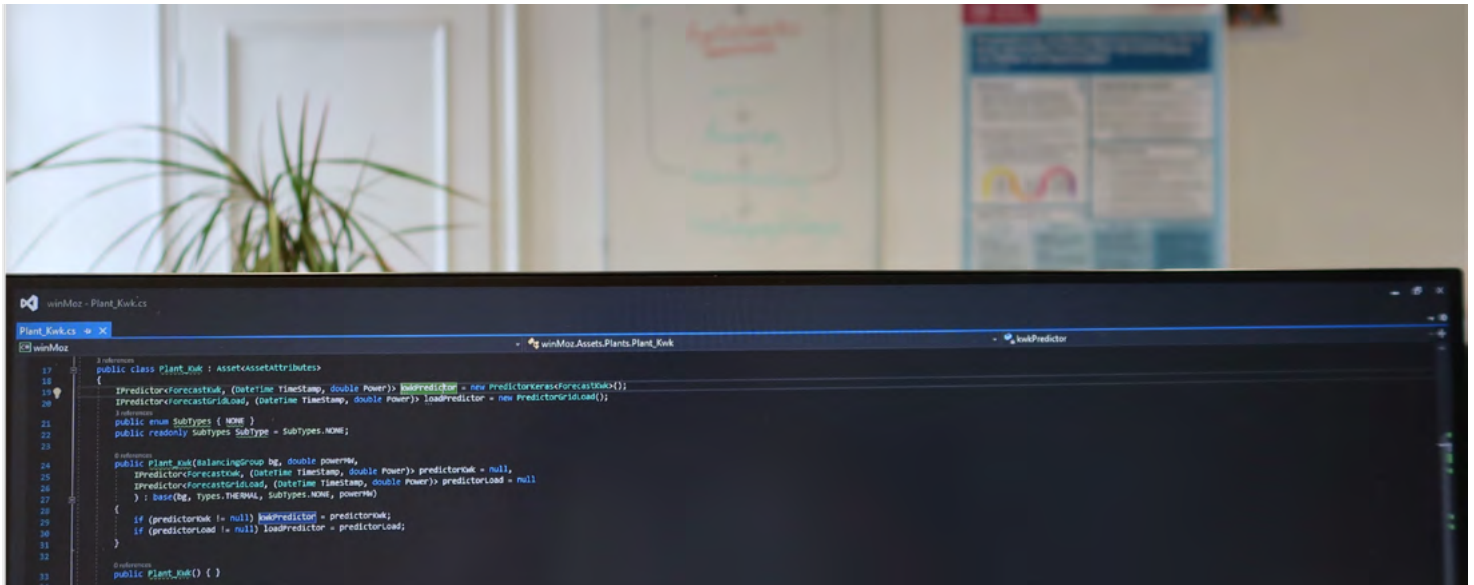
[www.tu-braunschweig.de/  
energy-4-agri](http://www.tu-braunschweig.de/energy-4-agri)



GEFÖRDERT DURCH



**Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz**



## MozuBi

### Modellierung zukünftiger Bilanzkreisbewirtschaftung unter Berücksichtigung der erneuerbaren Energien

Die Energiewende und der damit verbundene stetige Anstieg (nahezu) grenzkostenfreier, dargebotsabhängiger erneuerbarer Energien sowie die fortschreitende intelligente Vernetzung steuerbarer Verbraucher wirkt sich auf die gesamte Wertschöpfungskette der Stromversorgung aus. Nicht zuletzt die Verschärfung der Klimaziele sowie jüngste politische Entscheidungen gegenüber Russland aufgrund des kriegerischen Akts gegen die Ukraine beschleunigen diesen Wandel und bedingen einen erhöhten Anpassungsdruck aller Akteure.

#### Bilanzkreis basierte Energiewirtschaft

Die für die sichere Stromversorgung wesentlichsten Aufgaben werden von Netzbetreibern, Erzeugern und Lieferanten abgedeckt. Bedingt durch die physikalischen Eigenschaften von Strom erfordert die ordnungsgemäße Funktionalität des Energiesystems ein stetiges Gleichgewicht zwischen Erzeugung und Verbrauch. Zur Reduktion von Abweichungen im Energiesystem werden von den aktiven Akteuren Bilanzkreise bewirtschaftet. Innerhalb des Forschungsvorhabens MozuBi wurde dieses Bilanzkreiswesen als maßgebliches Instrument im Energiesystem wissenschaftlich modelliert und untersucht.

Die Ziele der Akteure sind jedoch grundlegend verschieden. Während Netzbetreiber als regulierte Betreiber des natürlichen Monopols Stromnetz für die möglichst effiziente Gewährleistung des sicheren Betriebes verantwortlich sind, streben Erzeuger und Lieferanten in der Regel die Verfolgung wirtschaftlicher Interessen an. Diese unterschiedlichen Ziele können zu Kollisionen führen, beispielsweise dann, wenn die Kosten für den tatsächlichen Ausgleich von Unterschieden zwischen Erzeugung

und Verbrauch, welcher vom Netzbetreiber durchgeführt wird, niedriger sind als ein marktlicher Ausgleich bei der Bewirtschaftung der Bilanzkreise durch Lieferanten und Erzeuger.

#### Modelltechnische Abbildung

Um diese komplexen Sachverhalte umfassend analysieren und bewerten zu können, bedarf es anspruchsvoller Markt-, Akteurs- und Asset-Modelle, die das Bilanzkreiswe-

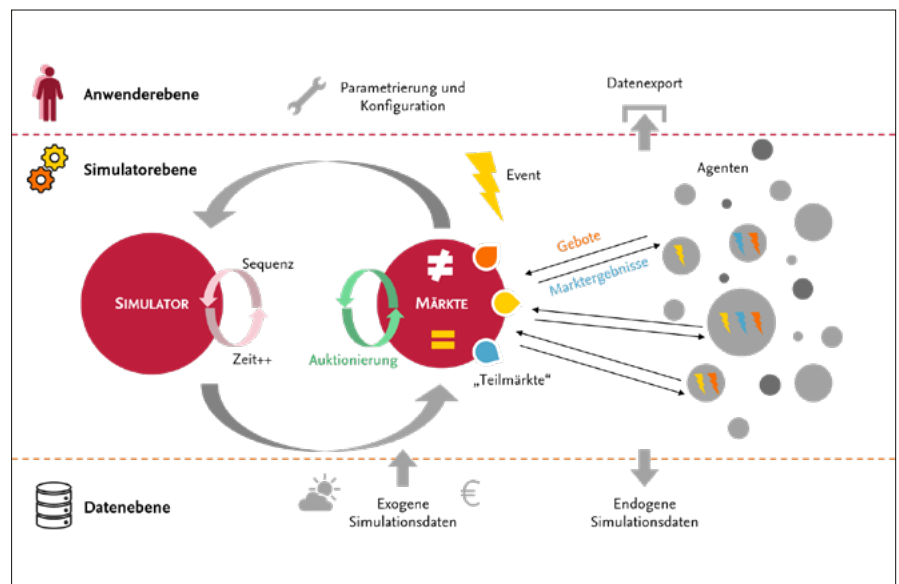


Abbildung 1: Grundstruktur des Simulationsmodells, eigene Darstellung



sen in der Stromversorgung in Deutschland abbilden können.

Die Marktmodell umfassen den Terminhandel (Futures), den vortägigen Handel (Day-Ahead), den untertägigen Handel (Intraday) und den Regelreservemarkt mit Regelleistung und Regelarbeit. Zudem wird modellendogen mithilfe der Regelzonensaldi der Regelreserveabruf durchgeführt und der Ausgleichsenergiepreis berechnet. Damit besitzt das Modell alle notwendigen Funktionen, um neben Markterlösen auch Kosten der Bilanzkreisbewirtschaftung zu berechnen. Mit den Akteursmodellen (Agenten) kann der grundlegende Aufbau der Wirkungskette des Bilanzkreismanagements vom Übertragungsnetzbetreiber über den Verteilnetzbetreiber bis zum Bilanzkreisverantwortlichen abgebildet werden. Zudem wurden die wesentlichen Assets des Energiesystems modelliert. Hierbei wurden zeitreihenbasierte Bottom-Up-Modelle entwickelt, welche anhand diverser Prognose- und Optimierungsalgorithmen die Bestimmung viertelstundenscharfer Fahrpläne zur Vermarktung von Erzeugungs- und Verbrauchsleistungen ermöglichen. Um die Betrachtung elektrisch und thermisch geführter Kraftwerke zu ermöglichen, werden im Simulationsmodell sowohl der Bedarf an Elektrizität als auch Wärme betrachtet. Für jedes Asset sind sowohl anlagenscharfe als auch aggregierte Betrachtungen möglich. Insbesondere Portfolien mit einer hohen Durchdringung von EE-Anlagen bleibt hierdurch die Berechnungs-

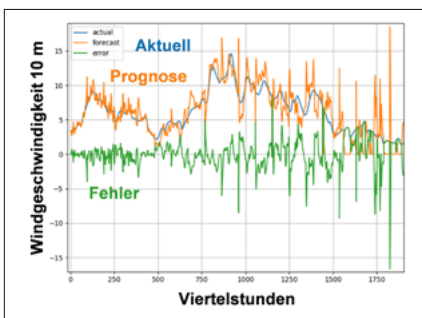


Abbildung 2: Simulierte Windprognose,  
Grafik: Henrik Herr

geschwindigkeit der Simulation hoch. Damit der Handel über drei Marktstufen funktioniert, werden Prognoseunsicherheiten simuliert, die sich z. B. bei Wind und PV-Kraftwerken ergeben. Diese werden so simuliert, dass sich diese mit kleiner werdendem zeitlichem Abstand zwischen Aus-

schreibungs- und Bestimmungszeitraum geringer werden, um der steigenden Güte Rechnung zu tragen. Alle Prognosefehler nach dem untertägigen Handel bilden die Basis für den Regelzonensaldo. Verschiedene Optionen wie Gebote auf dem Regelreservemarkt und dem vortägigen Handel werden durch Opportunitäten in den Handelsstrategien der Kraftwerke berücksichtigt. Hier gibt es an die unterschiedlichen Gegebenheiten der Kraftwerke und Lasten angepasste Strategien, die von Arbitrage-Strategien für Speicher bis Make-Or-Buy Strategien von thermischen Kraftwerken reichen.

### Anwendbarkeit und Erweiterbarkeit

Die Entwicklung des Modells folgte unter Verwendung frei verfügbarer Software und Softwarebibliotheken einem Open-Source-Ansatz. Zusätzlich wurde auf frei verfügbare Datenquellen zurückgegriffen, wodurch die Anschlussverwendung gewährleistet ist. Durch die Aufteilung in Module, die in einer Klassenbibliothek (dll) vereint sind, ist es zudem möglich, Teilfunktionen, wie die des Windkraftwerks oder die Preisprognosemethoden unabhängig von der kompletten Modellsimulation auch für andere Projekte oder Fragestellungen wie eine Windertragsprognose oder eine Preisprognose für den vortägigen Handel zu verwenden

Damit der Zugang zu den einzelnen Modellen für neue Anwender erleichtert wird, wurde neben der Simulatorebene eine Anwenderoberfläche programmiert, welche die Erstellung von Szenarien über flexible Betrachtungszeiträume sowie die benutzerspezifische Parametrierung einzelner Teilmärkte der Energiewirtschaft und Assetklassen ermöglicht. Zudem kann der Anwender über die Oberfläche die zu speichernden Datensätze und deren Format konfigurieren, um die Simulationsergebnisse für weitere Auswertungen zu nutzen. Darüber hinaus besteht eine entkapselte **Datenebene**, die exogenen Simulationsdaten wie Wetterdaten als Inputdaten für die Preisprognosen, von der Simulatorebene trennt und damit die Anbindung alternativer Datenquellen ermöglicht.

Die Modellbibliothek MozuBi steht seit letztem Jahr über GitLab zur freien Verfügung und wir laden alle Interessierten ein, sich ein eigenes Bild von den Projektergebnissen zu machen.

#### PROJEKT



#### MozuBi

#### LAUFZEIT

2018–2021

#### ANSPRECHPARTNER / KONTAKT

#### Mattias Hadlak

✉ mattias.hadlak@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391 9713

#### PROJEKTPARTNER

**IZES gGmbH – Institut für  
ZukunftsEnergieSysteme**

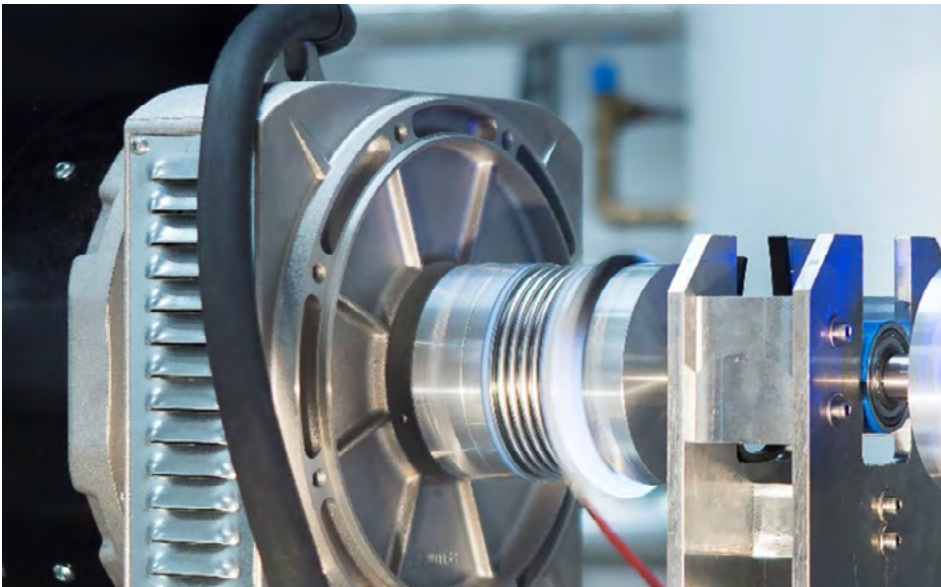
#### GEFÖRDERT DURCH



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

#### KOORDINIERT DURCH

**TU Braunschweig – elenia**



## Marktgestützte Beschaffung von Momentanreserve

### Teilnahme an einer Studie, die den Bedarf und die Ausarbeitung der marktgestützten Momentanreserve-Beschaffung erörtert.

Der Umbau unseres Energiesystems mit dem Ziel der Klimaneutralität ist durch viele technische Herausforderungen geprägt. Mit dem Kernenergie- und Kohleausstieg werden große Erzeugungskapazitäten vom Netz getrennt, die für die Bereitstellung wichtiger Systemdienstleistungen (SDL) einen Beitrag zur Netzstabilität geleistet haben. Der Bedarf an diesen Systemdienstleistungen muss daher zukünftig von anderen Anlagen und Komponenten gedeckt werden, wobei unter Umständen eine marktgestützte Beschaffung notwendig ist. Bei der SDL Momentanreserve (eigentlich „Trägheit der lokalen Netzstabilität“) hat die Effizienzprüfung einer marktgestützten Beschaffung aus dem Jahr 2020 durch die Bundesnetzagentur ergeben, dass kurzfristig kein zusätzlicher Bedarf besteht. Andererseits zeigen die Analysen im Rahmen des aktuellen Netzentwicklungsplans deutlich, dass im Fall einer Netzauftrennung (System Split) deutlich höhere Leistungsungleichgewichte auftreten und durch die Abschaltung konventioneller Kraftwerke weniger Momentanreserve-Erbringung in Deutschland vorhanden ist. Der Bedarf an

Momentanreserve kann folglich sehr groß sein und sich zudem regional stark unterscheiden. Aus diesem Grund hat Amprion als einer der vier Übertragungsnetzbetreiber in Deutschland eine Studie zur Prüfung des Bedarfs und der Ausarbeitung eines Konzeptes für eine marktgestützte Beschaffung zur zeitnahen Realisierung beauftragt. Das elenia war dabei für die Begleitung der Studie zuständig und hat mit dem technischen Know-How zur fruchtbaren Diskussion des Themas beigetragen.

Das Erstgutachten zeigt dabei eine Bedarfszunahme auf und kam zu dem Ergebnis, dass es sinnvoll ist, eine marktgestützte Beschaffung für Momentanreserve, insb. zur Beschleunigung der Technologieentwicklung, einzuführen. Im Zweitgutachten wird dieser Aussage zugestimmt, jedoch die abweichende Feststellung getroffen, dass aufgrund der Reife und der Charakteristik der verschiedenen Technologien bei der marktgestützten Beschaffung differenziert werden sollte, um insbesondere eine zeitnahe Einführung zu erreichen. Basierend auf den Erfahrungen aus anderen Ländern wird eine Ausschreibung der gesicherten

Erbringung von Momentanreserve (24h / 365d / 10a) durch die Übertragungsnetzbetreiber empfohlen. Dies erscheint bereits ab dem Jahr 2024 durch Großbatterien im Höchst- und Hochspannungsnetz möglich, die entsprechend Abbildung 1 neben Energiehandel oder Primärregelleistung die Momentanreserve als weitere netzdienliche Anwendung hinzufügen können („Service Stacking“). Für weitere Technologien muss erst noch eine Technologieentwicklung – Erhöhung des „Technology Readiness Level“ und „System Readiness Level“ – erfolgen, wofür auch nach dem Erstgutachten ein Bonussystem eine sinnvolle Variante ist.

#### Gleichzeitige Vermarktung von mehreren Dienstleistungen

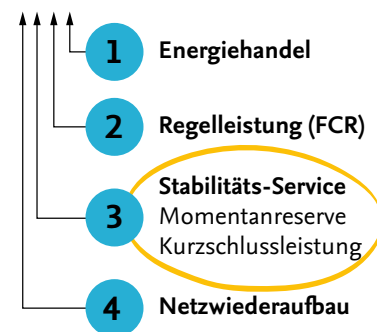


Abbildung 1: Beispiel des „Service Stacking“ (Mehrfachnutzung) von Batteriespeichern, bei denen die Bereitstellung von Momentanreserve zu den bereits vorhandenen Anwendungen hinzugefügt werden kann.

#### PROJEKT

##### Zweitgutachten:

Ausarbeitung eines marktgestützten Beschaffungskonzeptes für Momentanreserve

#### LAUFZEIT

2022–2023

#### ANSPRECHPARTNER / KONTAKT

##### Carsten Wegkamp

✉ c.wegkamp@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391 7756

#### PROJEKTPARTNER

##### Amprion GmbH

Erstgutachten: Consentec GmbH,  
Technische Universität Stuttgart (IFK)



## Batteriespeicher Kompatibilitätstest

### Technische Bewertung des Betriebs von Batteriespeichern mit Wechselrichtern eines führenden deutschen Herstellers.

Der Ausbau von Photovoltaik- und Windkraftanlagen führt zu einem steigenden Speicherbedarf von elektrischer Energie für die Integration in ein zukünftiges nachhaltiges Energiesystem. Eine wichtige Lösung stellen Batteriespeichersysteme dar. Diese Systeme bestehen aus einem elektrochemischen Speicher und einem Wechselrichter, der die Schnittstelle zwischen Batterie und Stromnetz bildet.

In Haushalten, Gewerbebetrieben und der Industrie werden Batteriespeichersysteme oft in Kombination mit Photovoltaikanlagen eingesetzt, um den Eigenverbrauch des selbst erzeugten nachhaltigen elektrischen Energie zu maximieren. Diese Systeme bieten häufig eine Notstromfunktion, die insbesondere in Regionen mit instabilen Stromnetzen eine zuverlässige Stromversorgung gewährleistet. Zusätzlich können Batteriespeicher in entlegenen Gebieten ohne Netzanschluss genutzt werden, um lokale Inselnetze aufzubauen und die tagsüber erzeugte Solarenergie auch nachts zu nutzen. Diese verschiedenen Betriebsszenarien stellen hohe Anforderungen an ein zuverlässiges Batteriespeichersystem, insbesondere an die Batterie selbst. Im Off-Grid-Betrieb, also im Falle des Betriebes in einem Inselnetz oder bei Entkopplung vom Netz, ist eine reibungslose Zusammenar-

beit zwischen dem Wechselrichter und der Batterie von entscheidender Bedeutung, da ein Systemausfall in diesem Fall einem kompletten Netzausfall gleichkommt.

Im Rahmen eines Dienstleistungsprojekts werden Lithium-Ionen-Batterien von verschiedenen Herstellern am elenia Institut für Hochspannungstechnik und Energiesysteme auf ihre Kompatibilität mit den Wechselrichtern eines führenden deutschen Herstellers geprüft, um einen sicheren und stabilen Betrieb von Batterie und Wechselrichter zu gewährleisten. Die Kompatibilitätstests umfassen eine Inbetriebnahmeprüfung, Sicherheitsüberprüfungen und den Betrieb im On-Grid und auch im Off-Grid-Modus. Die Inbetriebnahmeprüfung stellt sicher, dass die Batterien mithilfe der Betriebsanleitung und dem mitgelieferten Installationsmaterial nach aktuell geltendem technischem Stand korrekt installiert werden kann. Der Sicherheitstest zeigt, dass das Gesamtsystem auch im Falle von fehlerhaften Installationen oder Defekten sicher kommunizieren und in einen abgeschalteten Zustand versetzt wird. Dabei müssen sowohl die Batterie als auch der Wechselrichter eigensicher sein. Während des Betriebstests werden unterschiedliche Belastungs- und Erzeugungsszenarien im On-Grid- und Off-Grid-Betrieb von Batte-

riespeichersystemen durchlaufen, um sicherzustellen, dass die Batterie diese Anforderungen problemlos bewältigen kann, ohne dass es zu Beeinträchtigungen oder Abschaltungen kommt. Bei einem positiven Testergebnis werden die geprüften Batterien vom Wechselrichterhersteller als kompatibel deklariert und auf die Whitelist gesetzt.

Kompatibilitätstests sind unerlässlich, um die sichere und zuverlässige Funktion von Batteriespeicher in Verbindung mit Batteriewechselrichter zu gewährleisten.

#### PROJEKT

**Kompatibilitätstest zur technischen Bewertung des Betriebs von Batteriespeichern mit Wechselrichtern**

#### LAUFZEIT

**2023 – laufend**

#### ANSPRECHPARTNER / KONTAKT

**Frank Soyck**

✉ [f.soyck@tu-braunschweig.de](mailto:f.soyck@tu-braunschweig.de)

**Stefan Klöpping**

✉ [s.klopping@tu-braunschweig.de](mailto:s.klopping@tu-braunschweig.de)

**Kevin Preißner**

✉ [k.preissner@tu-braunschweig.de](mailto:k.preissner@tu-braunschweig.de)



## Forschungsprojekt LISA4CL

### Entwicklung eines normkompatiblen, schnellladefähigen, induktiven Ladesystems sowie dessen intelligenten Netzintegration

Gerade bei vielgenutzten Fahrzeugen oder gar Flotten sind kurze Ladezeiten und damit verbundene möglichst kurze Standzeiten notwendig. Seit einigen Jahren werden induktive Ladesysteme entwickelt, die eine massive Steigerung der Kundenakzeptanz von Elektro- und Hybridfahrzeugen versprechen. Erste Standards und Normen sind entstanden, die die Grundlage für heutige Systeme mit Ladeleistungen bis 11 kW bilden. Allerdings sind die Ladezeiten mit diesen Ladeleistungen sehr hoch, da diese Leistungsklasse primär für den Heimbedarf im Hinblick auf Ladungen über Nacht entwickelt wurde. Speziell für den öffentlichen Bereich und den Flottenbetrieb im nicht öffentlichen Bereich werden schnellladefähige Systeme benötigt. Dementsprechend hat die Weiterentwicklung der Standards und Normen zu einem schnellladefähigen Induktiv-Laden begonnen.

Darüber hinaus ist eine intelligente Netzintegration von Ladesystemen wichtig, weil die Durchdringung von Elektro-

fahrzeugen und folglich auch die Netzbelastung steigt. Die Gewährleistung eines sicheren Netzbetriebes steht im Vordergrund. Netzorientierte Ladeansätze spielen eine wichtige Rolle im Hinblick auf Netzentlastung und Minimierung von Netzausbau. Zusätzlich sind aus ökonomischer und ökologischer Sicht erzeugungsorientierte

Ladeansätze zur Erhöhung des verwendeten Anteils an erneuerbaren Energien von besonderer Bedeutung.

#### Projekthalte

Abbildung 1 stellt die Inhalte des Forschungsprojekts LISA4CL dar. Das Projekt gliedert sich in drei Teile. Im ersten Teil

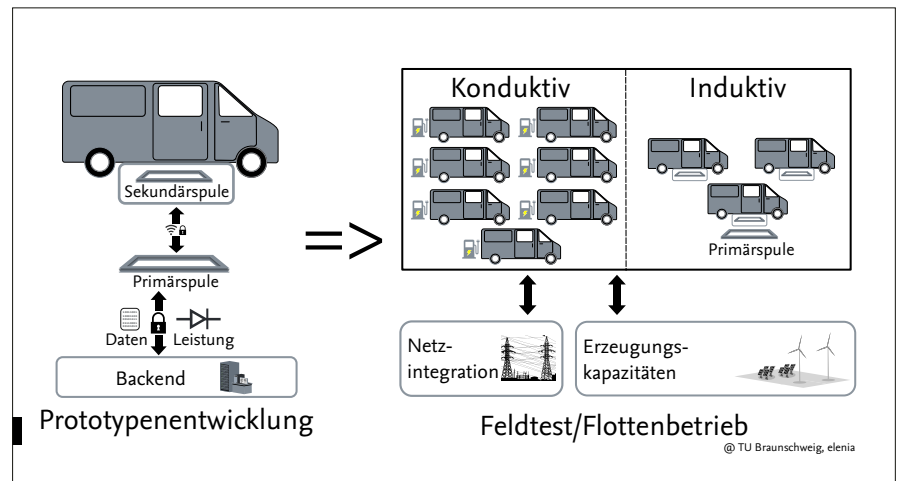


Abbildung 1: Übersicht der Inhalte des Forschungsprojekts LISA4CL

wird ein normkonformes, schellladefähiges, induktives Ladesystem für die Anwendung in leichten Nutzfahrzeugen entwickelt und aufgebaut, welches im Vergleich zu aktuellen Normen höhere Leistungen von bis zu 22 kW bereitstellen wird. Das Ladesystem besteht aus der ortsfesten Ladestation (Primäreinheit) und der Sekundäreinheit, welche in Versuchsfahrzeugen integriert wird. Bei der Entwicklung wird auf die Ergebnisse des vorangegangenen Projekts Induktiv-Laden bzw. emilia zurückgegriffen, in dem ein induktives Ladesystem für einen e-Golf umgesetzt wurde. Der zweite Projektteil umfasst die Netz- und Systemintegration der Ladeinfrastruktur. Hierbei werden netzdienliche und erzeugungsorientierte Konzepte für das Laden entwickelt, welche mit Simulationen und im Labor erprobt werden. Im letzten Teil werden das induktive Ladesystem und die Ladekonzepte zur Netz- und Systemintegration in Feldtests bei einem City-Logistikunternehmen im Realbetrieb eingesetzt. Dieser Teil gliedert sich in einen Feldtest mit konduktiver Ladeinfrastruktur und einem Feldtest mit dem induktiven Ladesystem, um die Ladetechnologien hinsichtlich bedarfsgerechter Ladeinfrastruktur zu vergleichen.

Durch die Mitarbeit der Projektpartner in verschiedenen Normungsgremien finden die Projektergebnisse direkten Eingang in künftige Normen und Richtlinien. Durch die Mitwirkung des Industriepartners INTIS wird ein hoher Praxisbezug sichergestellt. Zusätzlich fließen auf der wissenschaftlichen Seite die Forschungsergebnisse in Promotionsvorhaben an den Instituten ein. Darüber hinaus werden sie Eingang in entsprechende Lehrveranstaltungen, wie Vorlesungen, Laborpraktika und studentische Abschlussarbeiten finden und auf nationalen und internationalen Konferenzen und Tagungen präsentiert und diskutiert. Das Projekt sowie dessen Methodik wurden auf der NEIS 2021 – Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems vorgestellt. Ergebnisse der netzdienlichen und erzeugungsorientierten Ladekonzepte wurden auf den Konferenzen 6th E-Mobility Power System Integration Symposium und ETG-Kongress 2023 veröffentlicht. Das Konzept des induktiven Ladesystems wurde auf der HEV 2022 – Tagung Hybrid- und Elektrofahrzeuge vorgestellt. Darüber hinaus wurden eine Pressemitteilung zum erfolgreich

gestarteten konduktiven Feldtest und ein Artikel zum induktiven Laden in der Fachzeitschrift der Electrosuisse veröffentlicht.

**Aktueller Stand**

Das induktive Ladesystem wurde entwickelt und aufgebaut. Dies beinhaltet sowohl die Komponenten des Leistungspfad als auch die Kommunikations- und Steuerungsinfrastruktur. Abbildung 2 zeigt schematisch den Aufbau des induktiven Ladesystems. Die Netzschnittstelle des Systems wird mit einem Active Front End realisiert, welches die Möglichkeit bietet, Blindleistung zur Spannungshaltung bereitzustellen. Mit dem Active Front End wird eine Q(U)-Regelung umgesetzt. Die Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems wurde in umfangreichen Tests am Prüfstand der INTIS GmbH erprobt. Dies beinhaltet unter anderem die Durchführung von Ladetests und Fehlerprüfungen. Im nächsten Schritt wird das induktive Ladesystem bei der Fairsenden GmbH in Berlin installiert, um es im Realbetrieb zu erproben. In Bezug auf die Netz- und Systemintegration wurden diverse Untersuchungen durchgeführt. Es wurde eine Potenzialanalyse für lokale erneuerbare Energien am Ladestandort der Fairsenden GmbH durchgeführt. Zusätzlich wurden kennlinienbasierte Regelungen zur Reduzierung von Spannungsunsymmetrie simulativ und labortechnisch untersucht. Weiterhin wurde ein Energiemanagementkonzept entwickelt, welches aktuell in den elenia-energy-labs getestet wird.

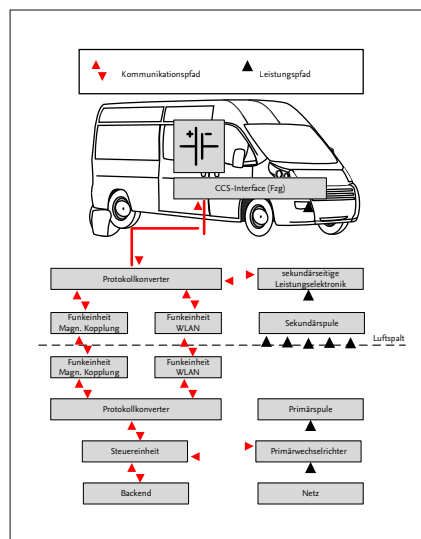


Abbildung 2: Konzept des Leistungs- und Kommunikationspfads des induktiven Ladesystems.

PROJEKT



**LISA4CL**

Laden – induktiv, schnell, autonom für City Logistik

LAUFZEIT

2020 – 2024

ANSPRECHPARTNER / KONTAKT

**Gian-Luca Di Modica, M.Sc.**

✉ g.di-modica@tu-braunschweig.de  
☎ +49 531 391 7704

**Lukas Ebbert, M.Sc.**

✉ l.ebbert@tu-braunschweig.de  
☎ +49 531 391 9727

**Robin Herman, M.Sc.**

✉ r.herman@tu-braunschweig.de  
☎ +49 531 391 7702

PROJEKTPARTNER



TU Braunschweig  
IMAB – Institut für elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen



INTIS – Integrated Infrastructure Solutions

ASSOZIIERTE PARTNER

**Fairsenden GmbH, Berliner Agentur für Elektromobilität eMO, Volkswagen Nutzfahrzeuge**

GEFÖRDERT DURCH



Bundesministerium für Digitales und Verkehr

KOORDINIERT DURCH

**TU Braunschweig – elenia**



## Forschungsprojekt U-Quality

### Spannungsqualitätsprobleme und ihre Regelung in modernen Niederspannungsnetzen

Das Forschungsprojekt U-Quality untersuchte, welche Auswirkungen zukünftige Netznutzungsfälle der Niederspannung – Photovoltaik, Photovoltaik-Batteriespeichersysteme, Elektromobilität und Power-to-Heat-Anwendungen und ihre Betriebsweise – auf die Spannungsqualität haben. Die Spannungsqualität wurde dabei in den Merkmalen Flicker, Oberschwingungen, Unsymmetrie und schnelle Spannungsänderungen untersucht.

#### Feldmessungen

Das Projekt startete mit einer umfassenden Metastudie, welche den aktuellen Stand der Forschung im Hinblick auf zukünftige Durchdringungsszenarien aufbereitete. In Feld- und Labormessungen wurden anschließend vielfältige Ergebnisse erzielt. Die hierbei im Labor vermessenen Komponenten (Haushaltsgeräte, Wärmepumpe, PV-Anlagen, Batteriespeicher, EV-Ladeinf-

rastruktur) zeigten stets stabiles Verhalten bei normativem Betrieb bzw. bei Betrieb mit nur gering gestörter Versorgungsspannung und erzeugten ihrerseits hierbei nur

normkonforme Spannungsqualitätsstöreinträge. Nicht normative Betriebsweisen der untersuchten Komponenten führten teilweise jedoch zu Grenzwertverletzungen

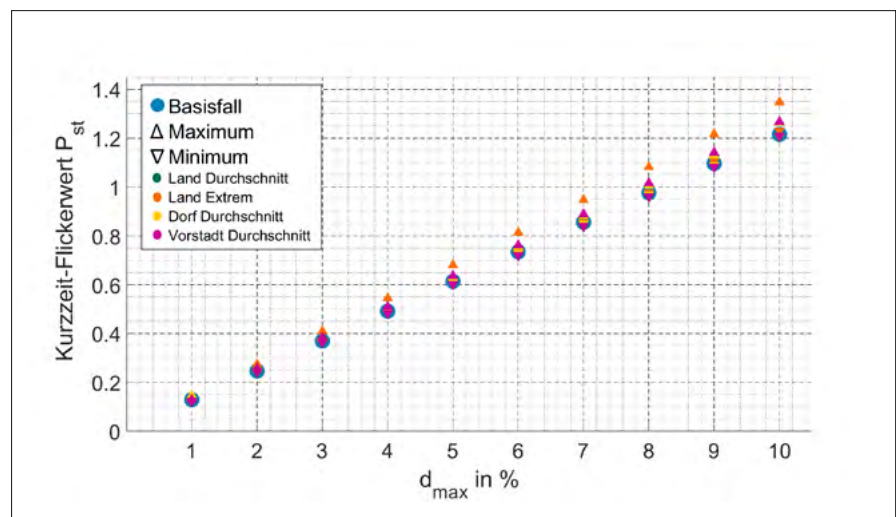


Abbildung 1: Simulationsergebnisse der Flickeruntersuchungen: Einfluss positiver  $d_{max}$ -Werte auf den Kurzzeit-Flickerwert bei aktiver Q(U)-Regelung

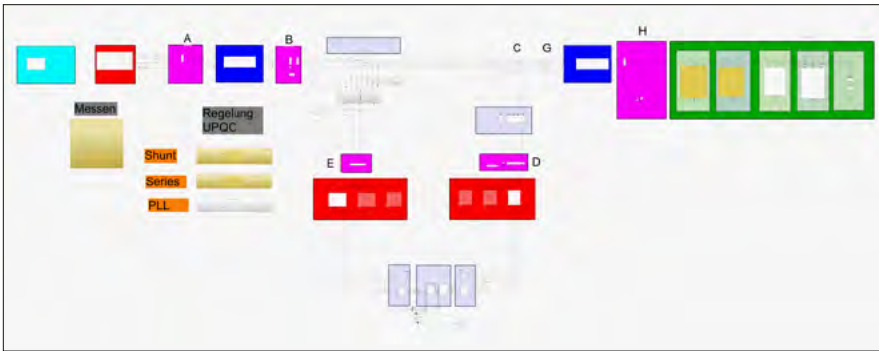


Abbildung 2: MATLAB-Modell einer UPQC Regelung,  
Screenshot: [github.com/U-Quality-Regler/UPQC-Model](https://github.com/U-Quality-Regler/UPQC-Model)

in Bezug auf Spannungsqualitätsaspekte. Die Feldmessungen erzielten des Weiteren neue Erkenntnisse zu verschiedenen Spannungsqualitätsstörungen in unterschiedlichen Netztypen. Bei moderneren Netzen konnten dabei nur sehr geringe und seltene Spannungsqualitätsstörungen festgestellt werden.

### Simulationen

Im weiteren Projektverlauf wurden realistische Durchdringungsgrade und Modelle sowie Teilsimulationen (Zeitreihenmodelle, Musternetze, Modelle der zukünftigen Betriebsweise) für die weiteren Netzsimulationen erstellt und ausgewertet. Hierauf aufbauend wurden umfangreiche Netzsimulationen zu den verschiedenen Spannungsqualitätsmerkmalen durchgeführt. In den Netzsimulationen konnte gezeigt werden, dass die zukünftigen Netznutzungsfälle zu einer deutlich stärkeren Belastung der einzelnen Spannungsqualitätsmerkmale in der Niederspannung führen. Trotz dieses Anstiegs wurden die Spannungsqualitätsgrenzwerte in den Simulationen jedoch weitestgehend (1 bzw. 5% Berechnungsquantil) eingehalten. Auf Basis der Simulationen ist durch die untersuchten Netznutzungsfälle daher im regulären Betrieb und bei ausreichend ausgebauten Netzen nicht mit flächendenkenden Spannungsqualitätsverletzungen in der Niederspannung zu rechnen. In bestimmten Netznutzungsfällen kann es jedoch zu Grenzwertüberschreitungen einzelner Spannungsqualitätsmerkmale kommen. Das Spektrum der Netzsimulationen wurde dabei breit gefächert, sodass u. a. auch Aussagen zur Aufsummierung von Spannungsqualitätsstörungen beispielsweise der Flicker durch Elektrofahrzeuge erklärt wurden. Durch die Netzsimulationen wurde weiterhin der op-

timale Einsatzort für die Ausregelung von verschiedenen Spannungsqualitätsmerkmalen analysiert.

### Hardwareumsetzung

In weiteren Arbeitspaketen wurden ein erster Spannungsqualitätsreglerprototyp sowie ein entsprechendes Simulationsmodell entwickelt. Hierfür wurden eine Vielzahl an Konzepten entwickelt und eine umfassende Simulationsplattform zur Ermittlung geeigneter Synchronisierungs-, Versorgungs- und Regelverfahren aufgebaut. Die dabei entwickelten Regelverfahren führen bei Anwendung zur Dämpfung aller Spannungsqualitätsmerkmale. Die Simulationsplattform wurde für wissenschaftliche Zwecke veröffentlicht und der Spannungsqualitätsreglerprototyp in Labortests erprobt. Eine weitere Erprobung und Weiterentwicklung des Prototypen befindet sich aktuell in der breiteren Umsetzung.

Das Simulationsmodell ist hier zu finden: <https://github.com/U-Quality-Regler/UPQC-Model>

Die über alle Arbeitspakete in netztechnischen, komponentenseitigen und normativen Teilgebieten erarbeiteten Erkenntnisse wurden abschließend in Handlungsempfehlungen für die weitere Verwendung zusammengefasst. Die Handlungsempfehlungen wurden im Austausch mit Netzbetreibern und Industrieunternehmen im Zuge des Abschlussworkshops vermittelt und in Veröffentlichungen einem breiten Kreis an Interessenten präsentiert.

*Wir danken unseren geförderten und assoziierten Partnern für den sehr guten Austausch und die hervorragende Zusammenarbeit!*

#### PROJEKT



#### U-Quality

#### LAUFZEIT

2019–2023

#### ANSPRECHPARTNER / KONTAKT

##### Cornelius Biedermann, M.Sc.

✉ [cornelius.biedermann@tu-braunschweig.de](mailto:cornelius.biedermann@tu-braunschweig.de)  
☎ +49 531 391 7788

##### Gian-Luca Di Modica, M.Sc.

✉ [g.di-modica@tu-braunschweig.de](mailto:g.di-modica@tu-braunschweig.de)  
☎ +49 531 391 7704

##### Till Garn, M.Sc.

✉ [t.garn@tu-braunschweig.de](mailto:t.garn@tu-braunschweig.de)  
☎ +49 531 391 7714

#### GEFÖRDERTE PROJEKTPARTNER



RWTH Aachen University -IAEW



TU München



FGH e.V.



Ruhstrat Power Technology GmbH

#### ASSOZIIERTE PARTNER

**Netze BW, Bayernwerk, BS|Netz, avacon, Phoenix Contact, Stromnetze Hamburg, SMA**

#### GEFÖRDERT DURCH



Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

#### KOORDINIERT DURCH

TU Braunschweig – elenia



## Blindleistungsmanagement

### Einsatz innovativer Konzepte und Blindleistungsquellen an der Schnittstelle Verteilungs- und Übertragungsnetz

Mit der Energiewende erfährt das elektrische Energiesystem in Deutschland einen tiefgreifenden Transformationsprozess. Dieser hat einen grundlegenden Einfluss auf die bestehenden Konzepte zur Wahrung der Netz- und Systemsicherheit. Dies betrifft auch die Spannungshaltung und das eng damit verbundene Blindleistungsmanagement (BM) in Übertragungs- (ÜN) und Verteilungsnetzen (VN).

Der Blindleistungsbedarf in den Netzen steigt durch längere Übertragungswege und höhere Netzauslastungen kontinuierlich an und wird zudem insgesamt dynamischer. Erschwerend kommt hinzu, dass die Übertragung von Blindleistung über größere Entfernungen wirtschaftlich nicht darstellbar ist, so dass der Bedarf lokal ausgeglichen werden muss. Ein Großteil der benötigten Blindleistung wird gegenwärtig durch Synchrongeneratoren im ÜN bereitgestellt, die im Zuge der Energiewende sukzessive abgeschaltet werden.

Durch den steigenden Ausbau von erneuerbaren Energieanlagen (EEA) werden jedoch auch neue Blindleistungsquellen in den Netzen installiert – vor allem im VN. Diese Potenziale werden überwiegend in den definierten Arbeitsbereichen der Technischen Anschlussregeln genutzt, weshalb die technischen Potenziale nicht vollstän-

dig ausgenutzt werden. Eine Erweiterung des Arbeitsbereiches und eine schnittstellenübergreifende Nutzung des Potenzials findet vereinzelt statt, ist aber keine gängige Praxis bei ÜN- und VN-Betreibern.

#### Abgeschlossene Forschungsarbeiten am elenia

Die sich daraus ableitenden Forschungsfragen werden am elenia seit 2015 in unterschiedlichen Forschungsprojekten und Studien fortlaufend bearbeitet. Im Forschungsprojekt PV-Wind-Symbiose (2015–2019) wurden zentrale Fragestellungen zur Effizienz der Blindleistungsbereitstellung aus EEA beantwortet. Zudem wurde ein optimierungsgetriebener BM-Ansatz entwickelt und die technischen sowie wirtschaftlichen Auswirkungen des Ansatzes anhand eines realen Hochspannungsnetzes untersucht. Im Nachfolgeprojekt Q-Integral (2019–2023) wurde der Fokus erweitert und auf die Schnittstelle zwischen VN und ÜN gelegt. In Zusammenarbeit mit dem ÜN-Betreiber 50Hertz sowie in Teilen mit den unterlagerten VN-Betreibern E.DIS, TEN und WEMAG wurde ein umfassendes spannungsebenen- und netzbetreiberübergreifendes Netzmodell erstellt, siehe Abbildung 1, mit dem integrale Ansätze für das

BM im Netzbetrieb und in der Netzplanung untersucht wurden.

Mit Hilfe des Netzmodells wurde ein vom elenia entwickelter, optimierungsgetriebener und netzbetreiberübergreifender BM-Ansatz für die Schnittstelle VN und ÜN validiert und analysiert. Zudem wurden die Flexibilitätspotenziale der unterlagerten VN und die technischen sowie wirtschaftlichen Auswirkungen des BM für unterschiedliche Bedarfsfälle und Szenarien untersucht.

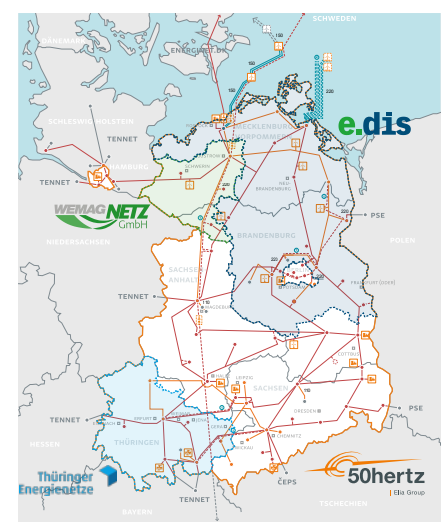


Abbildung 1: Darstellung der Netzregion (Stand 2017) des spannungsebenenübergreifenden Netzmodells in Anlehnung an 50Hertz Transmission GmbH 2017



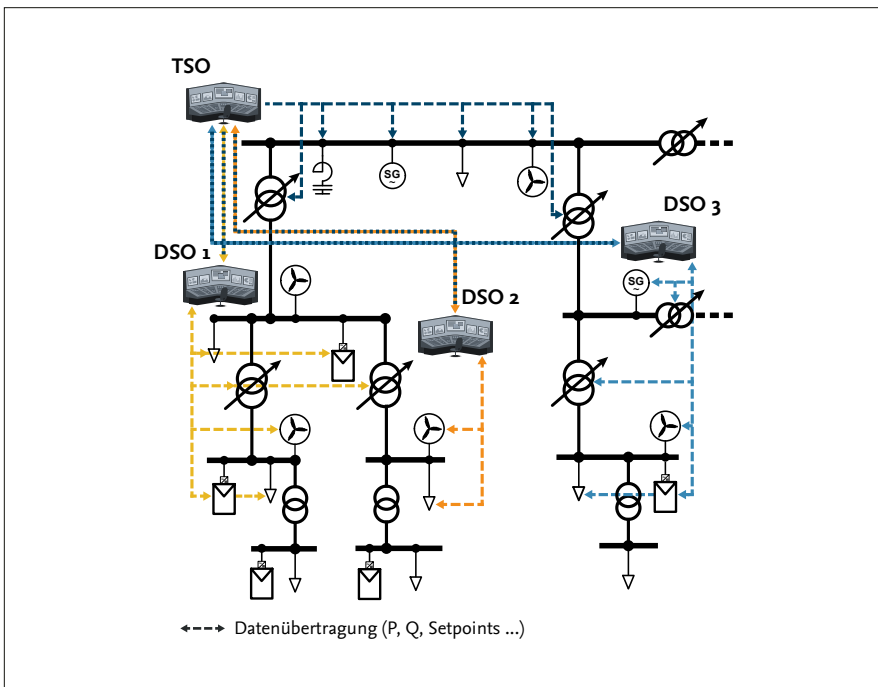


Abbildung 2: Aktives integrales Blindleistungsmanagement

Es wurde gezeigt, dass das VN über hohe Flexibilitätspotenziale verfügt, diese aber durch die geltenden Richtlinien eingeschränkt sind und daher gegenwärtig selten genutzt werden. Durch die erweiterte Nutzung der technischen Potenziale kann eine annähernde 24/7-Verfügbarkeit der Blindleistungsquellen erreicht werden. Zudem konnte gezeigt werden, dass der flexible und effiziente Blindleistungseinsatz durch das integrale BM für Netzbetreiber und Anlagenbetreiber gleichermaßen von Nutzen sein kann. Der Anlagenbetreiber hat mehr Möglichkeiten zur Selbstoptimierung und kann durch den optimierten Blindleistungseinsatz Verluste und Kosten einsparen. Der Netzbetreiber hat neben schnell regelbaren und zuverlässigen Blindleistungsquellen ebenfalls die Möglichkeit, das Netz zu optimieren und Investitionen in vollintegrierte Netzkomponenten einzusparen.

Zur Umsetzung des aktiven und integralen BM wurde im Projekt zudem eine kurzfristige Blindleistungsprognose für die operative Netzbetriebsplanung entwickelt. Die Prognose ermöglicht neben der Abbildung zukünftiger Netzzustände eine quantitative Aussage zu den Blindleistungsbedarfen einzelner Umspannwerke, Netze sowie ÜN-VN-Schnittstellen. Die Prognose der Blindleistung erfolgt unter Anwendung eines Deep-learning-Ansatzes für 12- bis 24-Stunden des Folgetages. Der Ansatz hat gezeigt, dass komplexere Blindleistungscharakteristiken und Muster einzelner Netzbereiche

gelernt werden können. Es zeigt sich jedoch auch, dass hierfür granulare, konsistente und bereinigte historische Datensätze benötigt werden. Auf Basis der Prognoseergebnisse und mit Hilfe der Optimierung können anschließend Blindleistungswerte in Form von Fahrplänen für eine aktive Sollwertvorgabe erstellt werden. Mithilfe dieser kann im anschließenden Netzbetrieb eine optimierte spannungsebenen- und netzbetreiberübergreifende Blindleistungsbereitstellung realisiert werden.

#### Nachfolgeprojekt Q-REAL

Die erfolgreiche Zusammenarbeit zwischen den Forschungseinrichtungen und den beteiligten Unternehmen wird im Projekt Q-REAL fortgesetzt. Beim elenia liegt der Fokus auf der Entwicklung neuer und adaptiver Blindleistungsregelverfahren für EEA und der Erweiterung des datengetriebenen Blindleistungsprognoseverfahrens. Zusätzlich wird an einer Methode gearbeitet, mit der die blindleistungsspezifischen Verluste beliebiger EEA-Parks genauer abgeschätzt werden können, wodurch die Güte wirtschaftlicher Untersuchungen verbessert wird. Die eingehende Untersuchung der konzipierten Blindleistungsverfahren und der Analyse der Verluste werden zudem im Rahmen eines realen Pilotparks erprobt und validiert. Das Projekt läuft voraussichtlich bis 2025.

#### PROJEKT

##### Q-REAL:

Blindleistungsmanagement in der realen Anwendung: Netzplanung, Netzbetrieb und Blindleistungsquellen für Übertragungs- und Verteilungsnetze

#### LAUFZEIT

2023–2025

#### ANSPRECHPARTNER / KONTAKT

**Merten Schuster, M.Sc.**

✉ m.schuster@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391 9719

**Hartmudt Köppe, M.Sc.**

✉ h.koeppe@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391 9719

#### PROJEKTPARTNER



Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg



Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE



KBR Kompensationsanlagenbau GmbH

#### GEFÖRDERT DURCH



Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

FKZ Q-REAL: 03EI4063B

#### KOORDINIERT DURCH

**Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg**



## Vergütung von Blindleistung im Übertragungsnetz

### Entwicklung eines Preismodells für die erweiterte Blindleistungsbereitstellung von STATCOM-fähigen PV-Anlagen

Im Rahmen der Kurzstudie „Preismodell zur erweiterten Blindleistungsbereitstellung durch Stromrichter“ wurde die Bereitstellung von Blindleistung (Q) außerhalb der Technischen Anschlussregeln (TAR) eines realen PV-Park im Übertragungsnetz untersucht. Ziel war die Berechnung von relevanten Verlusten und Kosten, die mit der erweiterten Q-Bereitstellung verbunden sind und die Ableitung einer entsprechenden Vergütung. In Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer ISE hat das elenia die Ausgestaltung eines Simulations- sowie Preismodells übernommen. Der Fokus des Fraunhofer ISE lag auf der hardwaretechnischen Analyse der erweiterten Q-Bereitstellung der Wechselrichter.

#### Kernergebnisse der Untersuchung

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass moderne PV-Parks in der Lage sind, ohne zusätzliche Investitionen Q außerhalb der bestehenden TAR einzuspeisen. Im betrachteten Netz stellen die Anlagen damit einen konkreten Mehrwert für die Spannungshaltung dar. In der Studie wurde eine Methodik entwickelt, mit der die aus der erweiterten Q-Bereitstellung resultierenden Verluste sowie der Verschleiß monetär bewertet werden können. Die Studie liefert damit einen grundlegenden Rahmen für das Verständnis der bestehenden Kostenfaktoren sowie deren Auswirkungen. Bei zukünftigen marktbasierter Ausschreibungen für Q kann dieser Rahmen als Bewertungsansatz genutzt werden, um Kosten und Preise für den Q-Einsatz zu evaluieren.

#### Kostenkomponenten

Die Kosten lassen sich grundsätzlich in drei Komponenten aufteilen: Investitionen in die Q-Kapazität, Kosten der Q-Vorhaltung und Kosten des Q-Einsatzes außerhalb der TAR. Für den PV-Park wurden ausschließlich die Kosten des Q-Einsatzes außerhalb der TAR betrachtet. Im Fokus standen dabei die zusätzlichen Wirkarbeitsverluste in Q-füh-

renden Betriebsmitteln und Wechselrichtern. Darüber hinaus wurden Kosten des zusätzlichen Verschleißes und der damit verbundenen Reduktion der Lebensdauer der Wechselrichter in die Analyse miteinbezogen. Zusätzlich hat das Fraunhofer ISE in Zusammenarbeit mit dem Wechselrichterhersteller Delta Electronics einen Verschleißfaktor für den im Park installierten Wechselrichter ermittelt.

Zur monetären Kompensation des zusätzlichen Verschleißes in der erweiterten Q-Bereitstellung sind bei einem Wechselrichter mit Anschaffungskosten von 7.000€ durchschnittlich 0,34€/Mvarh aufzuwenden. Bei der Ermittlung der monetären Kompensation für die zusätzlichen Wirkarbeitsverluste wurde, unter der Annahme einer fehlenden Beschaffungsstrategie, ein durchschnittlicher Spotmarktpreis von 33,51€/MWh herangezogen. Dieser Preis basiert auf historischen Preisverläufen an den geplanten Einsatztagen (Wochenenden und Feiertage).

#### Simulationsmodell und Betriebsszenarien

Für die Simulation wurden im Rahmen der Studie drei Betriebsszenarien aus historischen Netzbetriebsfällen abgeleitet, in ei-

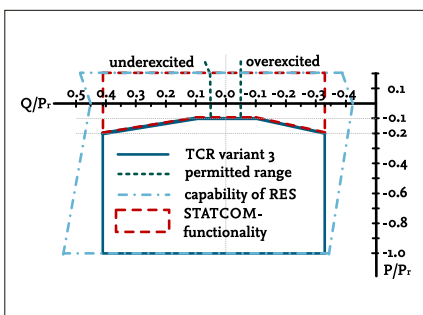


Abb. 1: Darstellung d. Blindleistungsbereiche innerhalb u. außerhalb der TAR im Übertragungsnetz

nem Simulationsmodell des PV-Parks implementiert und anschließend simuliert. Der Fokus lag auf dem Anwendungsfall „QbyNight“, in dem Q lediglich zwischen 22:00 und 06:00 Uhr abgerufen wird. Die Szenarien – Basis, Dynamisch und Extrem – variieren in ihrer Dauer zwischen 1,5 und 3 Tagen. Das Basis-Szenario betrachtet regelmäßige Spannungsbandabweichungen über drei Tage, typisch für Wochenenden und Feiertage. Das Dynamische-Szenario umfasst schnelle Spannungseinbrüche über 1,5 Tage, die häufig durch Marktaktivitäten verursacht werden. Das Extrem-Szenario bezieht sich auf eine dreitägige Abschaltung einer großen Q-Quelle, wie sie z. B. bei Wartungsarbeiten in Kraftwerken vorkommen kann.

**Simulationsergebnisse**

Basierend auf dem Simulationsmodell sind die relevanten Ergebnisse der bereitgestellten Blindenergie, der einhergehenden Wirkarbeitsverluste sowie dem Verlustfaktor – als Quotient der beiden Größen (MWh/Mvarh) – in der Abbildung 1 dargestellt.

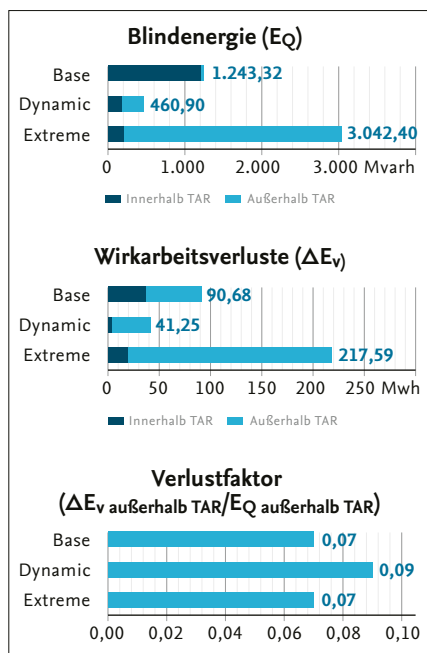


Abbildung 2: Simulationsergebnisse nach Betriebs-szenarien

Die Daten zeigen, dass die Wirkarbeitsverluste für das dynamische Szenario bezogen auf die eingespeiste Blindenergie ca. 25 % höher sind als für das klassische oder extreme Szenario. Dies ist darauf zurückzuführen, dass im dynamischen Betriebsfall häufiger Betriebsbereiche mit höheren Verlusten abgerufen werden. Entsprechend variieren die spezifischen Kosten des simulierten Q-Einsatzes je nach Betriebsszenario. Während die Kosten im Basis- und Extremszenario zwischen 0,93 und 0,95 €/Mvarh liegen, steigen sie im dynamischen Szenario aufgrund der verlustintensiveren Arbeitspunkte auf 1,07 €/Mvarh an.

In der Studie wurde zusätzlich zu den Q-Einsatzkosten eine Anreizpauschale von 0,05 €/Mvarh hinzugefügt. Damit wird der Ausgleich unvorhergesehenen Kosten ermöglicht und ein zusätzlicher Anreiz geschaffen. Aus den Betriebsszenarien ergibt sich damit ein kostengewichteter Durchschnittspreis von 1,04 €/Mvarh für die erweiterte Q-Bereitstellung. In der untenstehenden Tabelle 1 sind die jährlichen Einnahmen bzw. Ausgaben des Anlagen- und Netzbetreibers mit dem genannten Durchschnittspreis für 113 Abruftage im Basisszenario und für jeweils fünf Tage in den anderen Szenarien dargestellt.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass bei der Bepreisung von Q sowohl die oben genannten anlagenspezifischen Kostenfaktoren als auch externe Kostenfaktoren berücksichtigt werden müssen. Externe Kostenfaktoren sind in diesem Fall z. B. Preisentwicklungen der zu beschaffenden Verlustenergie. Je nach Beschaffungsstrategie des Anlagenbetreibers kann sich dies negativ auf die wirtschaftliche Bereitstellung von Q auswirken.

Die Studie liefert damit einen grundlegenden Rahmen für das Verständnis der bestehenden Kostenfaktoren und deren Auswirkungen innerhalb der erweiterten Q-Bereitstellung einer PV-Anlage. Es wird gezeigt, dass eine kompensierende und angemessene Vergütung von Q ein

ausgewogenes Kosten-Nutzen-Verhältnis für Anlagen- und Netzbetreiber darstellen kann. Zukünftige Untersuchungen sind daher auf die reale Erprobung zu richten, um die tatsächlichen Risiken zu quantifizieren und das vorhandene Q-Potenzial von wechselrichtergekoppelten Anlagen im Höchst- und Hochspannungsnetz nutzen zu können.

PROJEKT

Preismodell zur erweiterten Blindleistungsbereitstellung durch Stromrichter

LAUFZEIT

November 2022 – Februar 2023

ANSPRECHPARTNER / KONTAKT

**Merten Schuster**

✉ m.schuster@tu-braunschweig.de  
☎ +49 531 391 9719

**Hartmut Köppe**

✉ h.koeppe@tu-braunschweig.de  
☎ +49 531 391 9719

PROJEKTPARTNER



Fraunhofer ISE



50Hertz Transmission GmbH



Delta Electronics

IM AUFTRAG VON

**50Hertz Transmission GmbH**

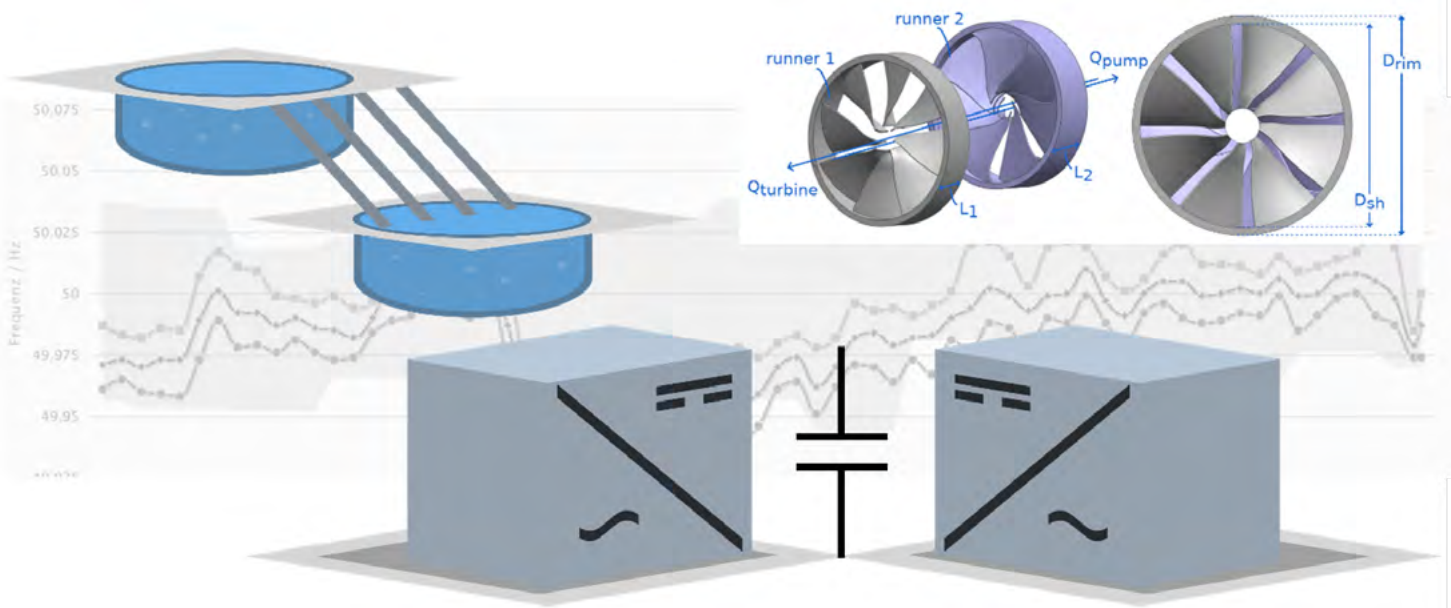
KOORDINIERT DURCH

**Fraunhofer ISE**

Betriebsszenario	Abruftage [#d]	P <sub>Q</sub> year net price 1,04 [€]*	Verschleiß
Basis	113	48.705,12	0,120
Dynamisch	5	1.554,60	0,004
Extrem	5	5.291,87	0,013
Gesamt	123	55.551,60	0,137

Tabelle 1: Jährliche Einnahmen, Kosten und Verschleiß durch die Q-Bereitstellung.

\* exklusive Umlagen und Abgaben



# ALPHEUS – Innovatives Pumpspeicherkraftwerk

## Verbesserung der Netzstabilität durch die Integration innovativer Niederdruckpumpspeicherkraftwerke

Das EU-geförderte Forschungsvorhaben ALPHEUS untersucht und erprobt in einem interdisziplinären und internationalen Konsortium ein neuartiges und innovatives Pumpspeicherkraftwerkskonzept. Dabei besteht das Konsortium aus 11 Partnern aus unterschiedlichen Ländern in der europäischen Union. Dazu gehören sowohl Partner aus dem industriellen Turbinendesign als auch zahlreiche Institute aus universitären Forschungseinrichtungen mit Schwerpunkten in der Fluidynamik, im Bauingenieurwesen und Maschinenbau.

Das ALPHEUS Konzeptdesign unterscheidet sich von herkömmlichen Pumpspeichertechnologien, denn diese weisen in der Regel durchschnittliche Fallhöhen von über 100 Metern auf, um die Betriebsbereiche typischer Turbinentechniken anzusprechen. Dies schränkt Standorte zur Installation von Pumpspeichern in Ländern mit niedrigen Geländetopographien wie die Niederlande und Belgien aus. Hier setzt das ALPHEUS Forschungsvorhaben an und evaluiert die technische Umsetzbarkeit von Pumpspeichern mit niedrigen Fallhöhen,

die ein Überdenken konventioneller Technologien erfordern. So sind konventionelle Pumpspeicherkraftwerke in der Regel über Synchrongeneratoren starr über ihre synchrone Frequenz an das Verbundnetz angekoppelt. Teillastbereiche können entweder gar nicht oder nur mit schlechter Effizienz angefahren werden, so dass ein variabler Pump- oder Turbinenbetrieb nicht möglich ist. Das ALPHEUS Anlagenkonzept beruht deshalb auf der grundsätzlichen Systemarchitektur eines vollumrichtergekoppelten Maschinensatzes.

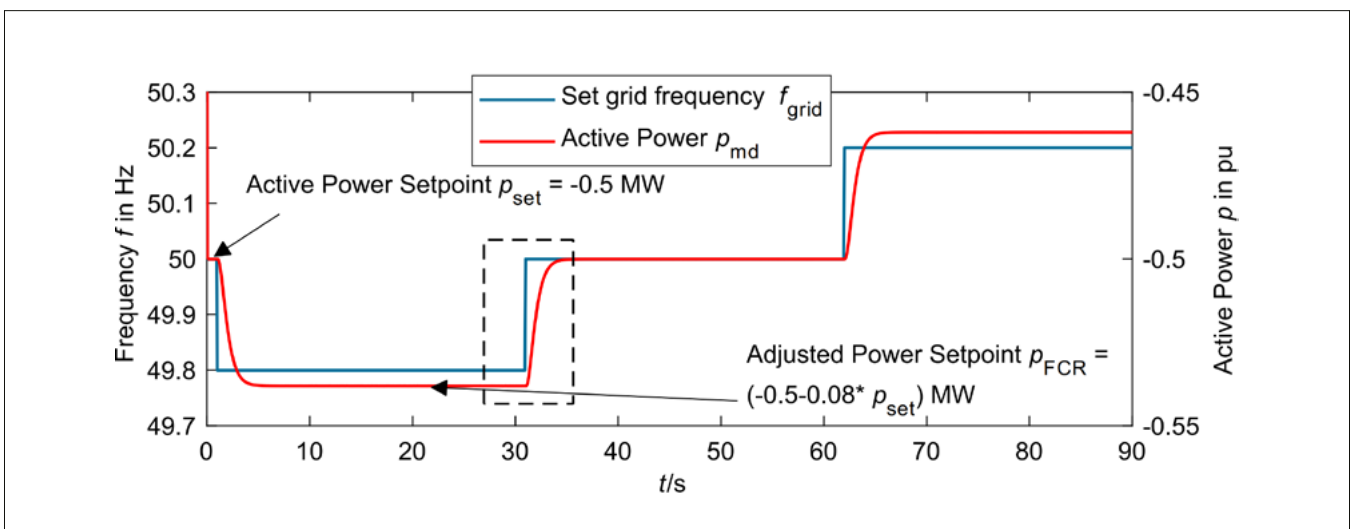


Abbildung 1: Regelleistungskonforme, frequenzabhängige Wirkleistungsreaktion des ALPHEUS Speicherkraftwerks in der Simulation

Diagramm: Frederik Tiedt / elenia



Titelbild: Axial Flux PMSM Power Take-Off for a Rim-Driven Contra-Rotating Pump-Turbine

Dieser wiederum besteht aus zwei gegenläufig zueinander rotierenden Turbinen, die über hocheffiziente Axialflussmaschinen mit dem Vollumrichter gekoppelt sind. Im laufenden Projekt wird identifiziert, inwiefern mit dieser neuartigen Turbinen- und Generatortechnik das ALPHEUS Kraftwerk effizient mit konzeptionellen Fallhöhen zwischen 10–15 m betrieben werden kann.

### Modellierung der elektrischen Eigenschaften

Das elenia Institut beschäftigt sich in diesem Zusammenhang mit der Herausforderung der Integration des ALPHEUS Pumpspeichers in das elektrische Verbundnetz. Die wichtigsten Fragestellungen, die sich für das elenia ergeben sind Untersuchungen zu den elektrischen Charakteristika des Pumpspeicherkraftwerks in Hinblick auf ein netzkonformes und netzstabilisierendes Verhalten. Da die Systemarchitektur auf einer Vollumrichterkopplung des Maschinensatzes basiert, ergeben sich auch zahlreiche Anwendungsfelder für die Bereitstellung von Systemdienstleistungen im Kurz- sowie Langzeitbereich. Zum Nachweis über die Erbringung dieser Systemdienstleistungen wurde für das ALPHEUS Speicherkraftwerk in diesem Zusammenhang ein geeignetes Stromrichter-Regelungskonzept entworfen, das alle Anforderungen für den Betrieb am europäischen Verbundnetz erfüllt. Zur Validierung wurde hierfür ein Simulationsmo-

dell des netzseitigen Wechselrichters und seines Regelungsprinzips mit besonderem Fokus auf eine stabile netzstützende Stromregelung konzipiert.

### Energiewirtschaftliche Potenziale von Niederdruckpumpspeicherkraftwerken

Im derzeit andauernden letzten Projektabschnitt des Forschungsvorhabens, erfolgt durch das elenia eine Bewertung der energiewirtschaftlichen Potenziale des innovativen Pumpspeicherkraftwerks. Typischerweise ergeben sich für potenzielle Anlagenbetreiber von Speicherkraftwerken mehrere Betriebsstrategien zur effizienten Vermarktung. So eignen sich herkömmliche Pumpspeicherkraftwerke aufgrund ihrer Speichergröße zum Abschöpfen von Arbitrageerträgen. Zusätzlich ergeben sich aber auch Potenziale zur Teilnahme an den unterschiedlichen Regelleistungsmärkten: Primär-, Sekundär- und Tertiärregelung. Über den im Projekt bereits validierten technischen Nachweis zur Erbringung von Primärregelleistung kann auch für das ALPHEUS Speicherkraftwerk eine Teilnahme an den Regelleistungsmärkten berücksichtigt werden. Primäres Ziel des Arbeitspaketes des elenia ist dabei die Identifikation von Erlöspotenzialen im Sinne der Betrachtung von möglichen Deckungsbeiträgen im laufenden Betrieb des Pumpspeicherkraftwerks.

#### PROJEKT



#### ALPHEUS:

Augmenting Grid Stability Through Low Head Pumped Hydro Energy Utilization and Storage

#### LAUFZEIT

Februar 2020 – März 2024

#### ANSPRECHPARTNER / KONTAKT

#### Frederik Tiedt

✉ f.tiedt@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391-7787

#### PROJEKTPARTNER

Advanced Design Technology Ltd.,  
TU Braunschweig,  
Technische Hochschule Chalmers,  
Technische Universität Delft,  
IHE Delft Institute for Water  
Education, Universität Gent,  
Technisch-Naturwissenschaftliche  
Universität Norwegens,  
Universität Pau,  
Universität Stuttgart,  
Universität Tuscia,  
Universität Uppsala

#### GEFÖRDERT DURCH



European Union's Horizon 2020  
research and innovation programme  
under grant agreement No 883553



## H2 Terminal Braunschweig

### Aufbau eines Wasserstoff-Kompetenzzentrums am Campus der Technischen Universität Braunschweig

Die Energiewende und die damit verbundene Integration von erneuerbaren Energien in das Stromsystem bringt einen umfassenden Wandel in allen Bereichen mit sich. Neben der volatilen Einspeisung der erneuerbaren Energien in das Stromnetz liegen weitere große Herausforderungen in der Speicherung sowie im Aufbau und Betrieb der Infrastruktur zur Verteilung der Energie an die jeweiligen Verbraucher. Eines der Schlüsselemente zum Gelingen der Strom-, Wärme- und Mobilitätswende ist der zielgerichtete Einsatz von Wasserstoff in allen Ebenen des Energiesystems. Dazu ist zudem eine netzdienliche Integration und Sektorenkopplung der Wasserstoffwirtschaft in das europäische Verbundnetz notwendig.

#### Genereller Aufbau und Ziele des H2 Terminal Braunschweig

Am 23. März 2023 wurde mit dem Baubeginn des Hydrogen Terminals Braunschweig (H2-Terminal) unweit des Braunschweiger Flughafens ein signifikanter Meilenstein im Rahmen der Energiewende erreicht. Das Forschungsprojekt wird vom Bundesministerium für Bildung und

Forschung (BMBF) mit mehr als 20 Millionen Euro gefördert. Die Umsetzung des Forschungsvorhabens erfolgt als Verbundprojekt unter Beteiligung des Steinbeis-Innovationszentrums (siz) energieplus sowie der Technischen Universität Braunschweig. Letztere beteiligt sich mit sieben Forschungsinstituten sowie dem Geschäftsbereich Gebäudemanagement.

Auf einem Areal von circa 4.700 Quadratmetern in der Gerhard-Borchers-Straße in Braunschweig erfolgt der Aufbau eines Forschungslabors. Dieses Labor wird als

Demonstrationsanlage für eine zukünftige Megawatt-Energiezentrale konzipiert, welche die gesamte Wertschöpfungskette von erneuerbaren Energien bis zur Produktion von grünem Wasserstoff umfasst. Dazu werden im Wesentlichen ein 1 MW Anion Exchange Membran (AEM) Elektrolyseur, ein 1,1 MWh Batteriespeicher mit netzbildendem Stromrichter, einer 150 kWp Photovoltaik-Anlage, eine Wasserstofftankstelle, eine Kopplung mit dem Nahwärmenetz, Wasserstoffleitungen zu benachbarten Forschungseinrichtungen sowie diverse Prüf-

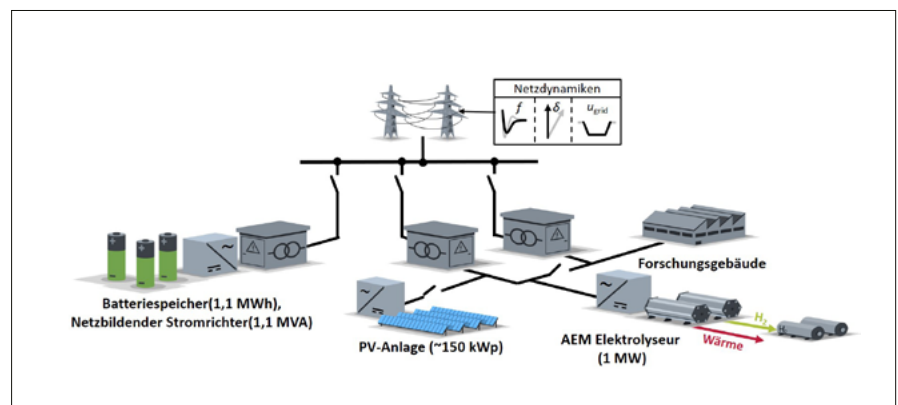


Abbildung 1: Vereinfachte Aufbau der elektrischen Komponenten des H2 Terminal Braunschweig, Foto: Timo Sauer



Titelbild: Spatenstich des Neubaus Hydrogen Terminal Braunschweig in der Gerhard-Borchers-Straße am 23.03.2023, Foto: Timo Sauer

stände errichtet. Die Ziele dieses kooperativen Projekts beinhalten die Bündelung von Forschungssynergien entlang der Wasserstoff-Wirkungskette und die Umsetzung von Forschungsaktivitäten im Bereich der Wasserstoffherzeugung, -speicherung, -einspeisung, -verteilung, -rückverstromung in Brennstoffzellen sowie die netzdienliche Integration in das europäische Stromnetz.

### Netzdienliche Integration von Elektrolyseuren

Die Transformation zu einer klimaneutralen Energieversorgung führt zu einem Strukturwandel der Erzeugungstechnologien hin zu einem stromrichterdominierten Netz. Durch die Abschaltung fossiler Kraftwerke entsteht ein Bedarf an Netzträgheit (Momentanreserve) aus erneuerbaren Energiequellen, die bisher ausschließlich durch Synchrongeneratoren bereitgestellt wurde. Hierbei wird die im Rotor zwischengespeicherte kinetische Energie zum Ausgleich von Leistungsungleichgewichten verwendet, bis nachgelagerte Regelleistungsmechanismen die damit einhergehende Frequenzänderung stoppen und die Frequenz wieder auf Nennfrequenz zurückführen. Nicht nur Erzeugungsanlagen, sondern auch steuerbare Lasten können zur Momentanreserve beitragen. Dazu muss die eingesetzte Stromrichterhardware in der Lage sein, eine netzbildende Regelung der Anlage auszuführen und der Anlagenprozess muss die erforderliche dynamischen Flexibilität im Millisekunden- bis Sekundenbereich ermöglichen. Der Bedarf an grünem Wasser-

stoff führt zu einem Ausbau im Gigawattbereich an Elektrolyseanlagen und bietet theoretisch das Potential, den zukünftigen Bedarf an Momentanreserve zu decken, indem die Anlagen im netzdienlichen Betrieb zur Sicherstellung der transienten Netzstabilität eingesetzt werden. Daraus ergeben sich folgende Forschungsfragen:

- 1.) *Wie schnell kann die Leistung des Elektrolyseprozesses angepasst werden?*
- 2.) *Ist es physikalisch möglich, mit Elektrolyseuren Momentanreserve bereitzustellen und welchen Flexibilitätsbeitrag der Anlage ist realisierbar?*
- 3.) *Ist auch negative Momentanreserve durch kurzzeitige Überlast (im Millisekunden- bis Sekundenbereich) möglich?*

Um Antworten zu diesen Forschungsfragen zu erlangen, soll nach der Inbetriebnahme des H2 Terminal Braunschweig das elektrische Verhalten des Elektrolyseurs im Zusammenspiel mit dem Batteriespeicher untersucht werden. Es sollen Leistungsrampen des Elektrolyseurs abgefahren werden, um Rückschlüsse auf die Dynamik zu erhalten. Der Aufbau ermöglicht es zudem, das dynamische Verhalten des Elektrolyseurs sowohl im Netzparallel- als auch im Inselnetzbetrieb zu untersuchen. Durch die netzbildende geregelte Batterie können im Inselnetz dedizierte Netzdynamiken durch Veränderung von Amplitude und Frequenz der Spannung vorgegeben und die Reaktion des Elektrolyseurs, die von der verwendeten Stromrichterregelung abhängt, aufgenommen werden.

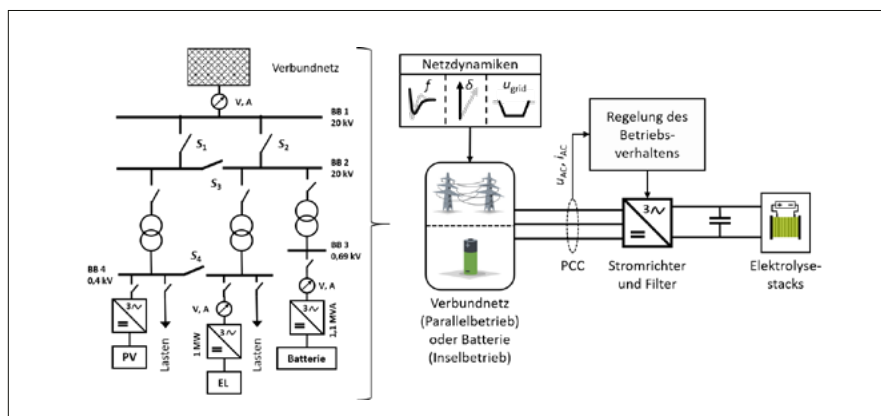


Abbildung 2: Schematischer Versuchsaufbau zur Untersuchung des dynamischen Verhaltens von Elektrolyseuren, Foto: TU Braunschweig, Timo Sauer

### Einbindung des Wasserstoff-Kompetenzzentrums in Lehraktivitäten an der TU Braunschweig

Ebenfalls Ziel ist die Einbindung der Forschungsaktivitäten in Vorlesungen und Labore zur kontinuierlichen Weiterentwicklung von themenrelevanten Studiengängen. Daran beteiligen sich alle Forschungsinstitute des Projekts. Das elenia übernimmt hierbei die Schnittstelle zu den Studiengängen Elektrotechnik, Nachhaltige Energietechnik, Umweltingenieurswesen und Elektromobilität.

#### PROJEKT



#### H2 Terminal Braunschweig

#### LAUFZEIT

Juni 2021 – Mai 2025

#### ANSPRECHPARTNER / KONTAKT

##### Timo Sauer

✉ t.sauer@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391 7721

##### Nils Gräfer

✉ n.grafer@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 793 893 16

#### PROJEKTPARTNER

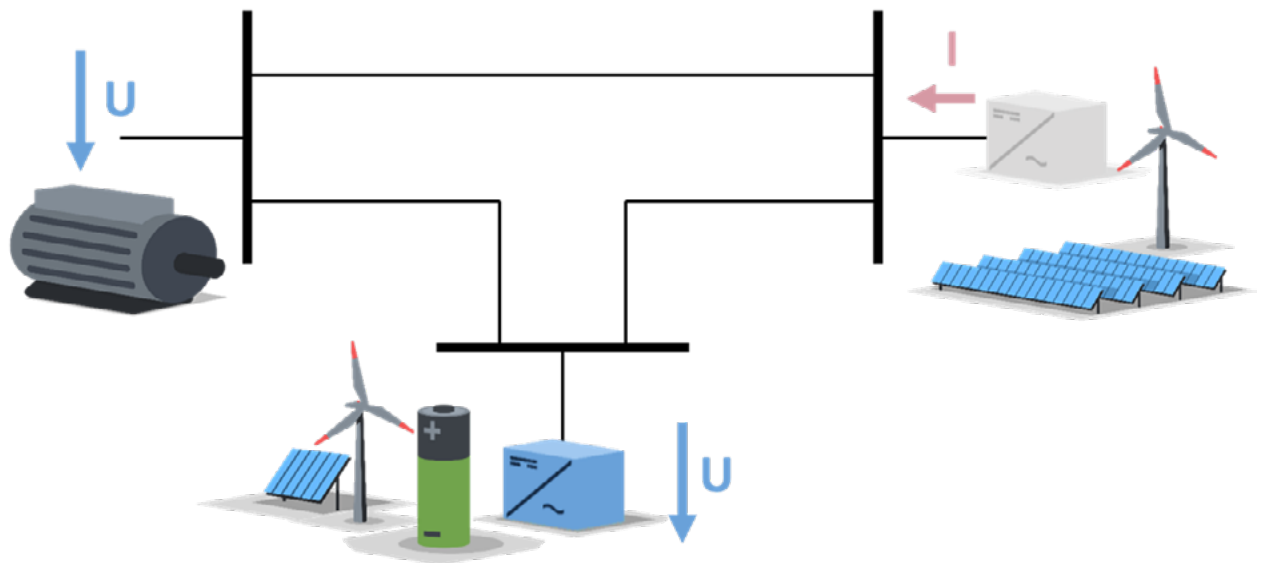
Steinbeis-Innovationszentrum (siz) energieplus, Institute an der TU Braunschweig: Institut für Städtebau und Entwurfsmethodik, Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik, Institut für Energie- und Systemverfahrenstechnik, Institut für technische Chemie, Institut für Verbrennungskraftmaschinen, Institut für Bauklimatik und Energie der Architektur

#### GEFÖRDERT DURCH



#### KOORDINIERT DURCH

Steinbeis-Innovationszentrum (siz) energieplus



## Netzregelung 2.0

### Stabiler Netzbetrieb mit 100% Erneuerbaren Energien

#### Motivation & Ziele des Vorhabens

Die elektrische Energieversorgung und insbesondere die Regelung des elektrischen Netzes in Deutschland befinden sich in einem Transformationsprozess. Während die Netzregelung heute im Wesentlichen auf den Eigenschaften von Großkraftwerken mit Synchrongeneratoren basiert, werden zur Stromerzeugung zunehmend wechselrichterbasierte Erzeugungsanlagen eingesetzt. Einspeisesituationen, in denen die Last zu mehr als 90% aus erneuerbaren Energien gedeckt wird, treten bereits heute in Deutschland auf. Um die Systemstabilität sicherzustellen, müssen zu diesen Zeiten jedoch konventionelle Kraftwerke, sog. „Must-Run Units“, am Netz bleiben.

Diese und weitere Veränderungen im Versorgungssystem sowie im Netzbetrieb bringen eine weitreichende Umgestaltung mit sich. An dieser Stelle setzte das Projekt Netzregelung 2.0 an. Insbesondere neue Zustände, die in einem auf Synchrongeneratoren basierenden Stromnetz bisher nicht vorhanden waren, wurden innerhalb dieses Projektes adressiert.

Das Gesamtziel des Forschungsvorhabens Netzregelung 2.0 bestand darin, aufzuzeigen, dass das elektrische Verbundsystem in Deutschland mit einem sehr hohen Anteil an Wechselrichtern sicher und stabil betrieben werden kann.

#### Forschung am elenia

Im Rahmen des Verbundvorhabens beschäftigte sich das elenia mit der Integration von netzbildenden Wechselrichtern in das Verteilungsnetz. In diesem Kontext lag zum einen der Fokus auf der Bereitstellung von Momentanreserve und deren Wirkungsweise auf die überlagerten Netzebenen. Ziel der Untersuchungen war es, den Beitrag dieser Umrichtersysteme zur Stabilisierung des Versorgungsnetzes im Falle schneller Laständerungen in Netzen mit verringertem Anteil von Einspeisung aus Großkraftwerken zu untersuchen. Zum anderen wurde ein weiterer Fokus auf die Einflüsse netzbildender Umrichtertechnologie auf die Verteilnetze, insbesondere auf lokale Spannungsqualität und Netzschutzmaßnahmen, gelegt.

#### Herausforderungen in der Integration in das Verteilungsnetz

Ein besonderes Themenfeld im Kontext des Netzschutzes ist das Vermeiden von ungewollten Teilnetzen infolge einer Netzauftrennung, die z. B. bei Wartungsarbeiten oder durch einen Netzfehler verursacht werden. Netzfolgende Wechselrichter müssen in diesen Situationen erkennen, dass sie nicht mehr am Verbundnetz betrieben werden und sich dann gezielt abschalten. Der netzbildende Wechselrichter hingegen

versucht jedoch, weshalb man ihn überhaupt auch einsetzt, nach Möglichkeit ein stabiles Netz jederzeit zu erhalten. Somit liegt auch hier ein Zielkonflikt vor, indem auf der einen Seite solche sog. Inselnetze sicher abgeschaltet werden müssen und auf der anderen Seite die netzstabilisierende Eigenschaft des netzbildenden Wechselrichters nicht beeinträchtigt werden soll.

Im Projekt wurde in Netzsimulationsstudien und im Labor gezeigt, dass allein die Präsenz netzbildender Wechselrichter die Fähigkeit von Bestandsanlagen zur Erkennung von Inselnetzen stark beeinträchtigt und die Wahrscheinlichkeit der Bildung von Inselnetzen stark befördert. Dies motivierte die Entwicklung von eigenen, auf die Eigenschaften von netzbildenden Wechselrichtern zugeschnittene Verfahren, die diese zur eigenständigen Erkennung befähigen. Wesentliche Herausforderung ist hierbei vor allem, dass diese die Erkennung auch im Verbundbetrieb in komplexen Netzen mit anderen Anlagen gewährleisten sollen. Entsprechende vielversprechende Ansätze hierfür wurden analysiert und in Simulation betrachtet. Abbildung 1 zeigt ein Niederspannungsnetzmodell und darin befindliche netzfolgende Bestandsanlagen (rot). Sind nur diese aktiv, wird eine gebildete Insel nur in wenigen rot markierten Fällen innerhalb von 6s nicht erkannt



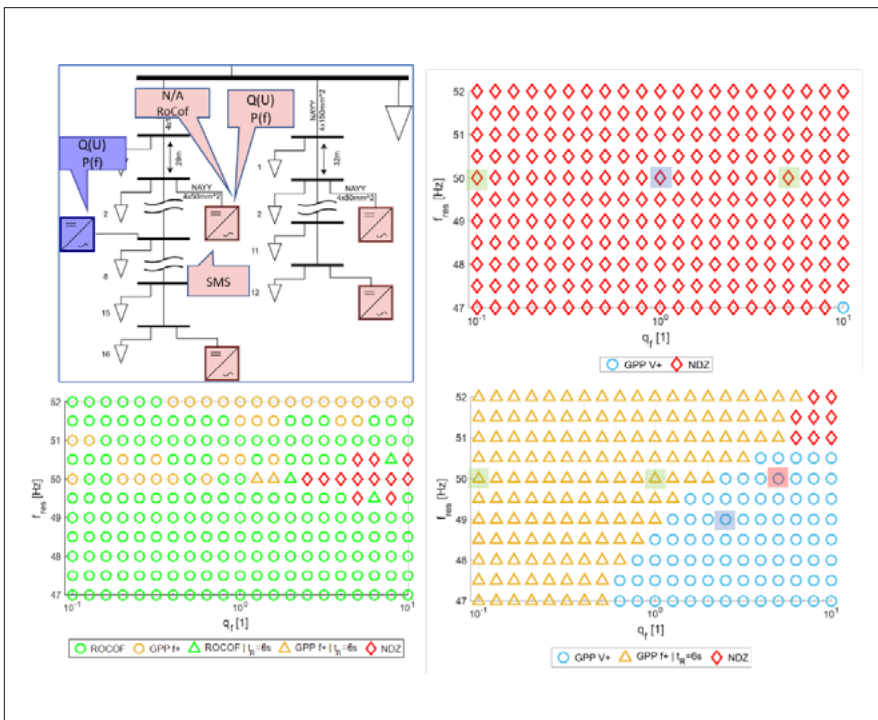


Abbildung 1: Einfluss netzbildender Wechselrichter auf die Inselnetzerkennung in der Niederspannung

(Abbildung 1 links unten). Die Präsenz eines einzelnen Netzbildners (blau) bewirkt einen Fehlschlag der Erkennung aller Bestandsanlagen in fast allen Fällen (Abbildung 1 oben rechts). Das entwickelte Erkennungsverfahren für den Netzbildner ermöglicht eine ähnlich zuverlässige Erkennung aller Anlagen wie vorher (Abbildung 1 unten rechts). Die Ergebnisse motivieren die weitere Umsetzung dieser Verfahren im Labor und in detaillierteren Studien im Projekt ‚Verteilnetz 2030+‘, welches im Mai 2023 gestartet ist.

### Bereitstellung von Momentanreserve aus dem Verteilungsnetz

Durch die Simulation eines Modellsystems bestehend aus Höchstspannungsnetz (HöS-Netz) sowie unterlagertem Hochspannungsnetz (HS-Netz) konnte gezeigt werden, dass netzbildende Stromrichter einen Beitrag zur Momentanreserve für die Frequenzstützung im Übertragungsnetz leisten können. Die Höhe des Beitrags der netzbildenden Anlage hängt bei gleicher Parametrierung von der Impedanz zwischen Anlagen- und Fehlerort ab, jedoch nicht von der Spannungsebene.

Darüber hinaus wurde in weiterführenden Simulationen in einem Modellnetz mit allen Spannungsebenen gezeigt, dass die Ausbreitung von Phasenwinkelsprüngen im

gesamten Netz innerhalb von weniger als einer Millisekunde erfolgt. Daraus kann geschlossen werden, dass eine Bereitstellung von Momentanreserve von technischer Seite nicht auf bestimmte Netzebenen beschränkt werden muss.

Grundsätzlich kann die Erbringung von Momentanreserve demnach auch von netzbildenden Anlagen aus dem Verteilnetz erfolgen, wie die Abbildung 2 zeigt. Hierbei bleibt jedoch weiterhin noch zu untersuchen, wie in Zukunft der stabile und sichere Verteilnetzbetrieb bei Anschluss netzbildender Stromrichter vor dem Hintergrund unerwünschter Nebeneffekte bedingt durch neue dynamische Eigenschaften der Anlagen gewährleistet werden können.

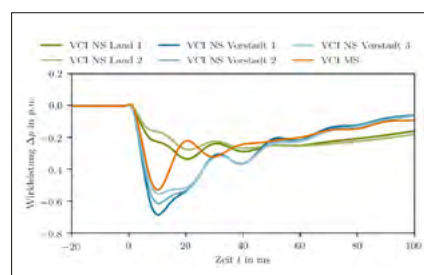
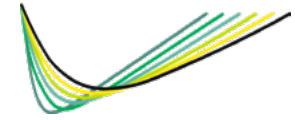


Abbildung 2: Verhalten von netzbildenden Stromrichter (VCI – voltage controlled inverter) am NS-Netz (blau und grün) und am MS-Netz (orange), Quelle: Rauscher, F. „Dynamik von netzbildenden Wechselrichtern in zukünftigen Verteilungsnetzen“

PROJEKT

# Netzregelung 2.0



## Netzregelung 2.0

LAUFZEIT

Dezember 2016 – August 2022

ANSPRECHPARTNER / KONTAKT

**Timo Sauer**

✉ t.sauer@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391 7721

**Björn Oliver Winter**

✉ bjoern.winter@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391 7748

PROJEKTPARTNER

**Weitere Forschungsinstitute:**

Fraunhofer IEE, Uni Kassel

**Anlagenhersteller:**

Siemens, SMA Solar Technology AG

**Netzbetreiber:**

50Hertz, Amprion, TenneT, TransnetBW, EWE Netz, Mitnetz, Westnetz

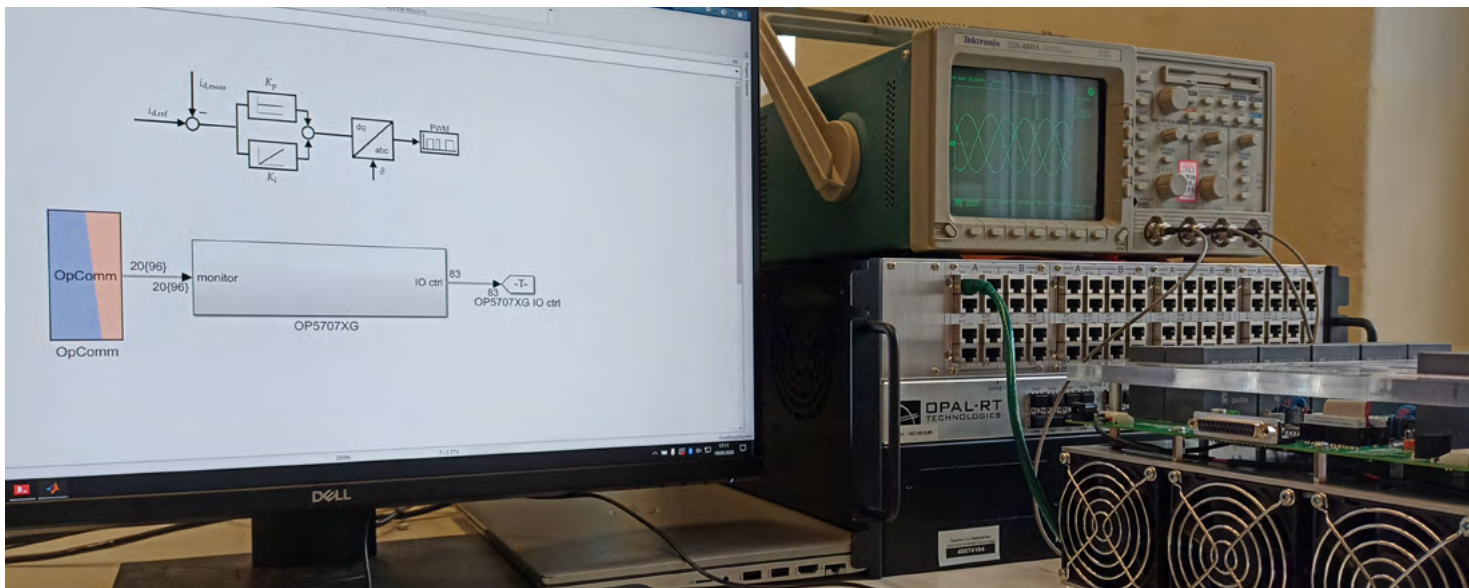
**Verbände und Netzwerke:**

VDE | FNN, DERlab, dena

GEFÖRDERT DURCH



Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz



## MetroSDL

# Erarbeitung metrologischer Grundlagen für neuartige Systemdienstleistungen zur Wahrung der künftigen Netzstabilität

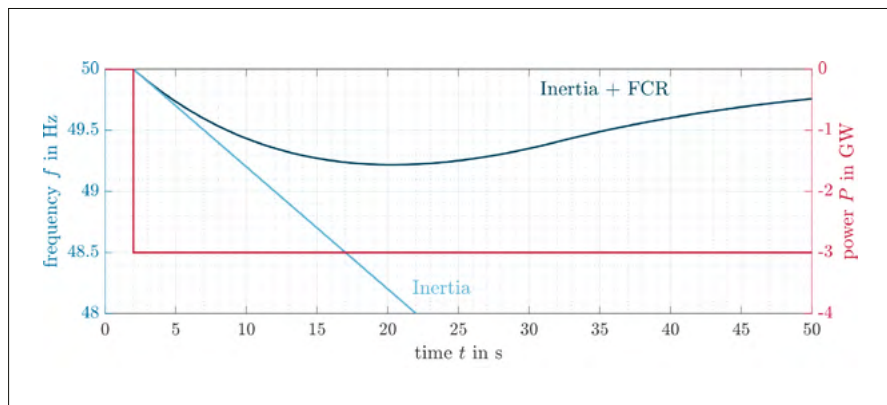
Das erst kürzlich im Juli 2023 begonnene Forschungsvorhaben MetroSDL untersucht technologiespezifische Herausforderungen bei der Wahrung eines stabilen Verbundnetzbetriebs im Kontext stromrichterbasierter Erzeugungsanlagen. Im stetig fortschreitenden Transformationsprozess von Energieversorgungssystemen durch die Energiewende erfolgte in den letzten Jahren eine kontinuierliche Zunahme an Erzeugungsanlagen dessen Energieträger als regenerativ bezeichnet werden. Dieser Transformationsprozess wird auch in den nächsten Jahren mit den aktuellen Beschlüssen zum Ausstieg aus der Kohle- und Atomverstromung durch die Bundesregierung weiter voranschreiten. Damit einhergehend werden konventionelle Kraftwerke zunehmend durch stromrichtergekoppelte Anlagen substituiert. Die Wahrung der künftigen Netzstabilität muss demzufolge durch Bestands- und Neuanlagen erneuerbarer Energieträger über die Bereitstellung von Systemdienstleistungen (SDL) gewährleistet sein.

### Übergeordnete Ziele des Forschungsvorhabens

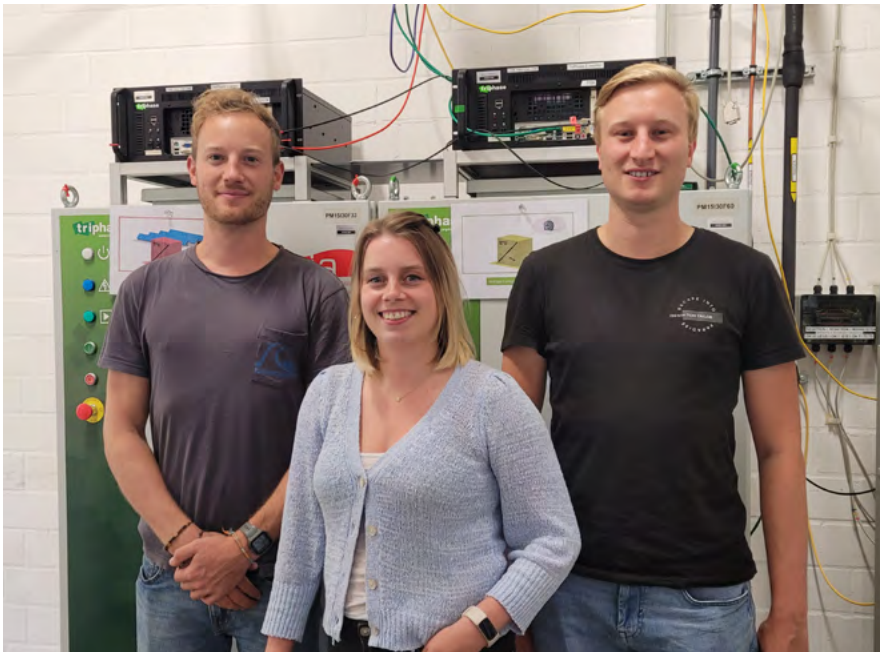
Das übergeordnete Ziel des Vorhabens MetroSDL ist es deshalb, metrologische Grundlagen für neuartige Systemdienst-

leistungen im Rahmen der Roadmap Systemstabilität zu schaffen, die zurzeit vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) erarbeitet wird. Ein essenzieller Bestandteil dieser Roadmap wird der Erhalt der erwähnten Netzstabilität sein. Durch den Einsatz innovativer Stromrichter mit entsprechender Regelungsfunktion kann in der Hypothese auch eine unmittelbare Bereitstellung von Momentanreserve gewährleistet werden. Im Gegensatz zu den fossilen befeuerten Kraftwerken ist diese Eigenschaft jedoch nicht systeminhärent. Daher wird gemäß §12h des Energiewirtschaftsgesetzes (EnWG) auch die „Trägheit der örtlichen Netzstabilität“ als eine neue,

nicht von der Frequenz abhängige Dienstleistung zur Systemsicherheit gefordert. Diese Dienstleistung soll künftig durch die entsprechenden Netzbetreiber marktlich beschafft werden. Netztechniker bezeichnen diese Trägheit auch als Momentanreserve, die sofort zur Verfügung steht. Dies unterscheidet sie jedoch von herkömmlichen Regelleistungsprodukten. Um eine marktbasierete Beschaffung dieser Systemdienstleistung zu ermöglichen, müssen viele Parameter noch metrologisch erfasst und bearbeitet werden. Dazu gehören nicht nur die präzise Bestimmung der Trägheit, sondern auch die dynamische Frequenzmessung, die die genauen Anforderungen



Typisches Frequenzverhalten des Verbundnetzes bei einem Referenzstörfall von 3 GW mit und ohne Einsatz von Primärregelung Diagramm: Stefanie Walujski



Zukünftige Projektbearbeitende Frederik Tiedt, Stefanie Walujski und Stefan Klöpping im elenia Netzynamiklabor, Foto: Tamara Beck

für die marktbasierete Abrechnung von Momentanreserve oder schneller Primärregelreserven festlegt. Diese metrologischen Arbeiten sind die Voraussetzung für die Präqualifizierung, Zertifizierung und Abrechnung von elektrischen Erzeugungsanlagen im Netz. Im Rahmen des Projekts MetroSDL werden diese Grundlagen entwickelt und in einem Messaufbau bewertet und validiert, um eine metrologische Beurteilung von innovativen Systemdienstleistungen und ihrer Bereitstellung durch stromrichterbasierte Anlagen unterschiedlicher Bauarten zu ermöglichen.

**Erweiterung des elenia Netzynamiklabors**

Im Zuge des Forschungsvorhabens wird das bereits bestehende Netzynamiklabor um weitere performante Laborgeräte erweitert. Insbesondere Untersuchungen zu transienten Netzereignissen, deren Vorgänge sich innerhalb weniger Millisekunden abspielen, müssen mittels möglichst dynamischer und präziser Laborgeräte reproduzier- und abbildbar gemacht werden. Deshalb wird das Netzynamiklabor um eine 4-Quadranten Spannungsquelle mit 30 kVA in Ausführung eines Linearverstärkers erweitert werden. Linearverstärker zeichnen sich durch eine nahezu instantane und verzerrungsfreie Signalverarbeitung aus, die für transiente Netzereignisse obligatorisch ist.



Laborspannungsquelle/Linearverstärker, Foto: Spitzenberger & Spies

Bei der Weiterleitung synthetisierter und gemessener Signale durch das bereits bestehende Echtzeitrechnungssystem muss darüber hinaus gewährleistet sein, dass diese einkopplungsfrei zwischen den Geräten ausgetauscht werden können. Dies wird durch eine optische Schnittstelle ermöglicht. Zusätzlich erfolgt im Projektrahmen der Aufbau eines Stromrichter Prototypen mit 10 kVA Nennleistung auf der Basis einer vorkonfektionierten B6-Brücke. Dieser ermöglicht eine vollständig freie Vorgabe an die interne Strom- oder Spannungsregelung des Systems. Eine Nachbildung typischer elektrischer Charakteristika stromrichterbasierter Anlagen wird hiermit umsetzbar.

PROJEKT

**MetroSDL**

Metrologische Grundlagen für neuartige Systemdienstleistungen im Rahmen der Roadmap Systemstabilität

LAUFZEIT

**Juli 2023 – Juni 2026**

ANSPRECHPARTNER / KONTAKT

**Frederik Tiedt**

✉ [f.tiedt@tu-braunschweig.de](mailto:f.tiedt@tu-braunschweig.de)  
☎ +49 531 391 7708

**Stefanie Walujski**

✉ [s.walujski@tu-braunschweig.de](mailto:s.walujski@tu-braunschweig.de)  
☎ +49 531 391 7702

**Stefan Klöpping**

✉ [s.kloopping@tu-braunschweig.de](mailto:s.kloopping@tu-braunschweig.de)  
☎ +49 531 391 7759

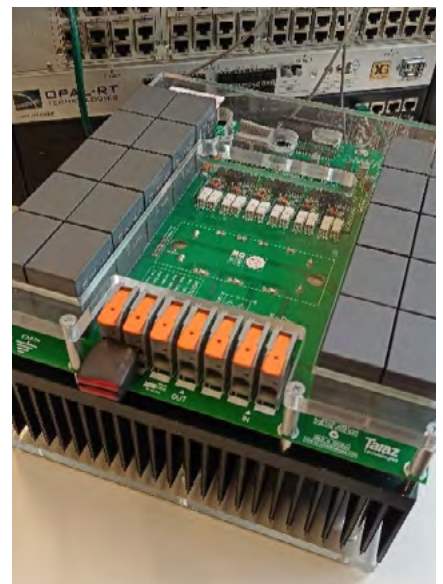
PROJEKTPARTNER

**PTB Braunschweig**

GEFÖRDERT DURCH



Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz



Prototypenwechselrichter, Foto: elenia



## Grid Forming Seminar

### Fachseminar zur Vermittlung von theoretischen und praktischen Inhalten zum Thema Grid Forming im elenia Netzdynamiklabor.

Das Fachseminar zum Thema Grid Forming ist eine umfassende Schulungsveranstaltung, die sich mit der Integration netzbildender Wechselrichter (Grid Forming Inverter) in das elektrische Verbundnetz befasst. Dieses Seminar zielt darauf ab, den Teilnehmern die Grundlagen des Grid Forming zu vermitteln, die elektrischen Charakteristika netzbildender Wechselrichter zu erläutern und die Herausforderungen bei deren Netzintegration aufzuzeigen. Darüber hinaus bietet der praktische Schulungsteil im Netzdynamiklabor des elenia die Möglichkeit, das erlernte Wissen in praktischen Szenarien anzuwenden und die Funktionsweise von netzbildenden Wechselrichtern im Vergleich zu marktüblichen netzfolgenden

Wechselrichtern und Synchronmaschinen zu untersuchen. Das Seminar schließt mit einer Nachbesprechung, Diskussions- und Feedbackrunde ab, in der die Ergebnisse der Laborversuche analysiert werden und zukünftige technische Schwerpunkte sowie Implementierungsmöglichkeiten von netzbildenden Anlagen erörtert werden.

#### Einführung und Grundlagen des Grid Forming

Im ersten Teil des Seminars erhalten die Teilnehmer eine grundlegende Einführung in die Thematik der netzbildenden Wechselrichter. Dabei werden die wesentlichen elektrischen Charakteristika von netzbildendem Verhalten im Verbundnetz vorge-

stellt. Besonderes Augenmerk liegt auf den Herausforderungen bei der Netzintegration von netzbildenden Wechselrichtern, die im Vergleich zu marktüblichen netzfolgenden Wechselrichtern und Synchronmaschinen besondere Anforderungen stellen.

#### Praktischer Schulungsteil im Netzdynamiklabor

Der praktische Schulungsteil findet im Netzdynamiklabor des elenia statt, wo den Teilnehmern die Laborgeräte und -methoden zur Untersuchung der Netzstabilität im Kontext netzbildender Wechselrichter vorgestellt werden. In praktischen Szenarien werden verschiedene Aspekte des netzbildenden Verhaltens behandelt, darunter

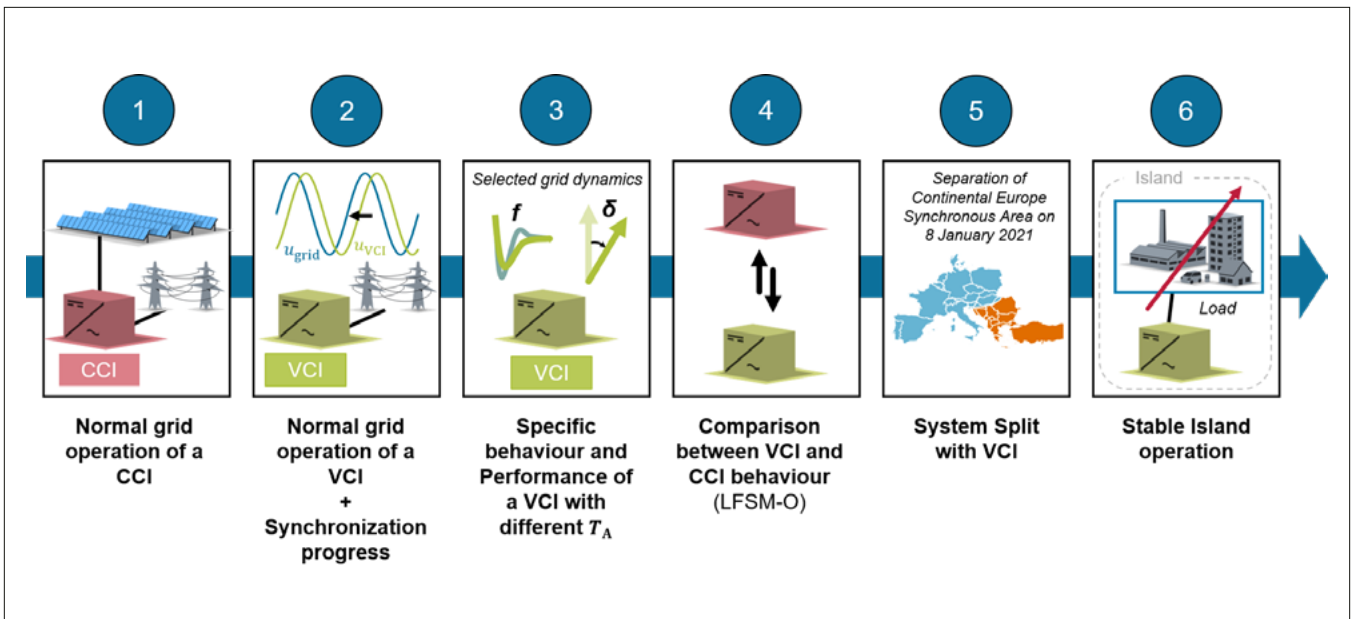


Abbildung 1: Vorschau der experimentellen Szenarien zur Vermittlung der Grundlagen von Grid Forming im elenia Netzdynamiklabor,  
 Grafik: TU Braunschweig, Timo Sauer

←  
 Titelbild: Praktisches Laborseminar zum Thema Grid Forming im elenia Netzdynamiklabor am 15.09.2022,  
 Foto: Timo Sauer

der Synchronisierungsprozess, Netzparallelbetrieb, das Verhalten bei Frequenz- und Winkelsprüngen sowie das Fallen in die Insel. Ein besonderer Fokus liegt auf dem Vergleich zwischen marktüblichen netzfolgenden Wechselrichtern und netzbildenden Wechselrichtern im Parallelbetrieb sowie in kritischen Situationen wie System-Split und Lastsprüngen. Die Laborversuche werden sorgfältig ausgewertet, um ein tiefes Verständnis für die Leistungsfähigkeit und die Einschränkungen der verschiedenen Technologien zu entwickeln.

**Nachbesprechung, Diskussions- und Feedbackrunde**

Im abschließenden Teil des Seminars werden die Ergebnisse der Laborversuche ausführlich besprochen. Die Teilnehmer haben die Möglichkeit wie auch während des gesamten Seminars, Fragen zu stellen und ihre Erkenntnisse zu teilen. Darüber hinaus werden zukünftige technische Schwer-

punkte im Bereich der Netzintegration von netzbildenden Wechselrichtern erörtert. Es werden verschiedene Möglichkeiten des Einführungsprozesses von netzbildenden Anlagen diskutiert, einschließlich der Integration von Vollintegrierten Netzkomponenten (VINKs) und der marktlichen Beschaffung von Momentanreserve. Das Seminar schließt mit einer Feedbackrunde, in der die Teilnehmer ihre Meinungen und Anregungen zum Fachseminar teilen können, um die Qualität zukünftiger Schulungsveranstaltungen weiter zu verbessern.

Dieses Fachseminar bietet eine umfassende und interaktive Lernumgebung für alle, die an der Integration von netzbildenden Wechselrichtern im Verbundnetz interessiert sind, und trägt dazu bei, das Verständnis und die Fähigkeiten auf diesem Gebiet zu vertiefen.

PROJEKT  
**Grid Forming Seminar**

---

LAUFZEIT  
**Laufend**

---

ANSPRECHPARTNER / KONTAKT  
**Timo Sauer**  
 ✉ t.sauer@tu-braunschweig.de  
 ☎ +49 531 391 7721

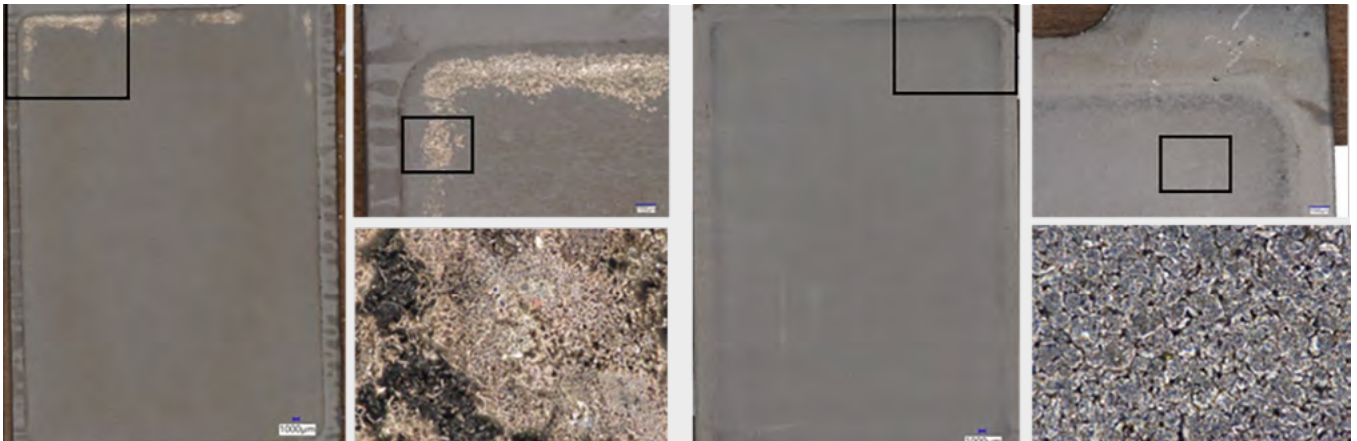
**Frederik Tiedt**  
 ✉ f.tiedt@tu-braunschweig.de  
 ☎ +49 531 391 7708





# Promotionen

Robin Drees .....	96
Melanie Hoffmann .....	97
Frederik Anspach .....	98
Dirk Bösche .....	99
Benjamin Weber .....	100
Stefanie Čelan .....	102
Florian Rauscher .....	103
Jan Bellin .....	104
Benyamin Heryanto Rusanto .....	105



Batterietechnik

## Robin Drees

### Model-based Design and Evaluation of Fast-Charging Strategies for Lithium-Ion Battery Formation and Cyclization



Die relativ hohen Kosten und die lange Aufladezeit von Lithium-Ionen-Batterien sind zwei der größten Herausforderungen für die Akzeptanz von Elektrofahrzeugen. Der erste Ladezyklus in der Zellproduktion dauert oft 10–20 Stunden und führt zu hohen Herstellungskosten. Nicht nur die Schnellladefähigkeit während der Produktion, sondern auch während der Nutzungsphase muss verbessert werden. Ein zu schnelles Laden kann jedoch zu einer geringeren Lebensdauer aufgrund von Lithium-Plating führen. Das Ziel der Dissertation ist die modellbasierte Auslegung und Bewertung verschiedener Schnellladestrategien sowohl für den Formierungsprozess als auch für die Nutzungsphase.

Für die Untersuchungen wurden Drei-Elektroden-Knopfzellen und Pouch-Zellen verwendet. Es wurden zwei modellbasierte Methoden entwickelt zur Optimierung von Schnellladestrategien ohne Lithium-Plating. Die erste Methode ist ein Black-Box-

Modell, das eine Regelung der Schnellladung in Echtzeit ermöglicht. Die zweite Methode ist ein Elektroden-Ersatzschaltbild-Modell (EESB), mit dem sich verschiedene Schnellladestrategien simulieren lassen. Im Vergleich zu Referenzformierungen (6 h) führte der Black-Box-Modell-Ansatz zu einer Verringerung der Ladezeit um 23 % bei 20 °C für die Pouch-Zellen. Bei 40 °C wurde die Ladezeit um 42 % verkürzt. Dabei ist die Gasentstehung während der Formierung ein begrenzender Faktor für die Schnellladefähigkeit. Langsames Vorladen und Entgasen ermöglichten das anschließende Schnellladen ohne Lithium-Plating. Obwohl es keine Leistungsunterschiede zwischen den Zellen nach der Formierung gab, zeigten nach ca. 3 Monaten alle bei 40 °C formierten Zellen einen ca. 10 % höheren Widerstand im Vergleich zu den bei 20 °C formierten Zellen. Dies korrelierte mit Kupferkorrosion an der äußersten Graphitelektroden-seite des Elektrodenstapels der Pouch-Zellen, welche bei 40 °C formiert wurden.

Der EESB-Ansatz ermöglichte die Simulation und Bewertung verschiedener Schnellladestrategien während der Nutzungsphase. Als limitierender Faktor für den Maximalstrom wurden inhomogene Ladezustände an der Schnittstelle zum geometrischen Überhang der Graphitelektrode identifiziert. Die schnellste Strategie für Pouch-Zellen ohne Lithium-Plating dauerte

18,2 Minuten für das Aufladen von 0–50 % SOC bei 40 °C. Die Schnellladestrategie wurde 700 x wiederholt und führte nicht zu einer beschleunigten Degradation im Vergleich zu einer 1C-Referenzzyklisierung, die 65 % langsamer war. Außerdem führten die 700 Schnellladezyklen nur zu ca. 5 % Kapazitätsverlust. Insgesamt ermöglichen die entwickelten Methoden und Ergebnisse die erfolgreiche Entwicklung von sicheren Schnellladestrategien, ohne dass es zu einer beschleunigten Verschlechterung der Zellperformance kommt.

#### Robin Drees

AM ELENIA IN DER ZEIT

02/2019–07/2023

TÄTIGKEITEN AM ELENIA

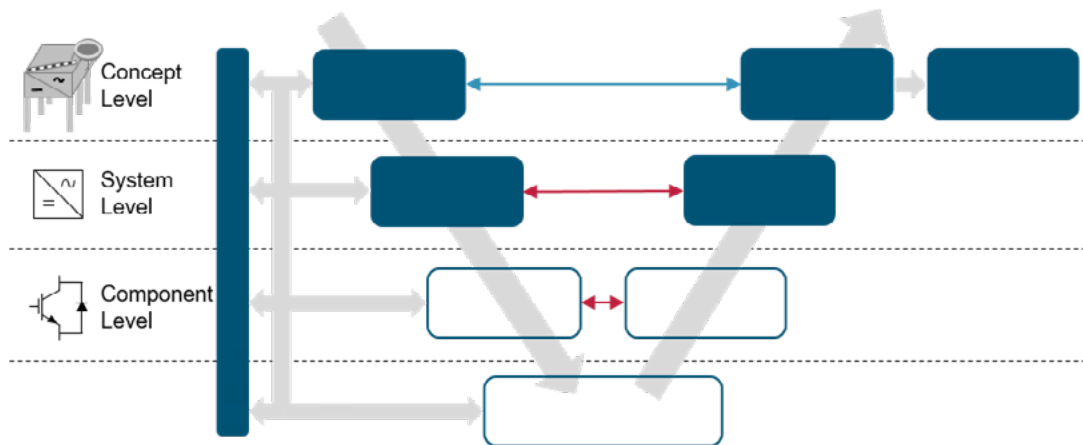
- Mitarbeit und Teamleitung der Batterietechnik
- Bearbeitung der Projekte OptiZell-Form, FormEL, Cell2Pack und viele mehr
- Experimentelle und simulative Schnellladeoptimierung

JETZT TÄTIG BEI

- Fraunhofer Forschungsfertigung Batterie zelle (FFB) als Post-Doc







DC Systeme und Schaltgeräte

## Melanie Hoffmann

### Modellbasierte Systementwicklung für Offshore Hochspannungs Gleichstromübertragung (HGÜ) Netzanschlussysteme



Um das 1,5°C-Ziel des Pariser Klimaabkommens zu erreichen, ist die Umstellung des gesamten Energiesystems auf erneuerbare Energien unerlässlich. Starke und stabile Windverhältnisse auf See machen Offshore-Windenergie fernab der Küste zu einer wichtigen Energiequelle. Die Integration solcher Offshore Windparks (OWP) muss sicher, effizient und bezahlbar sein, weshalb die Hochspannungs Gleichstrom Übertragung (HGÜ) oft die erste Wahl ist. Solche HGÜ Systeme sind aufgrund der vielen Teilsysteme, Komponenten und Schnittstellen sehr komplex. Diese Komplexität, die vielen und unterschiedlichen Anforderungen und die große Anzahl von Systemalternativen erfordern von Netzbetreibern und Herstellern einen systematischen Ansatz, um die am besten geeignete Lösung zu finden, die alle Anforderungen und Funktionen erfüllt. Systems Engineering hat sich seit vie-

len Jahren außerhalb der Energiewirtschaft als geeignete Methodik für die Entwicklung komplexer Systeme bewährt. Die Erweiterung zum Model-Based Systems Engineering (MBSE) ermöglicht die Spezifikation eines Systems in einer universellen Systemmodellierungssprache (SysML), die die Systementwicklung über Disziplinen hinweg ermöglicht.

In dieser Arbeit wird ein Leitfaden für die Entwicklung von HGÜ Systemen auf der Grundlage von MBSE entwickelt, was zu einem detaillierten Verständnis der HGÜ Bestandteile und ihrer Wechselwirkungen führt. Fachspezifische Modelle und Simulationen liefern hierbei weitere Details. Am Ende des Systementwurfs stellt das SysML Modell eine detaillierte Spezifikation des HGÜ Systems dar. Dieses Modell erleichtert anschließend die Analyse des Systems und der Auswirkungen von Änderungen der Anforderungen oder Systemumgebung auf den Systementwurf. Die SysML und disziplinspezifischen Modelle ermöglichen die Verifizierung der Systemanforderungen, z. B. der Verfügbarkeit, die einen großen Einfluss auf die Stromgestehungskosten hat und als Bewertungskriterium auf System- und Komponentenebene verwendet wird. Auch die Validierung wird vorgestellt. Auf der Grundlage dieses Ansatzes für die Entwicklung von HGÜ Systemen wird das

Potenzial für die Erweiterung der Methodik für Energiesysteme im Allgemeinen vorgestellt, um die Umstellung des Energiesystems auf erneuerbare Energiequellen zu unterstützen.

#### Melanie Hoffmann

AM ELENIA IN DER ZEIT

Seit 2018

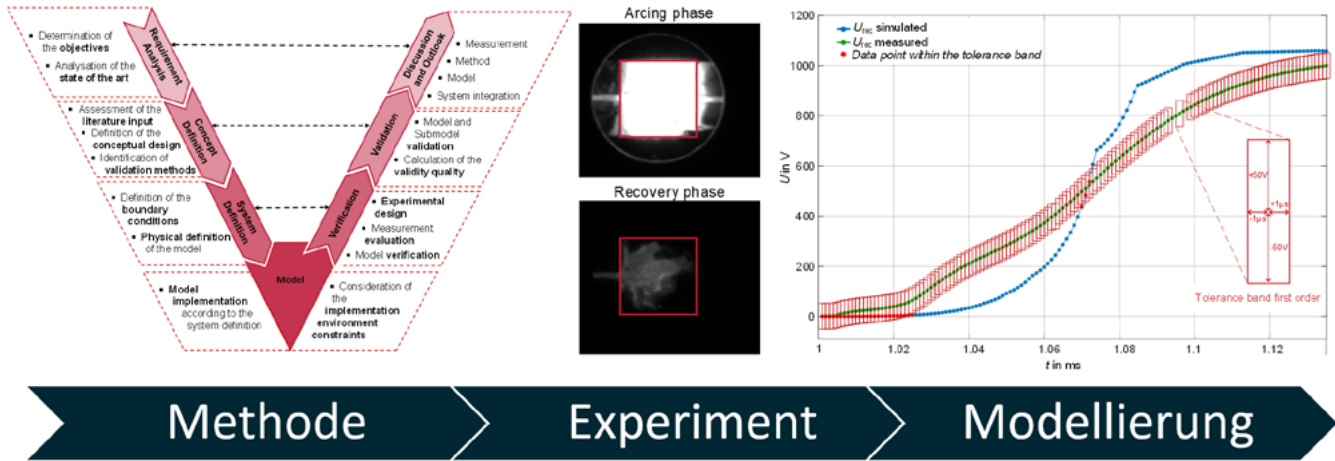
TÄTIGKEITEN AM ELENIA

- Teamleiterin DC Systeme und Schaltgeräte
- Mitarbeit im Projekt SiNED – Systemdienstleistungen für sichere Stromnetze in Zeiten fortschreitender Energiewende und digitaler Transformation
- Entwicklung Systems Engineering Methode für Offshore Wind Netzanschlussysteme

JETZT TÄTIG BEI

- Vattenfall Europe Windkraft GmbH als Grid Manager





DC Systeme und Schaltgeräte

## Frederik Anspach

### Experimental Research and Modelling of LVDC Hybrid Switch Plasma Recovery Energieübertragung und DC-Netze: Forschung zur Verbesserung von Schaltgeräten



Die effiziente Übertragung von großen Energiemengen ist eine der Herausforderung in der elektrischen Energietechnik. Eine Schlüsseltechnologie sind die DC-Netze.

In mobilen und HVDC Übertragungssystemen sind diese bereits Stand der Technik. Die Anwendung auf stationärer Nieder- und Mittelspannungsebene ist Gegenstand von Forschungsprojekten. Neben dem Netz selbst steigen auch die Anforderungen an die Komponenten, z. B. Schaltgeräte. Eine ausschließliche Optimierung der Schaltgeräte ist gegenwärtig nicht mehr ausreichend, simultan muss auch die Systeminteroperabilität, in Form von „Intelligenz“, gesteigert werden. Vorausgehende Untersuchungen zeigen, dass ein detailliertes Verständnis des Entionisierungsprozesses die Schaltzeit von Niederspannungshybridschaltern (NS-HCB) reduziert, aber auch die Weiterentwicklung zu einem in-

telligenten Schaltgerätes unterstützt. Zum Verständnis des Entionisierungsprozesses bildet eine strukturierte Untersuchung der Wiederkehrspannung von NS-HCB unter Anwendung des Systems Engineering die Grundlage.

In den Ergebnissen zeigt sich, der gewählte Modellansatz ist auf Grund seiner Modularität und der frühzeitig definierten Validierungsmöglichkeiten vorteilhaft. Die bestimmte Modelldefinition ist durch die eindeutige Rückführbarkeit der vorgenommenen Randbedingungen, sowie deren Auswirkungen auf den physikalischen Prozess gegenwärtig die effizienteste Methode zur Simulation der Wiederkehrspannung. Die Durchführung der Messungen an einer Modellanordnung erweitern das Prozessverständnis im Vergleich zur existierenden Literatur. Grund hierfür ist die gekoppelte multiphysikalische Auswertung (Elektrik, Optik und Druck). Der Vergleich der Mess- und Modellergebnisse erlaubt eine Verifizierung des Modellverhaltens und die Identifizierung von dominierenden Einflussgrößen. Eine hohe Modellgenauigkeit wird im Rahmen der Parametrisierung erreicht. Die Modellgenauigkeit wird im Rahmen der Validierung unter Berücksichtigung

der Einflussfaktoren, wie Fertigungstoleranzen, bestätigt. Die Bestimmung des Validierungskoeffizienten realisiert die Rückführung der Untersuchungsergebnisse auf Systemebene. Im Rahmen der Diskussion sind die Ergebnisse in vier Kategorien unterteilt: Messungen, Methode, Model und Systemintegration. Die Ergebnisse sind kritisch hinterfragt, in den Stand der Technik eingeordnet und Optimierungspotenziale aufgezeigt.

Basierend auf dieser Arbeit lassen sich für zukünftige Forschungen drei Kernaufgaben ableiten: Erstens, Fortführung der multiphysikalischen Messmethode zur Optimierung des Prozessverständnisses. Zweitens, Erweiterung der Modellbeschreibung von der angenäherten Modellanordnung zu einem realen Hybridschalter. Drittens, Anwendung der entwickelten Methode auf andere Komponenten des DC-Systems.

#### Frederik Anspach

AM ELENIA IN DER ZEIT

2019–2022

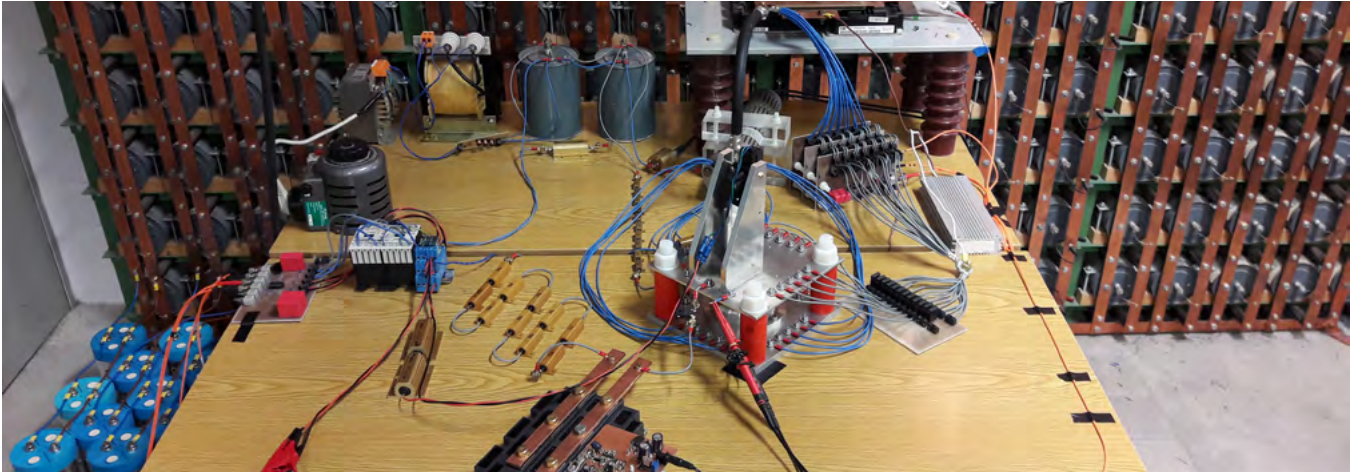
TÄTIGKEITEN AM ELENIA

- Mitarbeit und Teamleitung von DC und Schaltgeräte
- Bearbeitung des Projekts Smart Modular Switchgear II

JETZT TÄTIG BEI

- Volkswagen AG als Fachprojektleiter





DC Systeme und Schaltgeräte

## Dirk Bösche

### Investigation on the residual arc conductance in the mechanical part of Hybrid-Circuit-Breakers before and after current commutation

Viel Energie wird aus fossilen Brennstoffen gewonnen. Um den daraus resultierenden Klimawandel zu stoppen, wird der Anteil erneuerbarer Energien erhöht. Zusätzlich wird versucht die Energieeffizienz zu steigern um den Verbrauch zu reduzieren. Ein vielversprechender Ansatz ist die Umstellung industrieller Netze von Wechsel- auf Gleichspannung. Dadurch können erneuerbare Quellen und Energiespeicher einfach in das Netz integriert werden, was zusätzlich die Ausfallsicherheit erhöht. Außerdem kann Energie, welche im Produktionsprozess anfällt, wieder in das Netz zurückgespeist werden. Allerdings werden entsprechende Schaltgeräte benötigt um einen zuverlässigen und sicheren Betrieb zu ermöglichen. Diese zu entwickeln kann herausfordernd sein. Mechanische Schaltgeräte haben hervorragende Eigenschaften im ein- und ausgeschalteten Zustand. Sie verursachen geringe Durchlassverluste und ermöglichen eine galvanische Trennung. Der Übergang von einem Schaltzustand zu einem anderen kann Probleme verursachen. Insbesondere dann, wenn kleine Ströme mit wechselnder Polarität unterbrochen werden sollen. Gegenteiliges trifft auf Halbleiterschalter zu. Viele von ihnen sind in der Lage ihren Schaltvorgang schnell und ohne Lichtbogen zu ändern. Allerdings verursa-

chen sie signifikante Durchlassverluste und reagieren sensibel auf Überspannungen. Um die Vorteile beider Technologien zu erhalten, werden sie zu einem Hybridschalter vereint.

In dieser Arbeit werden verschiedene Hybridschaltertopologien anhand ihrer Funktionsprinzipien gruppiert und ihre Eigenschaften bewertet. Schließlich wird eine Topologie ausgewählt, welche sich besonders gut für den Einsatz in Niederspannungsgleichstromnetzen eignet. Zusätzlich werden alle notwendigen elektronischen Komponenten und der Ausschaltvorgang erklärt.

Bei der ausgewählten Topologie entsteht während des Ausschaltvorgangs ein Lichtbogen. Dieser wird durch einen parallelen Leistungshalbleiter gelöscht, welcher für eine bestimmte Zeit aktiv sein muss um ein abklingen des Lichtbogens zu erreichen. Die Einschaltdauer des Leistungshalbleiters ist ein wichtiger Faktor für die Dimensionierung. Daher wurde ein Schaltkreis entwickelt, der den hybriden Ausschaltvorgang nachbildet und ein Modellschalter aufgebaut. Mit diesem Versuchsaufbau wird der Einfluss des Kontaktabstandes und der Stromhöhe auf den Abklingvorgang des Lichtbogens untersucht und sein Widerstand gemessen. Zusätzlich

wurde ein Model entwickelt, welches auf einem thermischen Ersatzschaltbild beruht. Dies ermöglicht es den Kurvenverlauf des Widerstandes des abklingen Lichtbogens nachzubilden. Zusammen mit Näherungsgleichungen werden Messungen und Model verglichen. Abschließend werden die Ergebnisse zusammengefasst, kritisch hinterfragt und einige Designüberlegungen zur Beschleunigung des Lichtbogenabklingvorgangs vorgestellt.

#### Dirk Bösche

AM ELENIA IN DER ZEIT

Seit 2015

TÄTIGKEITEN AM ELENIA



- Untersuchung und Entwicklung von DC Hybridschaltgeräten
- Unterstützung bei der Planung und dem Aufbau von Laborversuchen
- Entwurf und Aufbau elektronischer Schaltungen
- Technischer Leiter

Hochspannungs- Vakuum- & Plasmatechnik

## Benjamin Weber

### Investigation of Vacuum Arcs in High Voltage Circuit Breakers



Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der automatisierten, multivariaten Auswertung von Vakuumbögen in Leistungsschaltern. Leistungsschalter sind essentielle Bestandteile des elektrischen Energienetzes und verwenden in der Hochspannungsebene klimaschädliches SF<sub>6</sub>-Gas, welches in der Zukunft durch Alternativen ersetzt werden muss. Eine mögliche Alternative sind Vakuumschalter, deren Schaltprinzip auf der Kontrolle des entstehenden Schaltplasmas durch magnetische Felder basiert. Die Verwendung von transversalen Magnetfeldern zur Bewegung von kontrahierten Vakuumbögen zwischen den Schaltkontakten, wird bisher nur in der Mittelspannungsebene eingesetzt. Um die Vorteile wie geringe Verluste und simples Kontaktdesign in höheren Spannungsebenen zu verwenden, wird die Hochstromphase von Kurzschlussausschaltungen bei höheren Kontaktabständen untersucht und als praktikabel nachgewiesen.

Zur Untersuchung wird eine Methode zu Datenanalyse aus kombinierten op-

tischen und elektrischen Daten vorgestellt. Diese basiert auf einem hybriden Modell zu Verbindung von messtechnisch aufgenommenen Daten mit bekanntem Wissen über die Physik von Vakuumbögen. Die optische Erfassung wird durch eine Hochgeschwindigkeitskamera in einer Spiegelanordnung durchgeführt. Hierdurch werden zwei rechtwinklige Perspektiven aufgenommen, die eine Positionierung des Vakuumbogens zulassen. Hinzu kommen elektrische Größen wie Strom, Spannung und Kontaktabstand. Es resultiert ein Merkmalsvektor, der örtliche, zeitliche, elektrische und abgeleitete Größen beinhaltet. Basierend auf diesem Vektor wird neben der Auswertung auch ein maschineller Lernalgorithmus zur Bestimmung der Bogenerscheinung trainiert. In der Auswertung werden variierende Kontaktabstände von 20 mm bis 46 mm bei verschiedenen Kurzschlussströmen bis 31,5 kA auf verschiedene Aspekte untersucht. Besonders interessant ist die Zunahme der durchschnittlichen Bogengeschwindigkeit auf bis zu 380 m/s mit steigendem Abstand. Andere Parameter, wie Spannung, Strahlung und Bogenmodus weisen keine starke Veränderung auf. Die neu vorgestellte Kennzahl zur Ladungsverteilung zeigt eine vergleichbare Oberflächenbelastung bei hohen Kontaktabständen.

Die Arbeit zeigt, dass das TMF-Schaltprinzip bei hohen Kontaktabständen funktioniert. Die vorgestellte Methode zur automatischen Untersuchung von Schaltvorgängen reduziert den Einfluss mensch-

licher Fehler bei der Bewertung von optischen Plasmaphänomenen und ist auf diverse Parametervariationen anwendbar. Die Ergebnisse werden im Hinblick auf verschiedene Aspekte mit bekannter Literatur diskutiert. Untersuchungen mit schnelleren Öffnungskurven bei den alternativen AMF-Schaltkontakten zeigen vergleichbare Effekte für Bogenspannung und -modus. Die errechneten Kontaktbelastungsstellen sind auf den eingescannten Kontaktstücken identifizierbar.

#### Benjamin Weber

AM ELENIA IN DER ZEIT

11/2017 – 04/2023

TÄTIGKEITEN AM ELENIA

- Mitarbeit im Schwerpunkt Komponenten der Energieversorgung in der Forschergruppe Hochspannungstechnik
- Bearbeitung der Projekte Moliboa, Eudo & Eulas
- Experimentelle Ausschaltuntersuchungen von Vakuumschaltern

JETZT TÄTIG BEI

- Avacon Netz GmbH als Planer für Hochspannungsnetze (110 kV)







Netzplanung und Netzbetrieb

## Stefanie Čelan

### Technisch-wirtschaftliche Auswirkungen der Flexibilitätsbereitstellung von Nur-Strom-Haushalten aus Anlagen- und Netzbetreibersicht

Die angestrebte Klimaneutralität Deutschlands bis 2045 erfordert eine verstärkte Kopplung der Sektoren Strom, Wärme und Verkehr, um den Energiebedarf ausschließlich durch erneuerbare Energien zu decken. Dies führt auf Haushaltsebene zu einer fortschreitenden Elektrifizierung, gekennzeichnet durch vermehrte Installation von Photovoltaik-Anlagen, Batteriespeichersystemen, Wärmepumpen und Elektrofahrzeugen.

Allerdings stellt diese Elektrifizierung die Niederspannungsnetze vor Herausforderungen, da sie nicht auf diese neuen Verbraucher und Erzeuger mit hohen Gleichzeitigkeiten ausgelegt sind. Die Analyse in dieser Arbeit konzentriert sich daher auf das Potenzial von netzdienlich betriebenen Wärmepumpen, Elektrofahrzeugen und Batteriespeichern, um die Verbrauchsnachfrage besser an das Angebot erneuerbarer Energien anzupassen und um Netzengpässen vorzubeugen.

Die simulationsgestützten Analysen zeigen, dass die Bereitstellung von netzdienlicher Flexibilität durch Nur-Strom-Haushalte den zukünftigen Niederspan-

nungsnetzausbau deutlich reduzieren kann: um bis zu 81% bei den Leitungslängen und etwa 86% bei der erforderlichen Transformatorleistung bei vollständiger Beteiligung aller flexiblen Komponenten am netzdienlichen Betrieb. Das entspricht potenziellen Kosteneinsparungen von bis zu 72%. Selbst bei einer Teilnahme von nur etwa 41% der flexiblen Anlagenkomponenten am netzdienlichen Betrieb, könnten die Kosten um ca. 42% reduziert werden.

Um private Anlagenbetreiber zur Bereitstellung ihrer Anlagenflexibilität zu motivieren, wurden in der Arbeit zeitvariable Netzentgelte untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass Anlagenbetreiber durch netzdienlich betriebene Komponenten zusätzliche Einnahmen in Höhe von durchschnittlich ca. 100€/Jahr generieren können.

Die Akzeptanz und Wirtschaftlichkeit des netzdienlichen Betriebs hängen jedoch vor allem von regulatorischen Entwicklungen ab. Daher enthält die Arbeit Handlungsempfehlungen zur notwendigen Anpassung des regulatorischen Rahmens.

Folglich bilden netzdienlich betriebene Nur-Strom-Haushalte einen bedeutenden Flexibilitätsbaustein als Erfolgsfaktor einer sektorenübergreifenden Energiewende.

#### Stefanie Čelan



AM ELENIA IN DER ZEIT

2013 – 2020

TÄTIGKEITEN AM ELENIA

- Mitarbeit im Schwerpunkt Aktives Verteilnetz und im Team Netzplanung und Netzbetrieb
- Bearbeitung der Forschungsprojekte EnEff Campus 2020, elenia energy labs, Energy Toolkit
- Auswirkungen von Wärmepumpen und Nur-Stromhaushaltkonzepten auf Niederspannungsnetze

JETZT TÄTIG BEI

- Geschäftsinhaberin von Clean Energy Toolkits LLC



Netzdynamik und Systemstabilität

## Florian Rauscher

### Dynamik von netzbildenden Wechselrichtern in zukünftigen Verteilungsnetzen

Durch die voranschreitende Energiewende wird es erforderlich, inhärente Eigenschaften der Synchrongeneratoren aus konventionellen Kraftwerken, die für die Netzstabilität zwingend notwendig sind, zukünftig durch neue Komponenten bereitzustellen. Für die Momentanreserve stehen netzbildende Wechselrichter zur Verfügung, die in Kombination mit Energiespeichern die entstandene Lücke schließen können. Gleichzeitig befinden sich netzbildende Wechselrichter nach wie vor in der Entwicklungsphase, weswegen noch viele Fragestellungen offen sind.

Im Rahmen dieser Arbeit wird das Verhalten von netzbildenden Wechselrichtern in verschiedenen Bereichen der Netzdynamik mittels Komponenten- und Systemtests analysiert. Ziel ist dabei, die charakteristischen Eigenschaften netzbildender Wechselrichter mit den zukünftigen Anforderungen zu vereinen und dabei eine wirksame Bereitstellung von Momentanreserve zur Frequenzstabilisierung zu gewährleisten. Durch den vermehrten Einsatz der Erneuerbaren Energien und Speicher wird vor allem auf die Besonderheiten beim Einsatz im Verteilungsnetz eingegangen.

Das dynamische Verhalten netzbildender Wechselrichter wird hierfür mittels Prototypen- Wechselrichtern im Labor analysiert. Zur Prüfung der transienten Stabilität wurden netzbildenden Wechselrichtern Phasenwinkelsprünge ausgesetzt sowie deren Verhalten während lokaler Netzfehler untersucht. Die Dämpfungseigenschaften netzbildender Regelungen werden anhand niederfrequenter Wirkleistungs-Frequenzpendelungen aufgezeigt. Die Frequenzstabilität wird anhand einzelner Frequenzsprünge charakterisiert und der positive Beitrag anhand von Echtzeitsimulationen dargelegt. Neben dem dynamischen Verhalten netzbildender Wechselrichter wird ebenso der Vergleich zu netzfolgenden Wechselrichtern aufgezeigt. Des Weiteren wird auf potenzielle Nachweisverfahren dieser Eigenschaften eingegangen.

Neben den Komponententests wird zusätzlich noch eine systemische Integration in die Verteilungsnetze betrachtet. Hierfür werden Netzstudien im Momentanwertbereich in einem spannungsebenenübergreifenden Netzmodell durchgeführt und die Eignung der Momentanreservebereitstellung aus dem Mittel- und Niederspannungsnetz nachgewiesen. Zudem wird

aufgezeigt, dass durch geeignete Parameterwahl ein aggregiertes Leistungsverhalten verschiedener netzbildender Wechselrichter möglich ist. Abschließend wird auch eine mögliche marktliche und regulatorische Integration einer verteilten Momentanreservebereitstellung diskutiert. Hierdurch zeigt sich, dass selbst Kleinstanlagen, wie Batterieheimspeicher, Momentanreserve für das Gesamtsystem erbringen können.

#### Florian Rauscher

AM ELENIA IN DER ZEIT

11/2016–08/2022

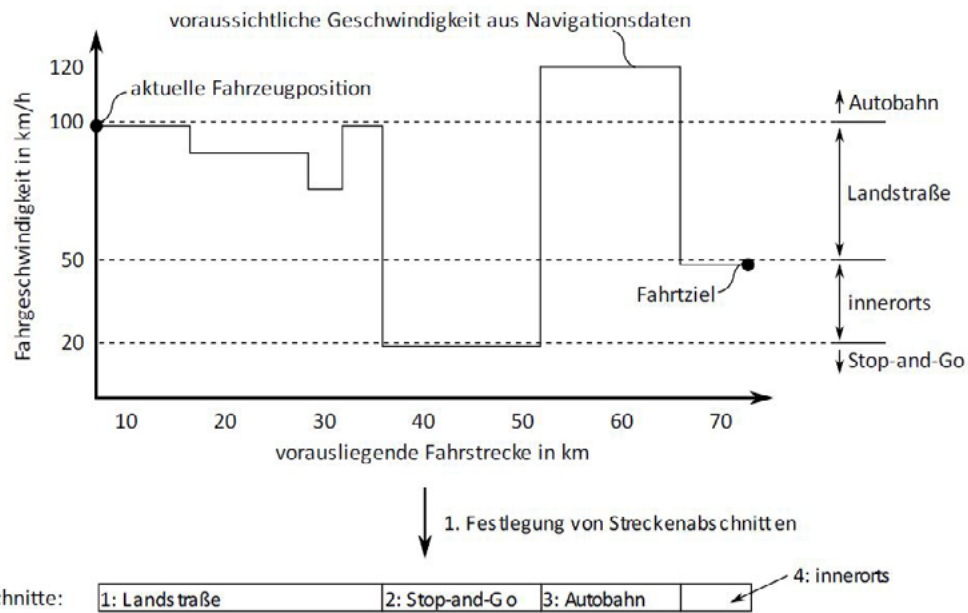
TÄTIGKEITEN AM ELENIA



- Bearbeitung des Forschungsprojektes Netzregelung2.0
- Arbeitsgruppenleiter Energiesysteme (2018–2021)
- Teamleiter Netzdynamik und Systemstabilität (2019–2021)

JETZT TÄTIG BEI

- TenneT TSO GmbH im Energy System Planning als Ingenieur für Power Electronics Integration



## Jan Bellin

### Untersuchung zum Kraftstoffeinsparpotential vorausschauender PHEV-Betriebsstrategien Vergleich von Betriebsstrategie-Optimierern in Testszenarios auf ihr Kraftstoffeinsparpotenzial

Vorausschauende Betriebsstrategien können den ohnehin geringen Kraftstoffverbrauch von Plug-In-Hybridfahrzeugen (PHEV) weiter senken. Sie weisen jedoch häufig einen hohen Ressourcenbedarf sowie eine hohe Sensitivität für auf der Fahrstrecke auftretende Störungen auf.

Die Dissertation widmet sich der Optimierung von vorausschauenden Betriebsstrategien für Plug-In-Hybridfahrzeuge (PHEV), um deren Kraftstoffeffizienz zu steigern. Die Forschung umfasst eine umfangreiche Simulationsstudie, die verschiedene Betriebsstrategien auf ihre Effektivität hin untersucht. Dabei zeigt sich, dass eine erhöhte Komplexität der Strategien in Verbindung mit detaillierten Navigationsdaten zu einer besseren Kraftstoffeffizienz führt. Dennoch können auch weniger komplexe Ansätze in einigen Szenarien signifikante Einsparungen erzielen.

Dazu wurde eine Benchmark-Studie durchgeführt in deren Zuge die Leistung dreier Software-Ansätze zur Betriebsstrategie-Optimierung in verschiedenen Testsze-

narien simulativ verglichen wurde. Als am wenigsten komplexer Software-Ansatz kam dabei ein nicht vorausschauender, regelbasierter Betriebsstrategie-Optimierer zum Einsatz. Weiterhin wurde ein vorausschauender für die Verwendung im Fahrzeug optimierter ressourceneffizienter Ansatz, sowie – als Benchmark – ein vorausschauender idealer Betriebsstrategie-Optimierer evaluiert. Die verwendeten Betriebsstrategie-Optimierer sowie die genutzte Simulationsumgebung wurden dabei im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelt. Die erlangten Daten wurden anschließend stichprobenartig im Fahrversuch validiert.

Eine hohe praktische Aussagekraft der Simulations- und Messergebnisse wurde zum einen dadurch erreicht, dass für die Simulationsdurchführung besonders praxisrelevante Testszenarios gewählt wurden. Zum anderen wurde die Auslegung der verwendeten Betriebsstrategie-Optimierer direkt anhand eines für die Simulation und die Fahrversuche herangezogenen serien-nahen PHEV-Prototypen vorgenommen.

Die gewonnenen Erkenntnisse können als Grundlage für zukünftige Forschung und Entwicklungen dienen. Auch werden mögliche weitergehende Untersuchungen vorgeschlagen.

#### Jan Bellin



AM ELENIA IN DER ZEIT

2012–2022

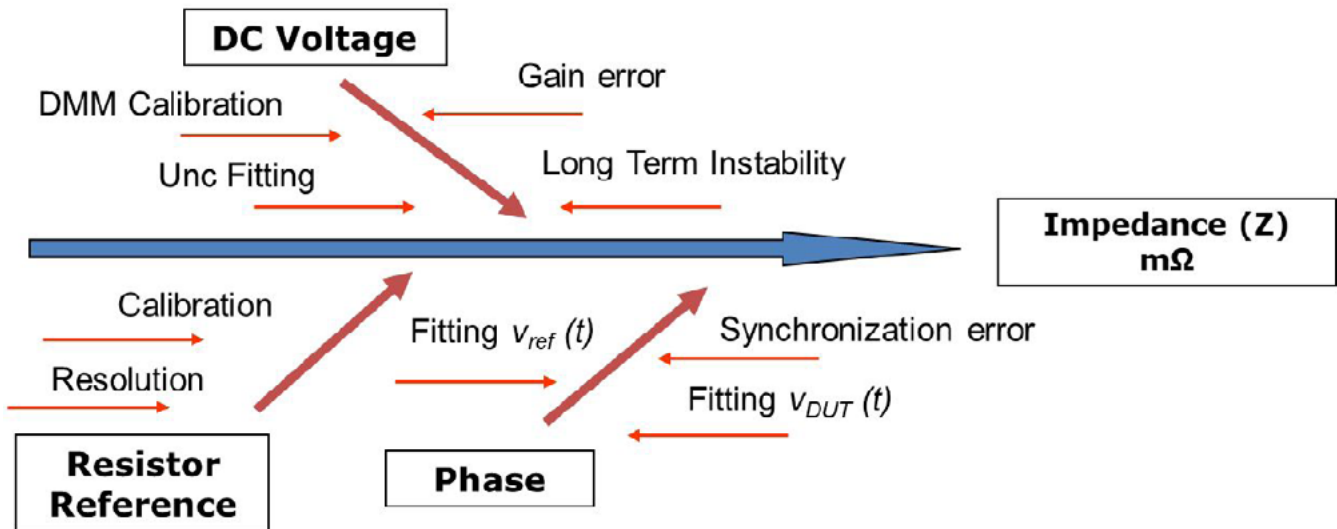
TÄTIGKEITEN AM ELENIA

- Externer Doktorand

JETZT TÄTIG BEI

- Volkswagen Group als Patentreferent





## Benyamin Heryanto Rusanto

### Development of a primary measurement method to characterize low-impedance reference standard Investigating low impedance standards for Li-ion battery EIS, introducing a precise measurement method

Impedance standards having impedance values in the low  $m\Omega$  range, with non-zero reactances, and operable with AC-currents of a few Amps and up to a few kHz are needed for appropriate impedance meter calibration. These challenging operation parameters are most relevant for electrochemical impedance spectroscopy of high energy Li-ion battery cells. We present a primary measurement method that can be used for the characterisation of respective impedance standards traceable to the SI.

This thesis describes the development of a primary measurement method to characterize low-impedance reference standard. Basically, two calibrated high precision DC voltage meters are used to measure AC voltages across a characterised reference resistor and the impedance standard. The measured voltages are fitted with sin waves and the complex impedance value is calculated from the amplitudes and phase difference of the voltage curves. Therefore, this research begins with determining the optimum parameters in using DMM for DC

voltage sampling and determining the effective synchronization technique of two DMMs so as to obtain precise phase measurement results. Acquisition software development is also carried out to control all instruments and carry out continuous measurements based on a predetermined frequency list.

We present the measurement results of a reference impedance standard in  $m\Omega$  range, including a full uncertainty budget. Moduli of the measured impedances are compared with those of another method that has been presented recently. The results are equivalent up to 1 kHz and within a relative expanded uncertainty of around 0.42%.

#### Benyamin Heryanto Rusanto

AM ELENIA IN DER ZEIT

10/2017 – 04/2022

TÄTIGKEITEN AM ELENIA

- Doctoral Student

JETZT TÄTIG BEI

- Researcher at BMKG Calibration Laboratory



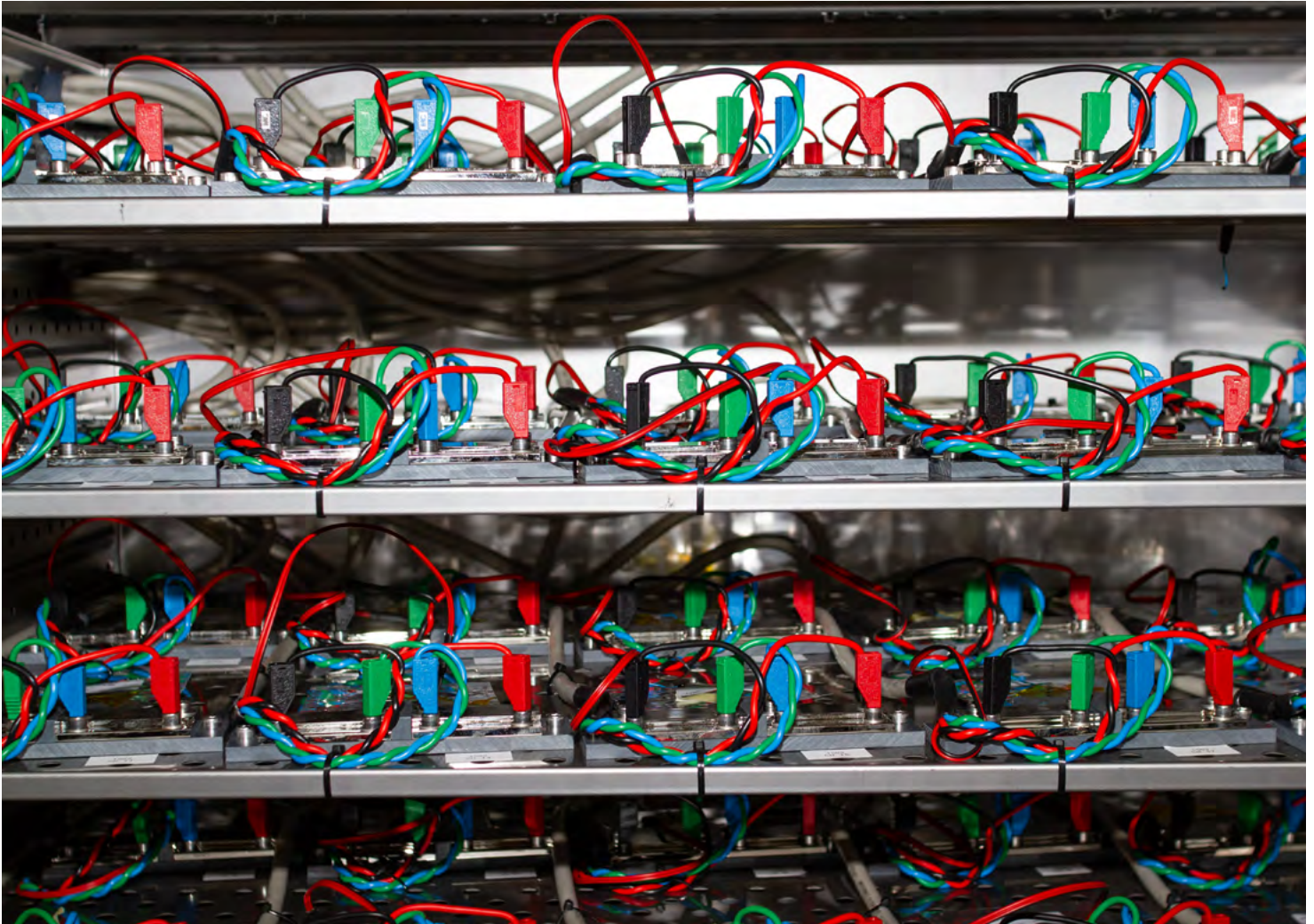
# Labore und Werkstätten



Batterietest-Labore .....	109
Blitzschutzlabor .....	113
DC-Demonstrationsnetzlabor .....	117
Hochleistungsgleichstromprüffeld .....	121
Hochspannungshalle .....	125
Isolierstofflabor .....	129
Kooperationslabor .....	133
Leistungsprüffeld .....	137
TE-Kabine zur Messung von DC-TE .....	141
elenia-Ladepark .....	145
Energiemanagementlabor .....	149
Netzdynamiklabor .....	153
Mechanische & Elektrotechnische Werkstatt .....	159
IT-Abteilung des elenia .....	163



# Batterietest-Labore



## KONTAKT

**Oliver Landrath, M.Sc.**

✉ o.landrath@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391 7742

**Anna Rollin, M.Sc.**

✉ anna.rollin@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391 9734

## WEBSEITE

<https://www.tu-braunschweig.de/elenia/forschung/batterieprueftechnik>



## AUFGABEN UND LEISTUNGEN

- Zellfertigung von 3-Elektroden-Zellen
- Formierung von Batteriezellen
- Elektrische Charakterisierung
- Alterungsuntersuchungen
- Modellierung und Simulation
- Post-Mortem-Analysen mittels Digitalmikroskopie

## Batterietest-Labore am elenia

### Test- und Prüfmöglichkeiten auf Zell-, Modul- und Systemebene.

Die Batterietechnik schreitet aufgrund des zunehmenden Bedarfs an elektrischen Energiespeichern für mobile und stationäre Anwendungen immer weiter voran. Damit einher gelangt die Thematik verstärkt in den Fokus aktueller Forschungsvorhaben. Dabei spielen Lithium-Ionen-Batterien eine wesentliche Rolle, da diese vergleichsweise hohe Energie- und Leistungsdichten als elektrische Energiespeicher bereitstellen können. Der hohe Wirkungsgrad sowie die Langzeitstabilität tragen ebenfalls zu ihrer Vorreiterposition bei. Trotzdem besteht immer noch ein großes Forschungspotential im Bereich der Batterietechnik, um die anspruchsvollen Anforderungen an diese Energiespeicher zu erfüllen.

Das elenia Institut für Hochspannungstechnik und Energiesysteme verfügt über eine Vielzahl von Batterietesteinrichtungen an verschiedenen Standorten. Thematisch lassen sich diese wie folgt hinsichtlich der Forschungsschwerpunkte unterscheiden:

Im Batterie Test Labor (BatLab) im Kellergeschoss des elenia befinden sich Testsysteme für spezielle Drei-Elektroden-Messzellen, welche neben dem Plus- und dem Minuspol noch eine Lithium-Referenz-Elektrode besitzen. Dadurch ist es möglich die Elektroden separat elektrisch zu charakterisieren. Diese Zellen können seit Anfang 2020 in einer Glovebox unter Argon-Atmosphäre hergestellt werden. Aktuelle Forschungsarbeiten beschäftigen sich u. a. mit der modellbasierten Auslegung von Schnellladestrategien verschiedener Zellmaterialsysteme.

An der Battery LabFactory Braunschweig (BLB) und der dazugehörigen Halle (ehemals Institut für Energie- und Systemsverfahrenstechnik, InES) erfolgen schwerpunktmäßig Untersuchungen mit großformatigen Zellen ohne Referenz-Elektrode. Dabei werden maßgeblich eigens in der Pilotlinie gefertigte, aber auch kommerzielle oder von Projektpartnern bereitgestellte Zellen getestet. Aktuelle Forschungstätigkeiten beschäftigen sich u. a. mit dem Einfluss der Formierung auf die Zellperfor-

mance, der elektrischen und elektrochemischen Charakterisierung zur Qualitätsbewertung und der Langzeitzyklisierung zur Identifikation von Alterungsmechanismen.

In unseren Laboren an der Physikalischen Bundesanstalt Braunschweig (PTB) steht die Modul- und Systemebene im Fokus. Der Schwerpunkt der Untersuchungen liegt auf der Batteriemodul- und systemdiagnose. Aktuelle Projekte befassen sich u. a. mit der Charakterisierung von Batteriemodulen zur Identifikation der Eignung für Second-Life Anwendungen. Des Weiteren werden elektrische und thermische Sicherheitstest auf Zell- und Modulebene durchgeführt.

Für die unterschiedlichen Untersuchungen stehen an den vier Standorten eine Vielzahl an Gerätschaften zum Testen der Batterien zur Verfügung. Das Portfolio umfasst Geräte der Firmen Ametek, BaSyTeC, Digatron, EL-Cell GmbH, Gamry Instruments und Greenlight. Um konstante Umgebungsbedingungen während der Tests zu garantieren, sind Temperaturprüfkammern mit einem großen Temperaturbereich vorhanden. Zur Gewährleistung einer sicheren Testumgebung verfügen alle Teststände neben einem F90-Temperaturschrank und den Batterietestern über eine umfassende Sicherheitsausstattung, welche im Falle einer Havarie, dem thermischen Durchgehen einer Batterie, greift. Diese besteht aus einer Schranklöschanlage der Fa. Wagner sowie einem Abluftsystem und einem mehrstufigen Havariefilter der Fa. Stöbich technology. Nach der Gefahreinstufung bei Batteriefehlern entsprechend EUCAR kann damit bis Hazard Level (HZ) 5 getestet werden.

Mit den Batterietestsystemen können Lithium-Ionen-Batterien verschiedener Formate mit Strom- und Spannungsprofilen belastet werden, um die elektrischen Eigenschaften zu charakterisieren. Sogenannte Kapazitätstests werden bei konstanter Strombelastung durchgeführt, um die energetischen Eigenschaften zu bestimmen. Stromraten-, Innenwiderstands-

und Impedanzmessungen ermöglichen die Beurteilung der elektrischen Leistungsfähigkeit. Durch periodische Lade-, Entlade- und Lagerungszyklen wird die sinkende verfügbare Kapazität und der Anstieg des Innenwiderstands erfasst. Dadurch werden die zyklischen Alterungseigenschaften verschiedener Materialien oder Belastungsprozeduren abgeleitet. Zudem werden die Ergebnisse dieser Alterungsstudien seit 2021 durch Post-Mortem-Analysen unterstützt. Dabei werden die Zellen unter Schutzgasatmosphäre geöffnet und mikroskopiert. Durch spezielle Methoden wie der differentiellen Spannungsanalyse und der elektrochemischen Impedanzspektroskopie können verschiedene Ursachen für die Alterung der Batterien ermittelt werden. Darüber hinaus ist die kalendarische Alterung in Sicherheitsschranken Untersuchungsgegenstand, um z. B. die Selbstentladung über einen gewissen Zeitraum zu ermitteln oder durch verschiedene elektrische Charakterisierungstest den kalendarischen Alterungseinfluss zu quantifizieren.

Abgesehen von den klassischen Testprozeduren zur Ermittlung der elektrischen Eigenschaften von Batteriezellen, werden mithilfe der Batterietestanlagen auch spezielle Puls-Methoden angewandt, um Batteriemodelle zu parametrieren. Der Fokus liegt dabei auf elektrischen Ersatzschaltbildmodellen, welche es erlauben das elektrische Verhalten der Batterie simulativ abzuleiten. Wie auch bei den anderen Batterietestverfahren muss stets darauf geachtet werden, dass die Batterien bei konstanten und gleichen Umgebungsbedingungen untersucht werden. Dazu stehen mehrere Temperierungskammern mit einem großen Temperaturbereich zur Verfügung. Diese erlauben ebenfalls die Parametrierung der Batteriemodelle in Abhängigkeit der zulässigen Einsatztemperatur. Mithilfe von elektro-thermisch parametrierten Batteriemodellen kann der Einsatz der getesteten Batteriezellen für verschiedene Einsatzgebiete und Anwendungen überprüft werden.



GLOVEBOX DER FA. M. BRAUN

Bereitstellung eines Arbeitsplatzes unter Argon-Schutzatmosphäre

- 0,8 m<sup>3</sup> Boxvolumen
- Schleusenofen bis 120 °C



TEMPERATURPRÜFSCHRÄNKE

Bereitstellung einer definierten und konstanten Testumgebung

- 6 × KB 420/S\*, KB 700/S\*
  - Prüfvolumen 6 × 420 l und 2 × 700 l
  - -5 °C bis 100 °C
- MK 240/S\*
  - Prüfvolumen 240 l
  - -40 °C bis 180 °C
- 2 × BF 115
  - Prüfvolumen 112 l
  - 30 °C – 100 °C

TEMPERATURPRÜFSCHRÄNKE DER FA. WEISS UND VÖTSCH

- Prüfvolumen 600 l und 34 l
  - -40 °C bis 180 °C und -20 °C bis 80 °C
  - S\* inkl. Schranklöschung, Abluft und Havariefilter



KEYENCE DIGITALMIKROSKOP VHX7000

Optische Untersuchungen von Elektrodenmaterialien

- 20 × – 2500 × Vergrößerung
- 3D-Messsoftware



3-ELEKTRODEN-ZELLTESTER DER FA. EL-CELL

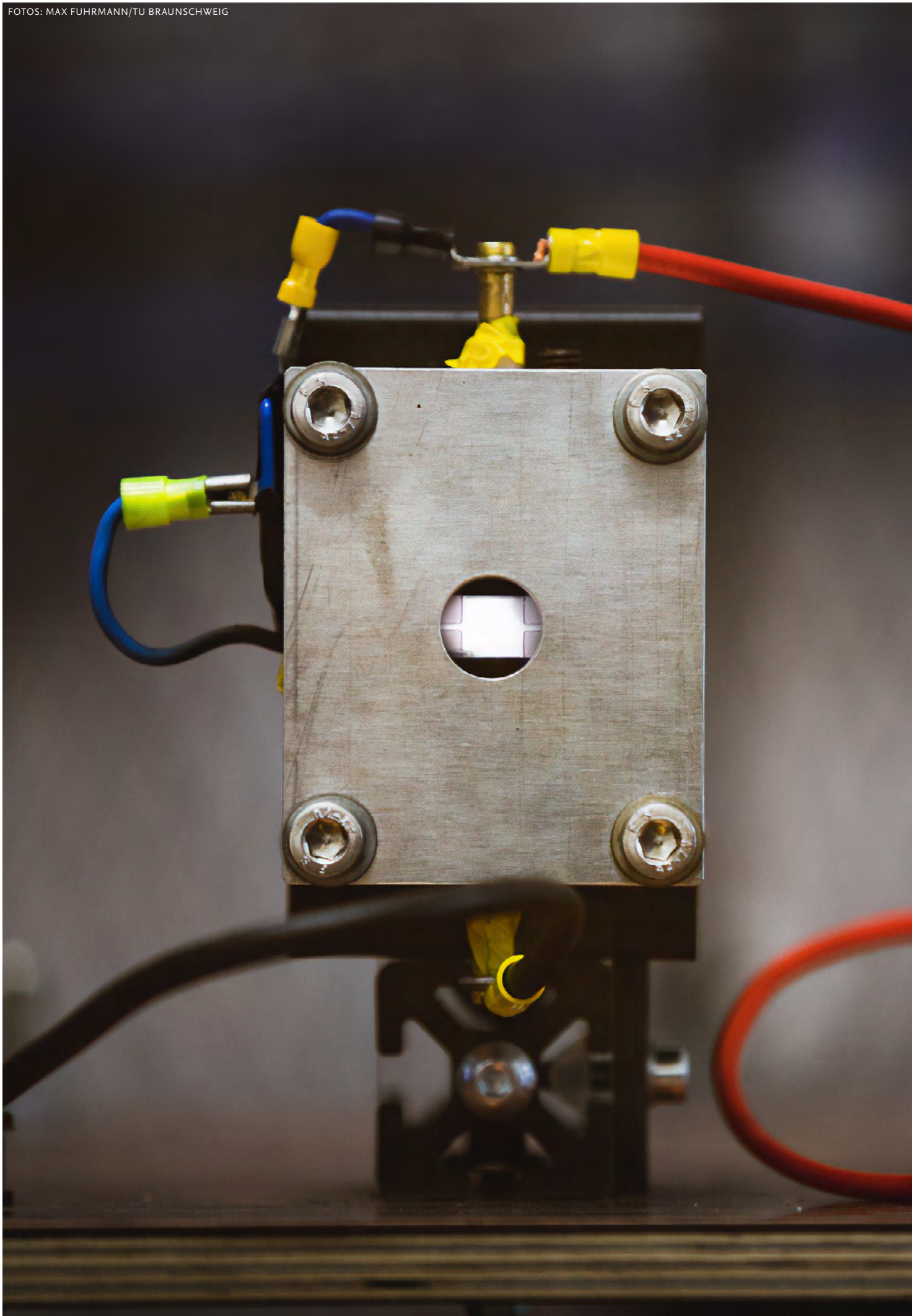
- Testsystem für Drei-Elektroden-Messzellen
- 32 Kanäle ± 0,1 A, 0–6 V, EIS
- 8 Dockingstationen für andere Zelltester



ZELLTESTER DER FA. BASYTEC

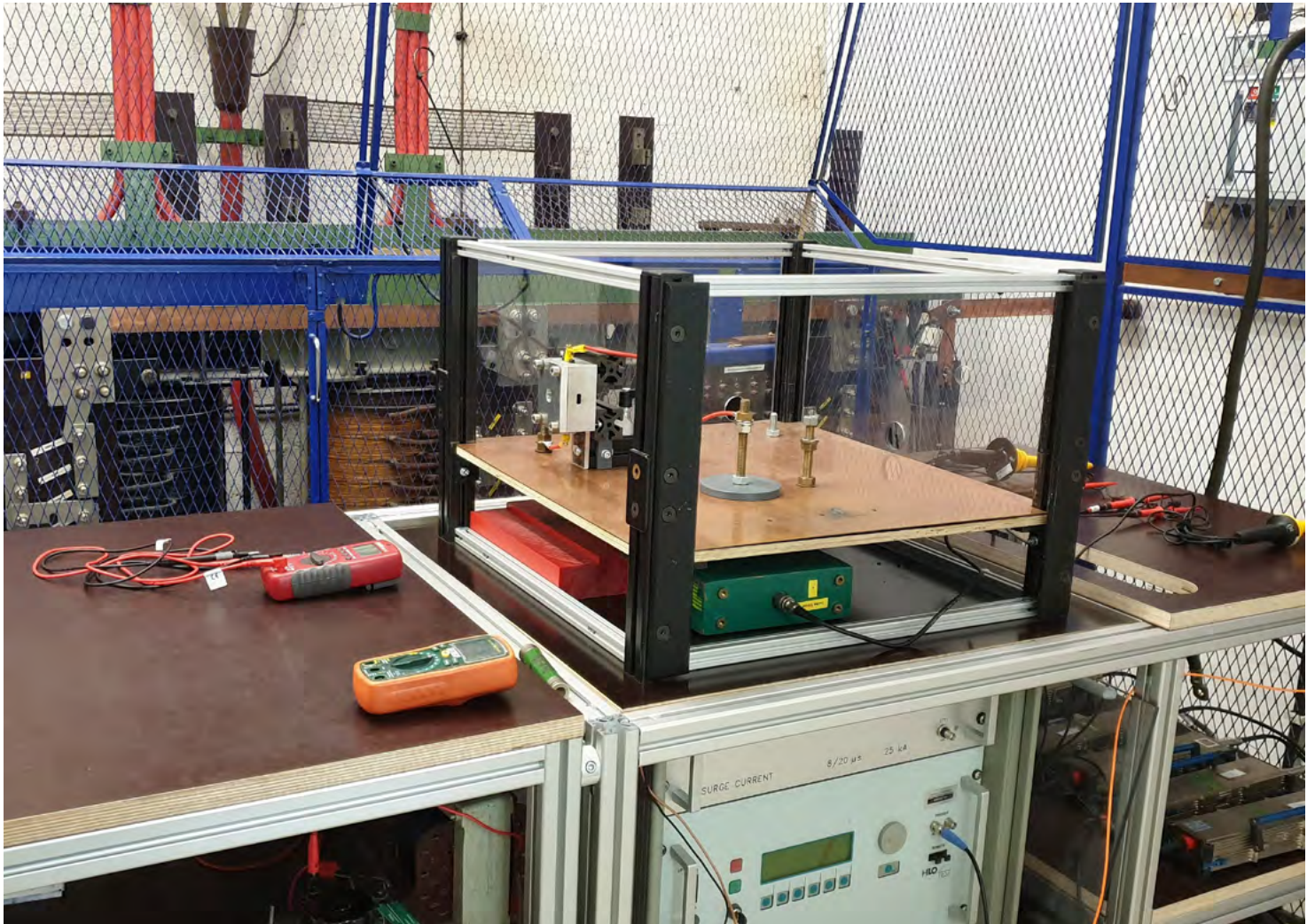
Prüfstand für Zelltests

- 48 Kanäle ± 50 A, 0–6 V, parallelschaltbar
- 48 Kanäle ± 25 A, 0–6 V, parallelschaltbar
- 52 Kanäle ± 20 A, 0–6 V, parallelschaltbar
- 90 Kanäle ± 5 A, 0–6 V, parallelschaltbar
- 3 Kanäle ± 30 A, 0–150 V, parallelschaltbar





# Blitzschutzlabor



## KONTAKT

**Enno Peters, M.Sc.**

✉ [e.peters@tu-braunschweig.de](mailto:e.peters@tu-braunschweig.de)

☎ +49 531 391 7701

## WEBSEITE

<https://www.tu-braunschweig.de/elenia/forschung/blitzschutzlabor>



## AUFGABEN UND LEISTUNGEN

- Messungen am Niederspannungsnetz mit Spannungen zwischen 50 V bis 750 V
- Prospektive Kurzschlussströme bis zu 15 kA bei 250 VAC
- Untersuchung von Funkenstreckenableitern mit Stoßströmen bis zu 25 kA (8/20  $\mu$ s) oder 600 A (10/350  $\mu$ s)
- Verschiedene Netzsynchrisationswinkel, Triggerung des Stoßstromes auf 1° Genauigkeit
- Messung der transienten Plasmaeigenschaften (Druck, Temperatur und Leitfähigkeit)

## Blitzschutzlabor

### AC-Leistungsprüffeld mit hoher Kurzschlussleistung und Stoßströmen von bis zu 25 kA

Blitzstromableiter (Typ 1) werden als primärer Schutzmechanismus eingesetzt, um den störungsfreien Betrieb von elektrischen und elektronischen Geräten zu gewährleisten. Sie begrenzen auftretenden Überspannungen, die infolge eines Blitzeinschlages oder Schalthandlungen im Netz entstehen. Bei auf Funkenstreckentechnologie basierenden Blitzstromableitern kommt es bei Überschreiten einer charakteristischen Überspannung zur Bildung eines Plasmas zwischen zwei Elektroden. Dieses Plasma erzeugt einen kurzzeitigen Kurzschluss zur Erdungsanlage, wodurch ein niederimpedanter Potentialausgleich hergestellt wird und hohe Energien sicher abgeleitet werden können. Aufgrund des Kurzschlusses zur Erdungsanlage entstehen Wechselwirkungen mit dem angeschlossenen Versorgungsnetz, sodass ein netzgetriebener Kurzschlussstrom über die Plasmastrecke fließen kann (sog. Netzfolgestrom). Dieser Netzfolgestrom soll nach dem erfolgreichen Ableitvorgang möglichst schnell verlöschen, damit die vorgelagerten Sicherungen oder Leistungsschalter nicht aktiv werden müssen.

Für die Untersuchungen von Blitzstromableitern stehen am elenia unterschiedliche Stoßspannungs- und Stoßstromgeneratoren zur Verfügung. Besonders hervorzuheben ist dabei das „Blitzschutzlabor“. In diesem kann zusätzlich zu einem Stoßstrom eine Niederspannungseinspeisung parallel geschaltet werden. Das Niederspannungsnetz ist dabei über drei Leistungstransformatoren mit dem Mittelspannungsnetz auf der 6 kV ebene verbunden. Hierdurch kann sowohl der Stoßstrom als auch der Netzfolgestrom untersucht werden. In Abbildung 1 ist das vereinfachte Prinzipschaltbild des Labors dargestellt.

Zusätzlich dazu wurde ein spezieller Prüfkreis zur Untersuchung der Wieder-

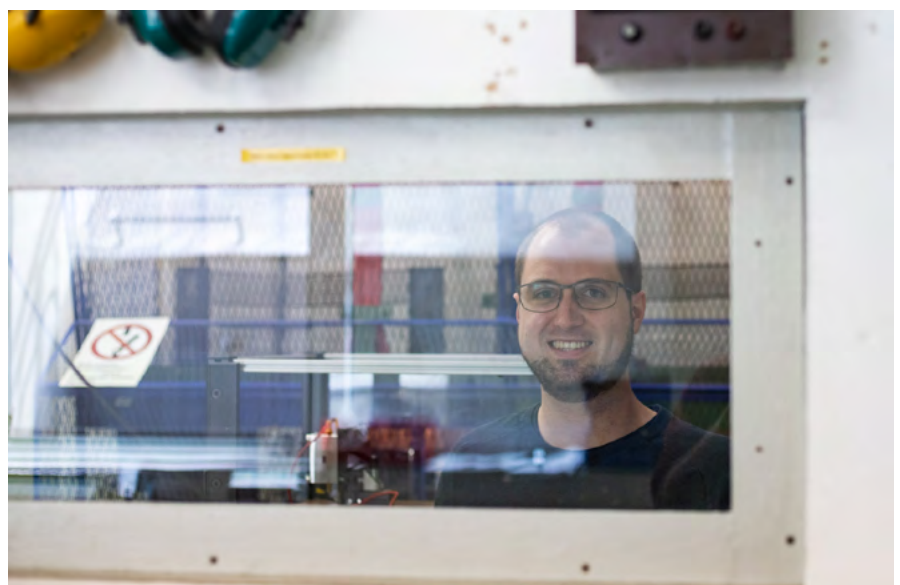
verfestigung aufgebaut. Dieser Prüfkreis basiert auf einer Kondensator-basierten Stromquelle, die über einen hochimpedanten Widerstand mit dem Blitzstromableiter verbunden ist. Auf diese Weise kann unmittelbar nach dem Stromnulldurchgang in der Funkenstrecke ein Messstrom im Bereich von 100 mA durch die noch erhitze Restplasmastrecke fließen. Dies ermöglicht die Analyse der Plasmaeigenschaften im speziellen nach der Hochstromphase.

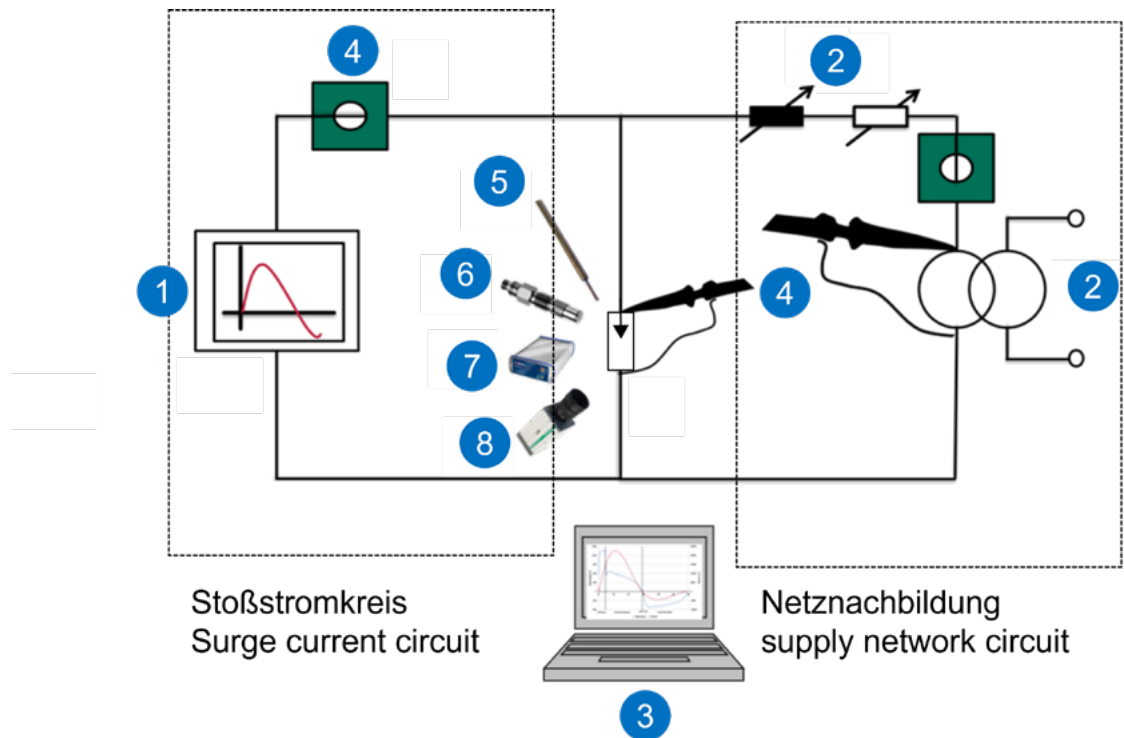
Der Stoßstrom wird mit Hilfe eines Stoßstromgenerators erzeugt (1). Es können  $8/20 \mu\text{s}$  Impulse mit bis zu 25 kA aber auch  $10/350 \mu\text{s}$  Impulse mit bis zu 600 A erzeugt werden. Die Netzeinspeisung ist realisiert über drei parallel geschalteten 130 kVA-Transformatoren (2). Zur Einstellung des ohmsch-induktiven Verhältnisses der Netznachbildung stehen Widerstands- sowie Induktivitätsbänke zur Verfügung (2). Bei diesen sehr schnellen Plasmavorgängen ist eine stabile und zeitdiskrete Messtechnik notwendig. Hierfür stehen Messsonden mit einer Samplingrate von 100 MS/s zur Verfügung. Die Messsonden sind über Licht-

wellenleiter potentialgetrennt an das Messsystem angeschlossen (3). Weiterhin stehen zusätzliche Sensoren zur Verfügung wie Pearsonsonde, Hochspannungstastköpfe (4), Potentialsonden (5), Drucksensoren (6), Spektrometer (7) und eine High-Speed-Kamera (8).

Das aktuelle Ziel der Forschung ist es, den Übergang vom hochleitfähigen Plasma hin zum isolierenden Zustand nach der Stoßstrombelastung zu untersuchen. Mithilfe der in Abbildung 1 beschriebenen Messtechnik finden diese experimentellen Untersuchungen statt.

Für diese Untersuchungen sind Präzisionshalterungen im Labor vorhanden, welche die optische Ausrichtung der Kamera auf die Brennkammer der Modell-Funkenstrecken erleichtert. Die Forschung ermöglicht es die Funkenstreckenableiter zu modellieren und damit eine zielgerichtete Entwicklung des Überspannungsschutzes zu gewährleisten





ÜBERSICHT DES VERSUCHSFELDES ZUR BESTIMMUNG DER PLASMAVORGÄNGE

- 1.) Stoßstromgenerator EMC 2004
- 2.) Niederspannungsnetz bis 750 VAC mit einstellbarer Netzimpedanz
- 3.) Anbindung Messsystem an PC
- 4.) Spannungs- und Strommessung
- 5.) Leitfähigkeit über Potentialsonden
- 6.) Druckmessung
- 7.) Spektroskopie
- 8.) Hochgeschwindigkeits-Kamera



HOCHGESCHWINDIGKEITS-KAMERA NOVA S6  
VON PHOTRON

Hochgeschwindigkeitskamera zur Analyse der Plasmaverteilung mit Präzisionshalterung

- Auflösung bis zu 1024 × 1024 Pixel
- Schwarz-Weiß Aufnahmen
- Maximale Bildfrequenz von 800 kfps
- Minimale Belichtungszeit von 200 ns
- Externe Triggerung möglich



STOSSSTROMGENERATOR EMC 2004

Stoßstromgenerator zur Erzeugung von Blitzteilströmen

- Max. Ladespannung von 10 kV
- Max. Energie 1500 Ws
- Verschiedene Kurvenformen möglich
- Max. Stoßstrom von 25 kA
- Externe Ansteuerung möglich



# DC-Demonstrationsnetzlabor



## KONTAKT

**Lars Claassen, M.Sc.**

✉ [l.claassen@tu-braunschweig.de](mailto:l.claassen@tu-braunschweig.de)

☎ +49 531 391-9715

**Patrick Vieth, M.Sc.**

✉ [p.vieth@tu-braunschweig.de](mailto:p.vieth@tu-braunschweig.de)

☎ +49 531 391-9725

## WEBSEITE

[www.tu-braunschweig.de/elenia/forschung](http://www.tu-braunschweig.de/elenia/forschung)

## AUFGABEN UND LEISTUNGEN

- Untersuchung dynamischer Zustandsänderungen im Netz
- Entwicklung und Test von DC-Schutzsystemen
- Untersuchung der Schalteigenschaften kommerziell erhältlicher DC-Schaltgeräte
- Untersuchung von DC-Netztopologien
- Charakterisierung verschiedener Betriebs- und Fehlerszenarien im variablen Netzaufbau
- Entwicklung eines neuartigen DC-Schutzsystems



# DC-Demonstrationsnetzlabor

## Untersuchung spannungsebenen- übergreifender Gleichspannungsnetze mit variabler Quell- und Lastcharakteristik

Die voranschreitende Energiewende in Deutschland und technische Fortschritte im Bereich der modernen Leistungselektronik führen dazu, dass DC-Technologie kontinuierlich eine wachsende Bedeutung sowohl im industriellen Bereich als auch in der Energieübertragung und der Elektromobilität gewinnt. Und das aus gutem Grund: Die Energieübertragung und -verteilung bietet ein weites Spektrum an Anwendungsvorteilen wie bspw. Effizienzvorteile, Materialeinsparungen und die Möglichkeit der einfachen Integration erneuerbarer Energien und Speicher. Sie bringt auf der anderen Seite auch neue Herausforderungen und Fragestellungen mit sich, welche es zu beantworten gilt, um eine sichere Nutzung zu gewährleisten. Das DC-Demonstrationsnetzlabor am elenia ermöglicht die Untersuchung einer großen Bandbreite von Netztopologien durch einen flexiblen, schnell anpassbaren Aufbau und ein großes Spektrum verschiedener Quell- und Lastcharakteristiken. Zwei Spannungsebenen (0–380 V und 1 kV) sind bereits im Einsatz. Bis Ende 2023 wird der Aufbau um eine Mittelspannungsebene ( $\pm 1,5$  kV DC) erweitert.

### Aufbau, Komponenten und Untersuchungsgegenstand

Das Demonstrationsnetzlabor bietet ein breites Prüfspektrum zur Untersuchung von DC-Netztopologien. Der geplante Gesamtaufbau inklusive der Leistungsdaten aller Spannungsebenen und die detaillierte Beschreibung der Laborkomponenten sind der Tabelle auf der nächsten Seite zu entnehmen. Derzeit wird im Demonstrationsnetzlabor an der allgemeinen Netzcharakterisierung und Modellbildung für DC-Netze

gearbeitet. Ein möglichst großer Versuchsraum wird durch eine große Bandbreite variabler Lastimpedanzen und aktiver Quell- und Lastkomponenten erreicht. Außerdem wird ein DC-Schutzsystem entwickelt und in verschiedenen Fehlerszenarien untersucht. Neben Strom und Spannung können auch die Zeitkonstante, Netztopologie und interne Regelung ausgewählter Quellen und Lasten angepasst werden. Ein weiterer Vorteil liegt in der einfachen Integrierbarkeit weiterer Betriebsmittel in den bestehenden Aufbau. Die durchgeführten Messungen werden durch modernste Messtechnik aufgezeichnet. Die Netzzustände bei dynamischen Laständerungen sowie Schaltvorgängen und die Reaktion des Schutzsystems sind somit präzise analysierbar.

### Erweiterung des bestehenden Netzaufbaus

Die bestehenden Spannungsebenen werden in Zukunft durch eine weitere Spannungsebene ergänzt ( $\pm 1,5$  kV DC). Das Spektrum der nachbildbaren Anwendungsfälle wird dadurch noch einmal deutlich erweitert. Die vorbereitenden Maßnahmen dafür sind mit dem Aufbau des MVDC-Schaltschranks und der AFE-Powermodule bereits abgeschlossen. Ausstehend zum Jahresende ist die Lieferung des Gleichspannungswandlers zur Ankopplung der Mittelspannungsebene. Dieser wird neben den AFE-Powermodulen in modularer Einschubbauweise im MVDC-Schaltschrank installiert werden.

Das Prüffeld in seiner Bauform als Spannungsebenen-übergreifender Realnetzaufbau ist ein Alleinstellungsmerkmal des elenia.



LVDC-SCHALTSCHRANK MIT LVDC-AFE & DC-SAMMELSCIENE

### Kopplung und Absicherung der Niederspannungskomponenten

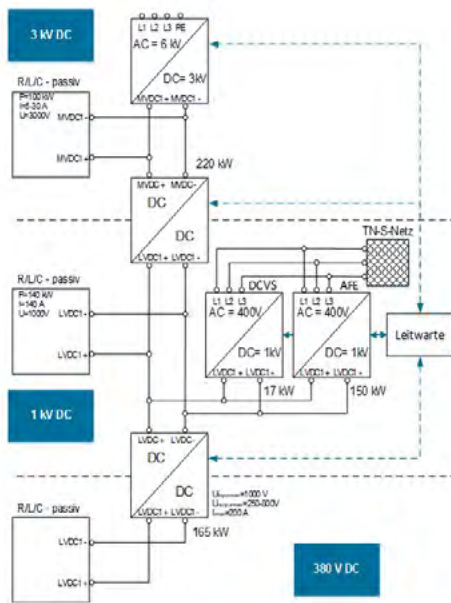
- Anbindung leistungsschwacher Verbraucher und eines Stecksystems zur Topologiebildung über Strangschuttschalter
- DC-Leistungsschalter sichern Gleichspannungswandler zur unterlagerten, variablen LVDC-Spannungsebene ab
- LVDC-AFE im Rückspeisebetrieb als Senke nutzbar
- Integration eines Bremswiderstandes



LVDC-SCHALTSCHRÄNKE MIT PASSIVEN  
LASTEN & GESTEUERTEN  
SPANNUNGSQUELLEN

### Einfacher Aufbau variabler Netztopologien über ein PV-Stecksystem

- Nachbildung einer Vielzahl von DC-Bordnetz-, Industrie- und Verteilnetzstrukturen
- Netzcharakterisierung und Modellbildung von DC-Netzen mithilfe statistischer Versuchsplanung
- Entwicklung, Untersuchung und Optimierung von neuartigen DC-Schutzsystemen mit Fokus auf die Schaltgerätekoordination bei Stromfehlern



GESAMTNETZÜBERSICHT ALS BLOCKSCHALTBIKD

Struktur und Kernfunktionen

- Drei Netzebenen (3 kV, 1 kV & <1kV variabel)
- MVDC-seitiger Anschluss des Prüffeldes direkt an das 6 kV-AC Mittelspannungsnetz der TU Braunschweig
- LVDC-seitiger Anschluss über AC-Niederspannungsnetz
- Zwei Active-Front-Ends (AFE): jeweils eins in der MVDC- und LVDC-Ebene
- Kopplung der Spannungsebenen über DC/DC-Wandler
- Bidirektionaler Energieversorgung der Ebenen
- Zusätzliche Versorgung der LVDC-Ebenen durch gesteuerte Spannungsquellen (DCVS)
- Durch die Kombination der Betriebsmittel können verschiedenste Anwendungsfälle nachgebildet werden
- Steuerung und Überwachung aller Laborkomponenten über zentrale Leitwarte
- Variable Prüfdauer und Parameter durch digitale Ablaufsteuerung einstellbar

STEUERKARTE DES MVDC-SCHALTSCHRANKES

Zentrale Überwachung und Ansteuerung der Laborkomponenten

- Anbindung der Schaltschränke an Leitwarte über CAN / CAN FD
- Manuelle sowie automatisierte Ansteuerung der Schutztechnik
- Einstellung der relevante Regelparameter
- Übertragung von Messwerten zur Überwachung & Aufzeichnung an Leitwarte & elenia-Server



MITTELSPANNUNGSANSCHLUSS

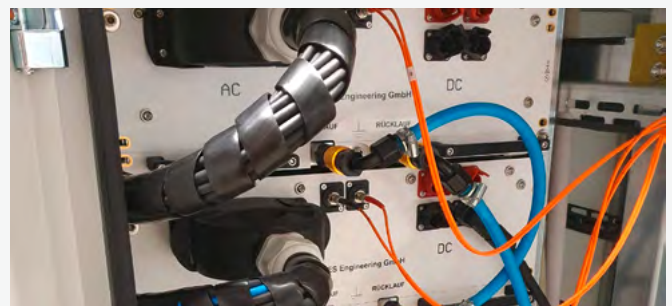
Ertüchtigung des Mittelspannungsabgangs mit Schutztechnik

- Anschluss: 6 kV AC – Mittelspannungsnetz der TU Braunschweig
- Absicherung der Mittelspannungstransformatoren: 63 A
- Absicherung des Laborabgangs: 31,5 A
- Zusätzliche Absicherung über zwei VD4-Vakuumschalter direkt im Labor und am Abgang zu den Laboren

MITTELSPANNUNGSTRANSFORMATOR

Versorgung der AFE-Powermodule aus dem Mittelspannungsnetz

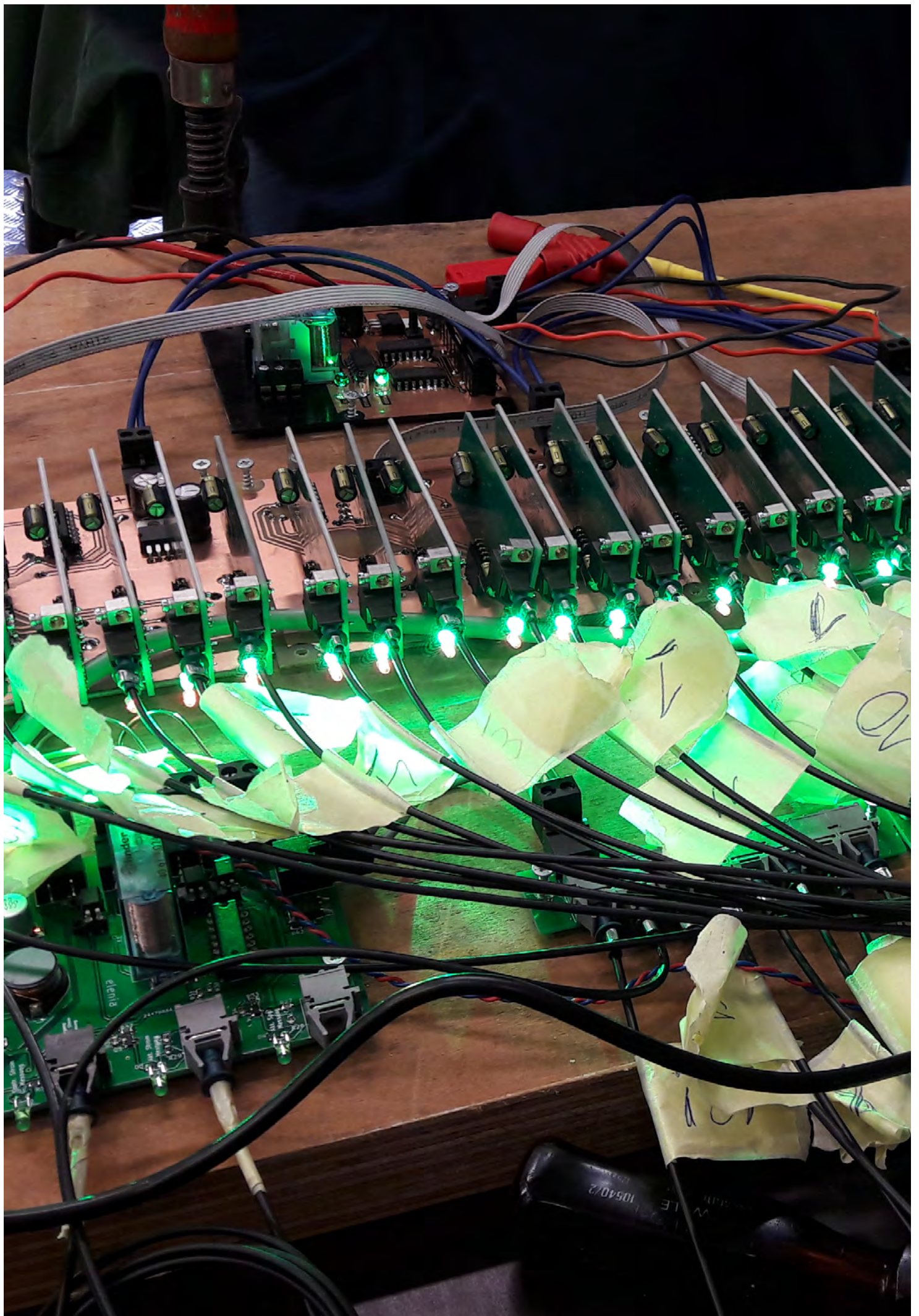
- Nennleistung: 220 kVA
- Primärseite: 6 kV AC
- Sekundärseite: 4 Wicklungen á 375 V AC
- Schaltgruppe: Dyn5



MVDC-AFE-LEISTUNGSMODULE

Filterung und Gleichrichtung der AC-Spannung

- Eingangsspannung pro Modul: 375 V AC
- Ausgangsspannung pro Modul: 750 V DC
- Integrierte EMV-Filter und Drosseln
- Symmetrische Verschaltung der Module: ± 1,5 kV DC
- Nennleistung pro Modul: 50 kW
- Gesamtleitung: 200 kW





# Hochleistungsgleichstromprüffeld



## KONTAKT

**Dirk Bösche M.Sc.**

✉ [d.boesche@tu-braunschweig.de](mailto:d.boesche@tu-braunschweig.de)

☎ +49 531 391 7745

## AUFGABEN:

- Entwicklung und Optimierung von Gleichstromschaltern
- Untersuchung von Schalteigenschaften kommerziell erhältlicher DC-Schaltgeräten
- Untersuchung und Entwicklung von Hybridschaltgeräten
- Isolationskoordination und Untersuchung von Schaltvorgängen bei niedrigem Luftdruck

## LEISTUNGSDATEN:

- Leistung: bis zu 18 MW
- Prüfspannung bis zu 12 kV
- Prüfstrom bis zu 30 kA
- Versorgung aus dem 6 kV- oder 20 kV-Netz

# Hochleistungsgleichstromprüffeld

## Labor zur Forschung und Entwicklung von Gleichspannungsschaltgeräten für eine erfolgreiche Energiewende

Ein Baustein zur Energiewende ist, neben dem Ausbau der erneuerbaren Energien, die Reduktion des Verbrauchs. Gerade in Industrieanwendungen werden die Vorteile von Gleichstromnetzen gegenüber klassischen Wechselspannungsnetzen deutlich. Durch eine Umstellung steigt die Effizienz, auch weil Gleichstromnetze im Prozess anfallende Energien aufnehmen können. Hierbei geht der Trend zu immer höheren Spannungsebenen. Dadurch steigen die Anforderungen an die Schaltgeräte, welche die betriebsbedingten Ströme führen und unterbrechen müssen. Um diese Schaltgeräte zu entwickeln und zu prüfen, sind geeignete Versuchseinrichtungen unerlässlich. Diese müssen in der Lage sein die geforderten Ströme und Spannungen bereitzustellen. Aus diesem Grund ist das neue Hochleistungsgleichstromprüffeld während des Projektes Universal Power Switch in der Hochspannungshalle des Institutes errichtet worden. Es beeindruckt mit seinen Leistungsdaten und kann eine Vielzahl an Prüfspannungen bei geringer Welligkeit und hohen Strömen bereitstellen. Die maximale Gleichspannung beträgt 12 kV und der maximal zur Verfügung gestellte Strom

30 kA. Dieser kann jedoch nicht auf allen Spannungsstufen abgerufen werden, sondern ist durch die Anschlussleistung von 18 MW begrenzt. Im Wesentlichen besteht die Primärtechnik aus der Mittelspannungsschaltanlage, den beiden Prüftransformatoren und dem Gleichrichter inklusive Leistungsschaltern.

### Mittelspannungsschaltanlage

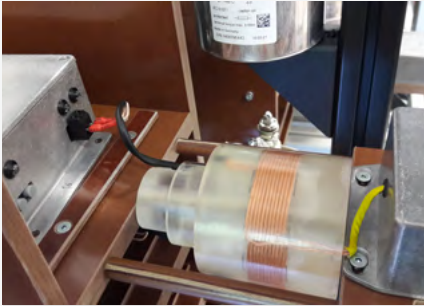
Die Versorgung des Hochleistungsgleichstromprüffeldes wird über eine institutseigene Schaltanlage sichergestellt. Diese verfügt über zwei unterschiedliche Einspeisemöglichkeiten. Zum einen kann ohne Voranmeldung auf das 6 kV-Netz der Universität zurückgegriffen werden. Allerdings ist die Anschlussleistung wesentlich geringer, als bei der ebenfalls verfügbaren 20 kV Anbindung. Die Freigabe erfolgt durch den Netzbetreiber allerdings erst nach vorheriger Anmeldung. Dann kann die maximale Leistung von 18 MW entnommen werden. Der Schutz der Anlage erfolgt durch einen Kurzschlussstrombegrenzer (IS-Begrenzer) auch um eventuelle Netzurückwirkungen zu minimieren.

### Prüftransformatoren

Die Mittelspannungsschaltanlage speist auf zwei Prüftransformatoren ein. Beide sind sekundärseitig in Stern verschaltet und verfügen über jeweils zwei getrennte Wicklungen je Phase. Diese verfügen über eine Vielzahl an Anzapfungen, die sich mittels Schnellverstellung nahezu beliebig verschalten lassen. Dadurch kann eine Vielzahl an Spannungen gestellt werden. Primärseitig ist ein Transformator in Stern und der andere im Dreieck verschaltet. Dadurch wird eine Phasendrehung von 30° erreicht, was die Nutzung eines B12 Gleichrichters ermöglicht.

### Gleichrichter

Die beiden Transformatoren stellen ein sechsphasiges System für den Gleichrichter zur Verfügung. Dabei speist jeweils ein Transformator eine der beiden in Reihe geschalteten B6-Brücken. Die vorgelagerten Leistungsschalter fungieren als Draufbeziehungsweise Sicherheitsschalter und trennen den Gleichrichter nach jedem Versuchsdurchlauf vom Netz. Der gesamte Prüfablauf wird über eine programmierbare digitale Ablaufsteuerung sichergestellt.



HOCHFREQUENZTRANSFORMATOR ZUR  
VERSORGUNG DER THYRISTORTREIBER

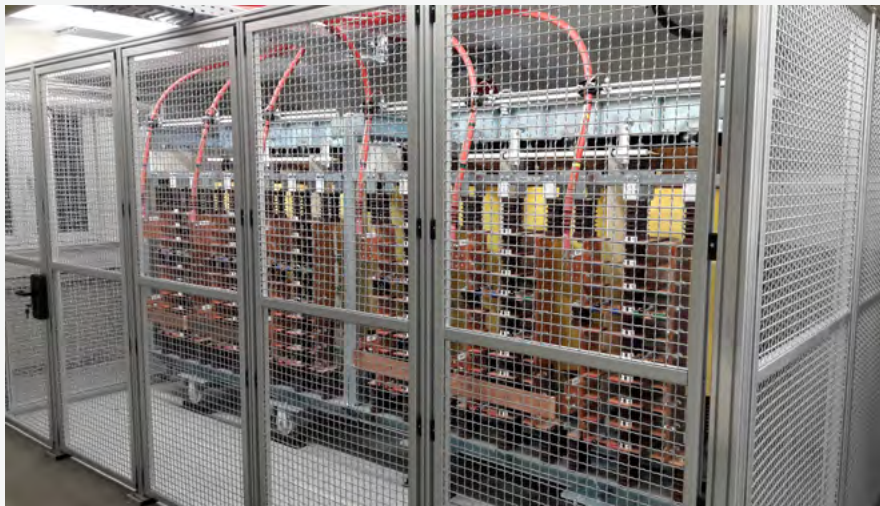


B12 GLEICHRICHTER INKLUSIVE  
VORGELAGERTER LEISTUNGSSCHALTER

- Max. Strom 30 kA
- Max. 12 kV



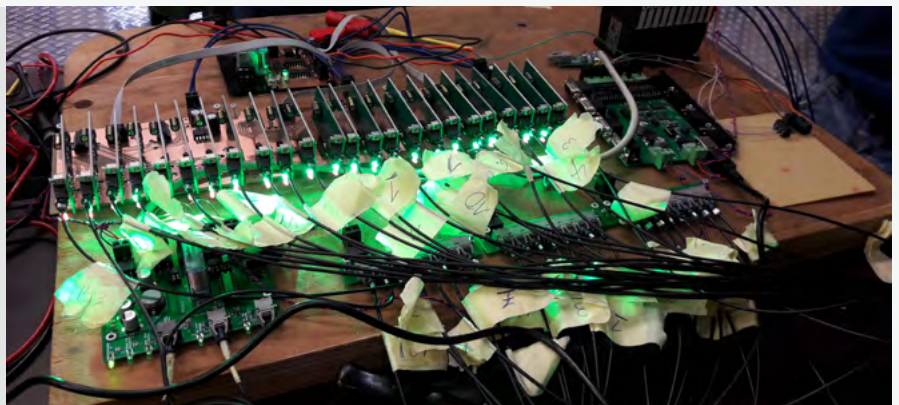
SCHALTANLAGE ZUR ANBINDUNG AN DAS 6 KV  
UNIVERSITÄTSNETZ ODER 20 KV NETZ DES  
STÄDTISCHEN NETZBETREIBERS.



PRÜFTRANSFORMATOREN MIT ANZAPFUNGEN UND  
SCHNELLVERSTELLUNG ZUR EINSTELLUNG DER  
GLEICHSPANNUNG

- Leistung 1155 kVA
- Kurzzeitleistung 11258 kVA
- Schaltgruppen Diii(y) & Yiii(y)
- Baujahr 2021
- Gesamtgewicht je Trafo ca. 6800 kg

LABORSTEUERUNG WÄHREND DER  
ERSTINBETRIEBNAHME





# Hochspannungshalle



## KONTAKT

**Karen Flügel, M.Sc.**

✉ [k.fluegel@tu-braunschweig.de](mailto:k.fluegel@tu-braunschweig.de)

☎ +49 531 391 7785

**Timo Meyer, M.Sc.**

✉ [timo.meyer@tu-braunschweig.de](mailto:timo.meyer@tu-braunschweig.de)

☎ +49 531 391 9739

## WEBSEITE

[www.tu-braunschweig.de/elenia/forschung/hochspannungshalle](http://www.tu-braunschweig.de/elenia/forschung/hochspannungshalle)



## AUFGABEN UND LEISTUNGEN

- Hochspannungsmessungen (Überschlag/Durchschlag) mit Wechsel-, Blitzstoß- und Gleichspannung an Modellaufbauten oder Prototypen gemäß IEC 60060-1
- Teilentladungsmessungen und Interpretation an Modellen und Komponenten der Nieder-, Mittel- und Hochspannung, ggf. gemäß IEC 60270
- Dielektrische Materialprüfungen wie Verlustfaktor, relative Permittivität und Durchgangswiderstände bei variablen Frequenzen und Temperaturen
- Verschiedene Hochgeschwindigkeitskameras stehen zur Visualisierung von Entladungen zur Verfügung

## Hochspannungshalle

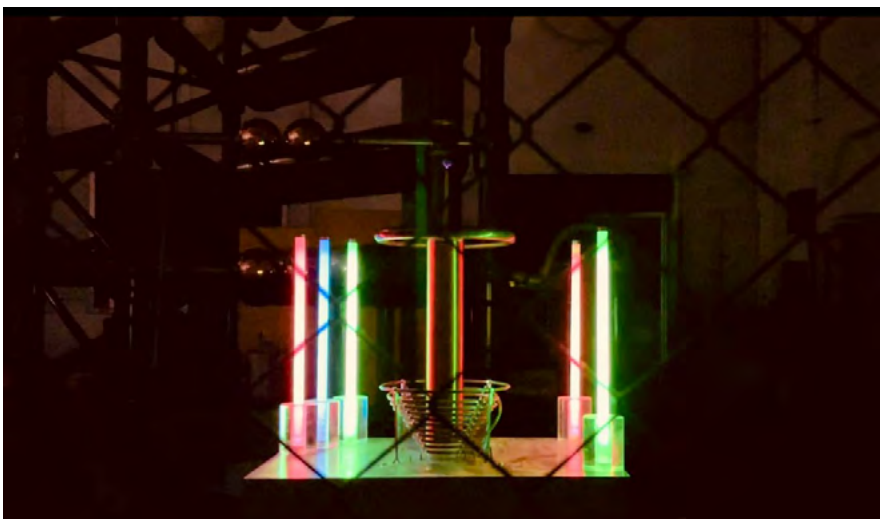
### Die Untersuchung der Isolationseigenschaften von Komponenten der Energieversorgung benötigt hohe Spannungen.

Die Hochspannungshalle des Institutes bietet viele Untersuchungsmöglichkeiten. So enthält das große Prüffeld zwei Systeme zur Hochspannungserzeugung von Wechsel- und Stoßspannung, den modularen Baukasten zum Aufbau verschiedener Erzeugungs- und Messschaltungen und die elektrisch geschirmte Teilentladungsmesskabine. Das große Prüffeld bietet die klassischen Hochspannungsprüfungen zur Untersuchung der elektrischen Festigkeit, unter anderem durch die Verwendung der Greinacher-Kaskade, welche aus einer eingangsseitigen Wechselspannung eine Gleichspannung erzeugt, womit drei Spannungsformen im großen Prüffeld erzeugt werden können. Damit können zum Beispiel Hochspannungsisolatoren, Schaltgeräte oder komplexe Isoliersysteme auf ihre elektrische Festigkeit bei unterschiedlichen Bedingungen geprüft werden. Die dabei erreichbaren Spannungsamplituden sind für Wechsel- und Gleichspannung bis zu 800 kV, bei Blitzstoßspannung bis zu 2 MV. Zusätzlich können vielfältige Schaltungen im Spannungsbereich bis etwa 300 kV über das ebenfalls vorhandene Baukastensystem aufgebaut werden. Neben der Erzeu-

gung werden auch entsprechende Messgeräte und Spannungsteiler benötigt. Auch hier gibt es für jede Spannungsform und Höhe einen geeigneten Teiler, sei es der für bis zu 2 mV geeignete gedämpft kapazitive (Zaengl-) Teiler, verschiedene kapazitive Teiler bis 400 kV, ohmsche Teiler bis 200 kV oder verbaut in der Greinacher-Kaskade bis 800 kV. Über Messsatelliten von Transienten-Recordern können die Spannungen potentialfrei übertragen und so die Sicherheit der Experimentatoren gewährleistet werden. Neben der Erzeugung und der Messung wird aber für korrekte Untersuchungen auch das passende Versuchsgefäß benötigt. Hier stehen zahllose Aufbauten bereits zur Verfügung und Neue können in der Werkstatt des Institutes gefertigt werden. Vorhanden sind unter anderem ein Kryostat für Untersuchungen bis  $\dot{U} = 200$  kV bei Temperaturen von  $-190^\circ\text{C}$  in flüssigem und gasförmigem Stickstoff mit Möglichkeiten zur visuellen Beobachtung der Entladung, über Hochgeschwindigkeitskameras und Schaugläser, sowie Bestrahlung des Aufbaus. Alternativ können auch Untersuchungen im Vakuumprüfgefäß mit bis zu 400 kV bei 105 mbar durchgeführt werden.

Aktuelle Untersuchungen an diesem Prüfgefäß dienen der optischen Beobachtung von Durchschlägen bei Versuchen mit Blitzstoßspannungen. In der Teilentladungsmesskabine, welche mit Netzfiltern gegen netzseitige Störungen abgesichert und elektrisch geschirmt aufgebaut ist, stehen ein Teilentladungsmesssystem für Teilentladungsmessungen ab 1 pC und eine Parallelprüfanlage mit 10 Messplätzen bereit. Ein Aufbau zur Erzeugung von hochfrequenten Spannungen ist ebenfalls in der TE-Kabine vorhanden. Gerade durch Verwendung von Leistungselektronik ist davon auszugehen, dass hochfrequente Störungen in Zukunft relevanter werden.

Um die Begeisterung an der Hochspannungstechnik schon früh zu wecken, wurden einige Show-Versuche aufgebaut. Im Rahmen von Vorlesungen oder dem Zukunftstag kam das Raten der Musikstücke, die vom Musik-Tesla eindrucksvoll wiedergegeben wurden, oder das Erfahren von elektrostatischer Aufladung, die Haare zu Berge stehen lässt, am Bandgenerator gut an.



Musik Tesla



Eindruck aus dem Prüffeld bei Stoßspannungsversuchen



STOSSPANNUNGSGENERATOR

- Stoßspannungsgenerator für Schalt- und Blitzstoßspannungen mit 400 kV / 50 kJ (bis 2 mV möglich)
- Belastungskapazität und Widerstände einstellbar für normgerechte 1,2/50 Impulse
- Gedämpft kapazitiver Teiler bis 2 MV



WECHSELSPANNUNGSTRANSFORMATOR

- 50 Hz-Wechselspannungstransformator bis 400 kV / 400 kVA (bis 800 kV möglich)
- Pressgaskondensator für Spannungsmessung



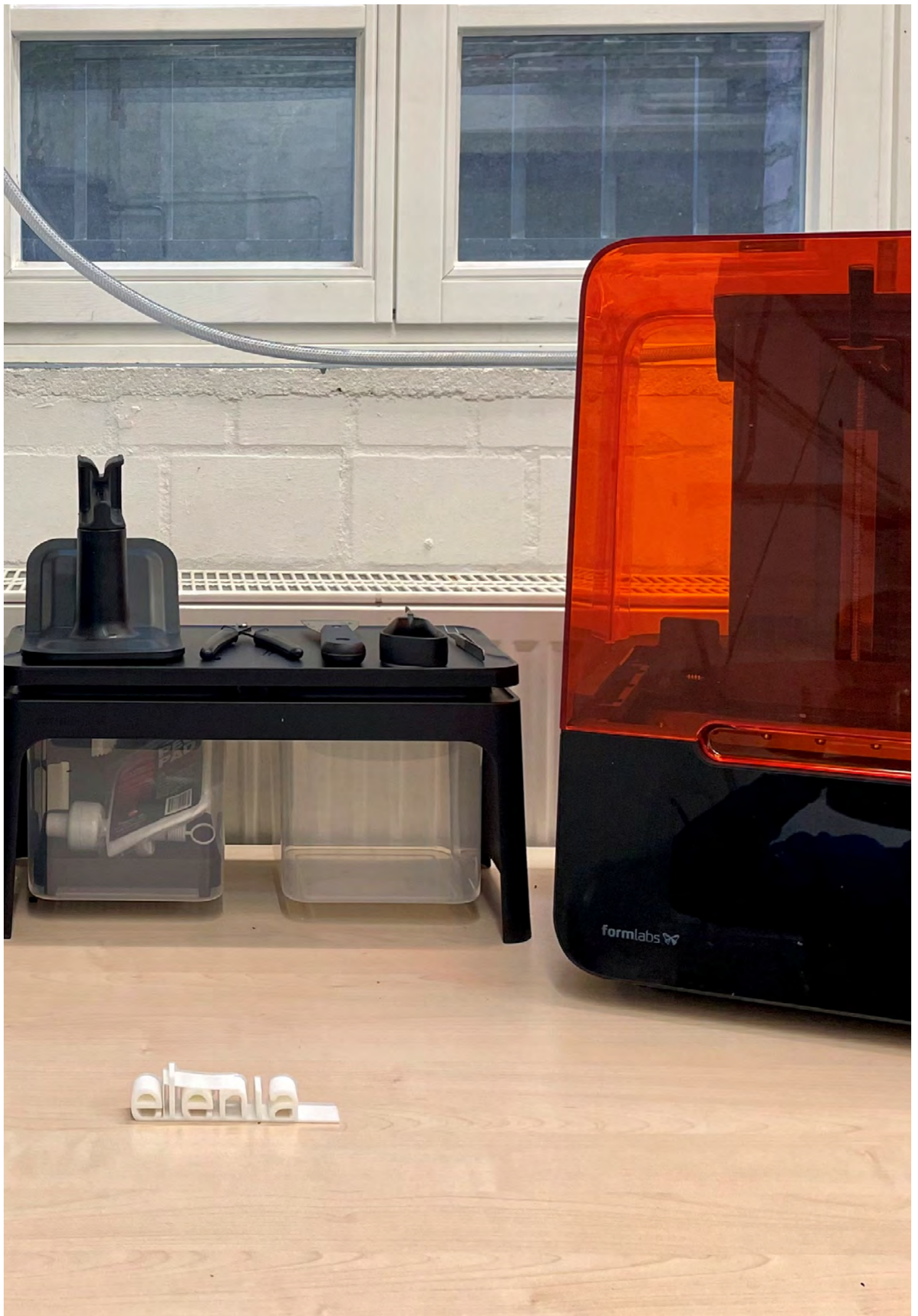
TEILENTLADUNGS-MESSKABINE

- Teilentladungsmessstand für Wechselspannungen bis  $\hat{U} = 100$  kV und Grundstörpegel  $< 500$  fC – 1 pC, bei Temperaturen bis 150°C
- Parallelprüfanlage für Durchschlagprüfungen in Öl und Luft

HOCHSPANNUNGSBAUKASTENSYSTEM

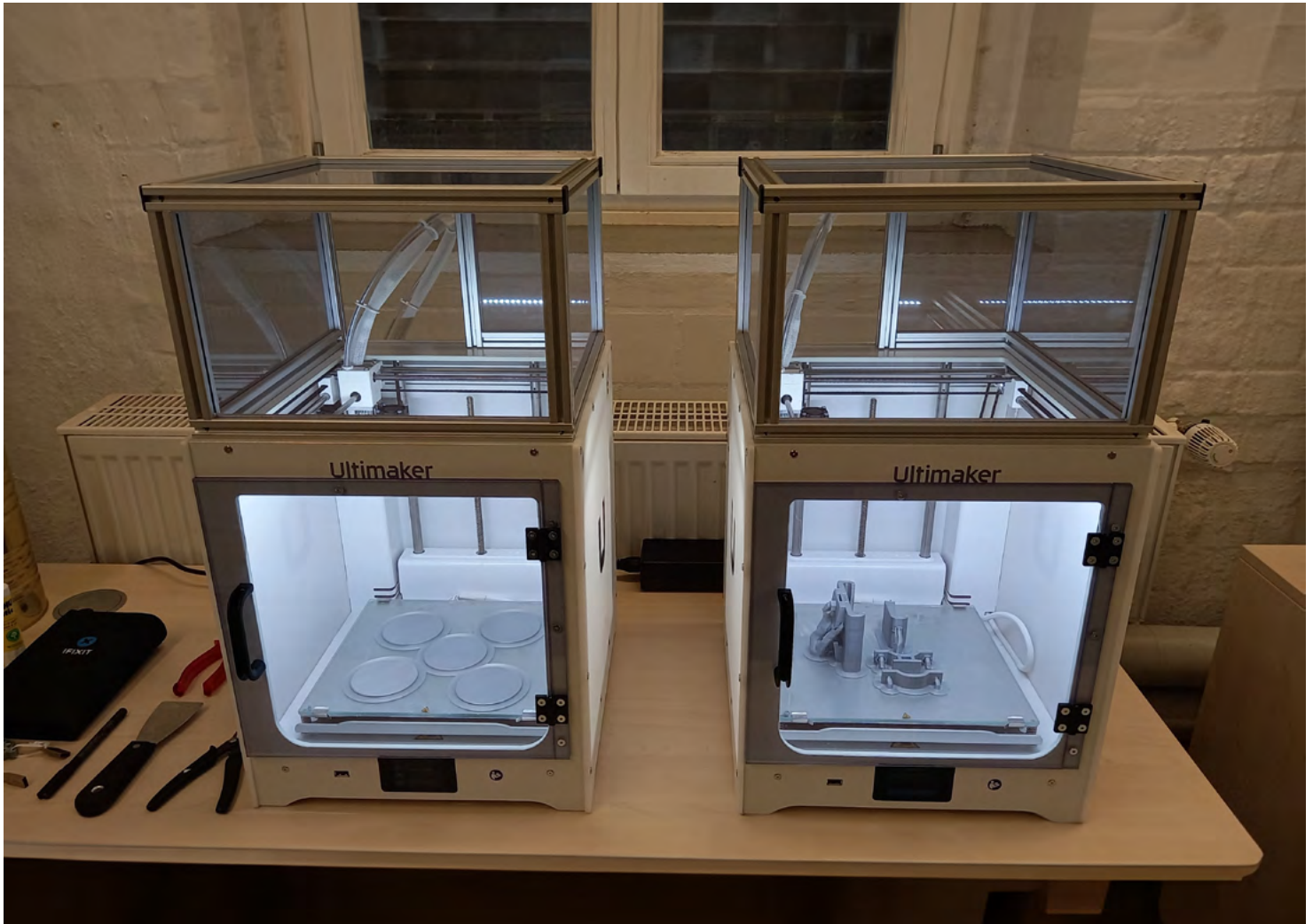
- 50 Hz-Wechselspannungstransformator bis 200 kV
- Verschiedene Baukastenkomponenten bestehend aus Kapazitäten, Widerständen und Dioden
- Kryostat bis -190 °C und ca. 200 kV bis 3 bar Absolut-Druck
- Vakuumprüfgefäß bis 400 kV bei 105 mbar mit Schaugläsern







# Isolierstofflabor



## KONTAKT

**Maik Kahn, M.Sc.**

✉ [m.kahn@tu-braunschweig.de](mailto:m.kahn@tu-braunschweig.de)

☎ +49 531 391 7741

## WEBSEITE

<https://www.tu-braunschweig.de/elenia/forschung/hochspannungstechnik>



## AUFGABEN UND LEISTUNGEN

- Teilentladungsmessungen und Interpretation an Modellen und Komponenten
- Dielektrische Materialprüfungen
- Langzeitverhalten von Isolierstoffen
- Modellbildung und Simulation
- Prüfkörperherstellung

## Isolierstofflabor

### 3D-Druck in der Isolierstofftechnik: Neue Wege für maßgeschneiderte Lösungen

Isolierstoffe, die beispielsweise in der Elektromobilität oder bei Hochspannungsanwendungen eingesetzt werden, sehen sich zunehmend steigenden Anforderungen gegenüber. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, sind neben den herkömmlichen Untersuchungsmethoden für Isolierstoffe neue Ansätze und Methoden erforderlich. Diese sollen dazu beitragen, die Bewertung und die Lebensdauerabschätzung zu verbessern.

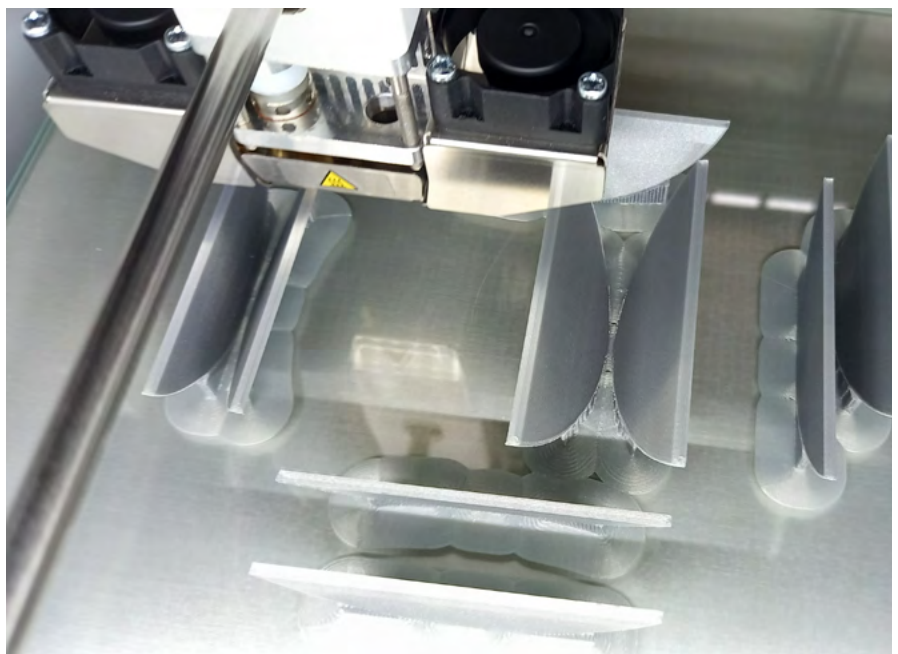
Im Rahmen unseres Engagements für die stetige Verbesserung von Isolierstoffen, die in kritischen Anwendungen wie der Elektromobilität und der Hochspannungstechnik zum Einsatz kommen, wurde das Isolierstofflabor erweitert und modernisiert. Dies umfasst die Anschaffung mehrerer 3D-Drucker. Zwei dieser Drucker basieren auf der Fused Filament Fabrication (FFF) Technologie. Um den Zugang zur additiven Fertigung auch für Studierende zu erleichtern, wurde eine Workstation eingerichtet. Diese ermöglicht eine nahtlose Integration des gesamten Arbeitsablaufs, angefangen beim CAD-Design bis hin zur 3D-Druck-Hardware. Anschließende dielektrische Prüfungen sind direkt nach dem Druckprozess möglich. Zusätzlich wurde ein 3D-Drucker mit Stereolithografie (SLA) Technologie angeschafft, der auf dem Flüssigharzdruck basiert. Hierbei wird mittels eines Laserstrahls mit hoher Leistungsdichte (250 mW) das fotosensitive Flüssigharz ausgehärtet. Dies ermöglicht auch die Verwendung verschiedener Kunstharze, darunter temperaturbeständige, flexible, robuste und transparente Harze. Zur Optimierung des Arbeitsablaufs wurden außerdem zwei zusätzliche Geräte

zur automatischen Reinigung und Nachhärtung von gedruckten Komponenten angeschafft.

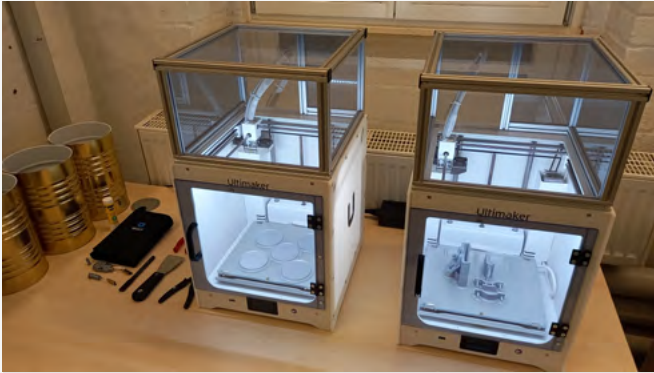
#### Aufbau einer automatisierten TE-Messungen unter Gleichspannungsbelastung

Die Erkennung von Teilentladungen (TE) hat sich in der Produktion und im Betrieb von Hochspannungskomponenten seit vielen Jahren als fester Bestandteil von qualitätssichernden Maßnahmen etabliert. Aufgrund der aktuellen Umstrukturierung des Energieversorgungssystems in Richtung dezentraler Einspeisung und der vermehrten Integration von Hochspannungs-Gleichstromübertragungssystemen (HGÜ) in das Übertragungssystem steigt der Bedarf an

Teilentladungsmessungen unter Gleichspannungsbedingungen. Deshalb wurde ein automatisierter Versuchsaufbau für die Teilentladungsmessung unter Gleichspannungsbelastung entwickelt. Die Nutzung der LabVIEW-Plattform zur Automatisierung der Messungen ermöglicht einen effizienten und reproduzierbaren Messprozess. Die gezielten Messungen, die durchgeführt wurden, bieten grundlegende Einblicke in das Verhalten von Isolierstoffen unter Gleichspannungsbelastung. Die entwickelte automatisierte Steuerung der Teilentladungsmessung eröffnet neue Möglichkeiten für effiziente Teilentladungsmessungen unter Gleichspannungsbedingungen.



Herstellung von Prüfkörpern im 3D-Filament-Drucker



3D-DRUCKER MIT SCHMELZSCHICHTVERFAHREN

Prüfkörperbau für dielektrische Prüfungen

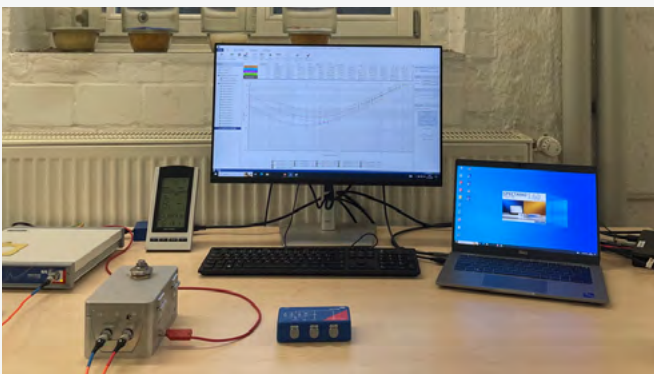
- Einfachextrusion
- Material: PLA
- Bauraum: 223 × 220 × 205 mm
- XYZ-Auflösung: 12,5, 12,5, 5 µm



3D-DRUCKER MIT STEREO LITHO GRAFIE

Prüfkörperbau für dielektrische Prüfungen

- 250-mW-Laser
- Material: Kunstharz
- Bauraum: 145 × 145 × 185 mm
- XYZ-Auflösung: 25, 25, 25 µm



DIELECTRIC MATERIAL ANALYZER

Messung von Verlustfaktor und rel. Permittivität

- Ausgangsspannung bis 200 V
- Frequenzbereich von 5 µHz bis 5 kHz
- PDC- und FDS-Methode
- Probenhalter DSH100



DC-SPANNUNGSQUELLE BIS 70 KV

Bereitstellung von hoher Gleichspannung

- Ausgangsspannung bis 70 kV
- Ausgangsstrom bis 3 mA
- Dauerkurzschlussfest
- Fernsteuer- und erweiterbar durch eingebaute analoge oder (optionale) digitale Schnittstelle



ELECTROMETER / HIGH RESISTANCE METER

Messgerät zur Messung von Strömen und Widerständen

- Ausgangsspannung bis 1000 V
- Stromauflösung von 0,01 fA
- Widerstandsmessung bis 10 PΩ



# Kooperationslabor



## KONTAKT

**Marc René Lotz, M.Eng.**

✉ [m.lotz@tu-braunschweig.de](mailto:m.lotz@tu-braunschweig.de)

☎ +49 5331 939 4322 0

## WEBSEITE

[www.tu-braunschweig.de/elena/forschung/komponenten-der-energieversorgung/dc-systeme](http://www.tu-braunschweig.de/elena/forschung/komponenten-der-energieversorgung/dc-systeme)



## AUFGABEN UND LEISTUNGEN

- Validierung von vermaschten DC-Systemen mit Echtzeitsimulationskonzepten (HiL PHiL, RCP)
- Betriebs-, Regelungs- und Schutzkonzepte von MMC-basierten DC-Systemen
- Modellbildung und Simulation

# Kooperationslabor

## MMC-basiertes DC-System für die Validierung von Betriebs-, Regelungs- und Schutzkonzepten mit PHiL-Simulationen

Die Validierung von vermaschten DC-Netzen im Bereich der Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) stellt eine große Herausforderung aufgrund der Komplexität solcher Systeme dar. Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Validierung von Betriebs-, Regelungs- und Schutzkonzepten, wobei die Performance der eingesetzten Umrichtertechnologien, darunter Modular Multilevel Converter (MMC), von besonderer Bedeutung ist. Hier existiert ein großer Bedarf nach dem Proof-of-Concept mit Hilfe von Prototypen im Labormaßstab. Diese prototypischen Implementierungen bilden die Schnittstelle zwischen Simulation und Realisierung im großen Maßstab. Die Experimente können gefahrlos und unter definierten Bedingungen im Labor durchgeführt werden. Die so gewonnenen Ergebnisse unterstützen die Aussagekraft der reinen Simulationen deutlich.

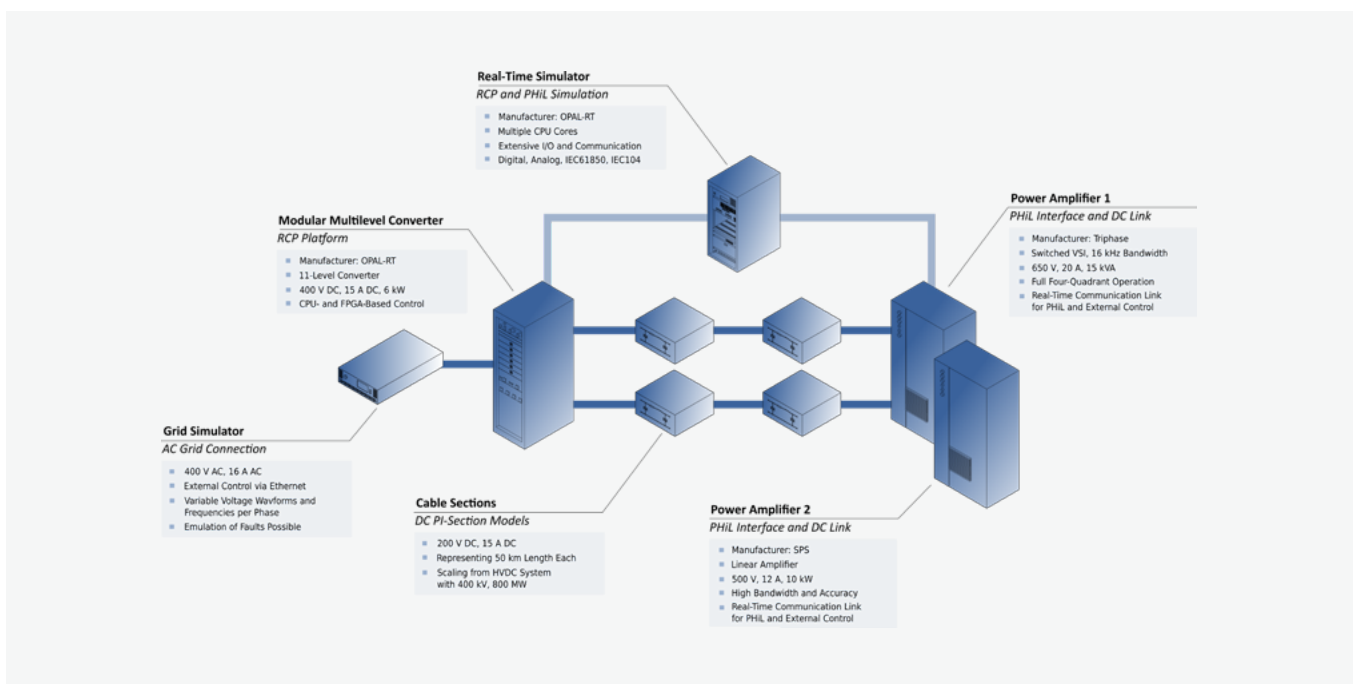
Aufgrund der Komplexität der betrachteten DC-Systeme können nicht alle Systemelemente im Labor nachgebildet werden. Mit Hilfe von Power-Hardware-in-the-Loop (PHiL) können jedoch einige Elemente in Echtzeitsimulationen ausgelagert werden. Der Laborprototyp interagiert dann mit den

Elementen innerhalb der Echtzeitsimulation, und umgekehrt. Ein Leistungsverstärker bildet dabei die Schnittstelle. Simulierte Signale werden in Signale größerer Leistung umgewandelt, um den Laborprototyp anzuregen. Da innerhalb dieses Forschungsbereichs eine enge Verknüpfung zwischen Entwicklung und Simulation von komplexen Topologien, und Validierung und prototypischer Implementierung im Labormaßstab, besteht, hat das elenia Institut für Hochspannungstechnik und Energiesysteme ein Kooperationslabor in Zusammenarbeit mit dem Institut für Elektrische Anlagen und Automatisierungstechnik (IfEA) der Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften geschaffen.

Das IfEA verfügt über eine geeignete Laborinfrastruktur und setzt Schwerpunkte auf die Validierung von DC-Systemen mit laborskalierten Prototypen, Regelung und Performance von MMC, sowie Konzepte und Anwendungen von PHiL. Die dort eingesetzten Echtzeitsimulatoren und Leistungsverstärker gehören zu den wesentlichen Komponenten der Laborausstattung. Im Labor werden der Prozess der Validierung und die Entwicklung von PHiL-Ex-

perimenten mit Echtzeitsimulationen von MMCs und DC-Systemen erprobt. Dabei wird analysiert, wie der Technology Readiness Level (TRL) von neuen Entwicklungen erhöht werden kann, und wie laborskalierte PHiL-Simulationen dazu beitragen können.

Der Fokus aktueller Arbeiten liegt auf der Analyse von Interaktionen zwischen AC- und DC-Systemen, sowie Schutz- und Regelungskonzepten von MMC und DC-Netzen. Mit Hilfe der flexiblen Laborausstattung können Stabilität und Performance zahlreicher Konzepte und Topologien berücksichtigt werden, wie zum Beispiel die Auswirkungen von Anforderungen wie Fault-Ride-Through (FRT) und dynamischer Spannungsregelung, der Vergleich von Grid-Following- und Grid-Forming-Konzepten, sowie die Validierung von Schutzkonzepten und -algorithmen für DC-Systeme. PHiL-Simulationen besitzen dabei einen hohen Stellenwert, da AC-/DC-Systemen, sowie Schutzgeräten und leistungselektronische Komponenten in Echtzeit simuliert und mit den Laborkomponenten über eine Leistungsschnittstelle verbunden werden können.





ECHTZEITSIMULATOR

Simulation von AC/DC-Systemen und MMCs in Echtzeit

- OPAL-RT OP5707XG
- Analog/Digital IO
- Kommunikationsprotokolle wie IEC61850
- Schnittstelle zu Leistungsverstärkern für PHiL



MODULAR MULTILEVEL CONVERTER (MMC)

RCP-Plattform für Validierung von Betriebs-, Regelungs- und Schutzkonzepten

- OPAL-RT OP1200
- 400 V DC, 6 kW
- 11 Level
- 5 kHz PWM-Frequenz



LINEARVERSTÄRKER

Flexibler Verstärker mit hoher Bandbreite

- Spitzenberger und Spies
- 22,5 kW, 424 V DC
- > 52 V/μs Anstiegsgeschwindigkeit
- Schnittstelle zu Echtzeitsimulator für PHiL



NETZSIMULATOR

Flexible AC-Spannungsquelle

- 15 kVA, 350 V
- DC, sowie 30 Hz bis 100 Hz
- Phasen unabhängig voneinander ansteuerbar



SCHALTVERSTÄRKER

Verstärker mit vollem 4Q-Betrieb

- Triphase PM15
- 15 kW, 650 V DC
- 16 kHz PWM-Frequenz
- Schnittstelle zu Echtzeitsimulator für PHiL





# Leistungsprüffeld



## LABORVERANTWORTLICHE

### Timo Meyer, M.Sc.

✉ Timo.meyer@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391 9739

### Enno Peters, M.Sc.

✉ e.peters@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391 7701

## WEBSEITE

<https://www.tu-braunschweig.de/elenia/forschung/synthetisches-leistungsprueffeld>



## AUFGABEN UND LEISTUNGEN

- Leistungsprüfung
  - Prüfung von Leistungsschaltern bis UN=72,5 kV
  - Kurzschlussprüfung 1-phasig
- Kontaktgeometrieuntersuchung
  - Untersuchung neuartiger Kontaktgeometrien
- Thermografieuntersuchung
  - Untersuchung von Oberflächentemperaturen bei verschiedenen Materialien

# Leistungsprüffeld

## Synthetische Erzeugung von Prüfbedingungen für Leistungsschalter der Mittel- und Hochspannungsebene

Das synthetische Prüffeld des Instituts dient der Erforschung der Vakuumleistungsschalter für die Hochspannungsebene. Dafür werden zu schaltende Kurzschlussbedingungen, die die maximale Belastung von Leistungsschaltern darstellen, synthetisch im Prüffeld nachgebildet.

Zur Etablierung des Vakuumleistungsschalters auf die Hochspannungsebene werden verschiedene Optionen mit zwei in Reihe verschalteten Vakuumchaltkammern oder variablen Kontakthüben untersucht. Es wurde ein spezieller Vakuumrezipient konstruiert, der variable Kontakthübe ermöglicht. An diesem Vakuumsschalter werden Ausschaltuntersuchungen durchgeführt. Dafür wird der Schalter zuerst von einem hohen Kurzschlussstrom belastet. Der Schalter wird während des Stromflusses geöffnet und ein Metaldampfbogen entsteht. Nach Erlöschung dieses Bogens wird der Schalter von einer gedämpften Spannungsschwingung (transiente Einschwingspannung) beansprucht. Der Kurzschlussstrom und die Einschwingspannung entstehen während eines Ausschaltvorgangs im Netz, der durch einen Netzfehler ausgelöst wer-

den kann. Zur Erzeugung des Kurzschlussstroms wird eine Hochstrom-Kondensatorbank eingesetzt. Diese Bank wird mit einer maximalen Spannung von 3 kV aufgeladen und erzeugt dadurch eine halbe Sinusstromschwingung von maximal 63 kA (RMS) bei einer Frequenz von 35 Hz / 50 Hz.

Die Hochspannungskondensatorbank erzeugt die transiente Einschwingspannung, die über eine getriggerte Funkenstrecke kurz vor dem Stromnulldurchgang geschaltet wird. Die Kondensatorbank kann bis 150 kV geladen werden. Aus Sicherheitsgründen wird die Bank mit einer Spannung bis zu 90 kV geladen. Dadurch ergibt sich ein Scheitelwert der transienten Einschwingspannung von 140 kV. Die restlichen Elemente des Hochspannungskreises sind modular aufgebaut, wodurch unterschiedliche Spannungssteilheiten und Frequenzen erzeugt werden. Die Frequenz der Einschwingspannung liegt zwischen 5 und 40 kHz, das den Frequenzen in der Mittel- und Hochspannungsebene während des Fehlerfalls entspricht und sogar drüber hi-

naus, um eine größere Belastung für den Schalter zu generieren.

Die während der Versuche entstehende Metaldampfbogen wird durch ein Schauglas und einer High-Speed Kamera beobachtet. Durch diesen Vorgang wird der Bogen charakterisiert und verschiedene Modellvorstellungen überprüft. Bei vielen Kontaktgeometrien, wie des Transversal-Magnetfeld-Kontakts (TMF-Kontakt) rotiert der Bogen mit einer sehr hohen Geschwindigkeit bis zu 1000 m/s auf den Kontaktstückoberflächen, wodurch unterschiedliche Phänomene entstehen. Diese schnellen Phänomene werden durch die hohe Auflösung (1024 × 1024) und einer maximalen Bildfrequenz von 800 kfps der Kamera dargestellt.

Um neue Kontaktgeometrien sowie individuelle Schirm- und Steueranordnungen für Vakuumanwendungen zu testen, werden in einem Klapprohfen unter Vakuum Temperaturen bis 1200 °C erzeugt. Es können Keramiken mit Durchmesser bis 200 mm gelötet werden.



HOCHSTROM (LINKS) / HOCHSPANNUNGS-  
(RECHTS) KONDENSATORBANK

Einphasige, synthetische Prüfung  
von Leistungsschaltern

- Max. Strom 63 kA(RMS)
- Max. 140 kV TRV
- Kreisfrequenz 35 Hz / 50 Hz
- TRV-Frequenz 5 bis 40 kHz



CARBOLITE GERO TS1

Freistehender Klappofen zum  
Vakuumlöten von Prüfanordnungen  
und Kontaktstücken

- Nutzbare Durchmesser 200 mm
- Temperatur bis 1200 °C
- Temperaturgradienten frei wählbar



VAKUUM-VERSUCHSSCHALTER

Untersuchung der Plasmaphänomene zwischen Schaltkontakten möglich

- Spezieller Vakuumrezipient
- Vakuumpumpe ( $p < 10^{-7}$  mbar)
- Variabler Hub bis  $2 \times 40$  mm
- Reihenschaltung von 2 Leistungsschalter möglich

NOVA S6 VON PHOTRON

Zur visuellen Untersuchung der  
Lichtbögen steht eine High-Speed  
Kamera zur Verfügung:

- Auflösung bis zu  $1024 \times 1024$  Pixel
- Schwarz-Weiß Aufnahmen
- Maximale Bildfrequenz 800 kfps
- Maximale Belichtungszeit von 200 ns





# TE-Kabine zur Messung von DC-TE



## KONTAKT

**Maik Kahn**

✉ [m.kahn@tu-braunschweig.de](mailto:m.kahn@tu-braunschweig.de)

☎ +49 531 391 7741

## WEBSEITE

<https://www.tu-braunschweig.de/elenia/forschung/hochspannungstechnik>



## AUFGABEN UND LEISTUNGEN

Die Forschung konzentriert sich auf die Untersuchung von Teilentladungen (TE) unter Gleichspannungsbelastung, um die Leistung von Isolierstoffen in modernen Energieübertragungssystemen besser zu verstehen. Ein automatisierter Versuchsaufbau wurde entwickelt, um Teilentladungen unter Gleichspannungsbedingungen präzise zu messen.

## TE-Diagnostik

### Aufbau einer automatisierten Teilentladungsmessung bei Gleichspannungsbelastung

Teilentladungen treten nicht nur unter Wechselfeldbelastung auf, sondern können auch bei Gleichspannungsbelastung beobachtet werden. Aufgrund der unterschiedlichen Verhaltensweisen von Teilentladungen unter diesen beiden Belastungsarten erfordert die Messung und Analyse jeweils spezifische Herangehensweisen.

Die Fortentwicklung der Teilentladungsmessung am elenia trägt dazu bei, eine eingehendere Untersuchung der Leistungsfähigkeit von Isolierstoffen in modernen Energieübertragungssystemen zu ermöglichen. Dies ermöglicht eine bessere Bewertung der Stabilität und Zuverlässigkeit dieser Systeme. Als Ergebnis dieser Fortschritte wurde ein automatisierter Versuchsaufbau entwickelt, um Teilentladungen unter Gleichspannungsbelastung zu messen. Die Verwendung der LabVIEW-Plattform zur Automatisierung dieser Messungen ermöglicht einen äußerst effizienten und reproduzierbaren Messprozess. Die entwickelte automatisierte Steuerung der Teilentladungsmessung eröffnet somit neue Möglichkeiten für effiziente Teilentladungsmessungen unter Gleichspannungsbedingungen. Dieser Aufbau besteht aus einer Quelle für Gleichspannung und einem geeigneten Teilentladungsmesssystem. Das automatisierte Programm bietet die Möglichkeit, Spannungsrampen mit variabler

Steilheit anzuwenden und Ruhezeiten zwischen den Spannungsänderungen einzufügen. Dadurch ist es möglich, TE-Ereignisse sowohl unter dynamischen als auch unter statischen Bedingungen zu analysieren.

Trotz einiger Herausforderungen, wie beispielsweise der Nichterkennung einiger TE-Ereignisse bei hoher Ereignisdichte und dem Einfluss eines Offsets auf die Spannungsmessungen, bestätigen die Ergebnisse von beispielhaften Messungen die Funktionsfähigkeit des Versuchsaufbaus und seine Eignung für künftige Forschungsarbeiten. Insgesamt eröffnet dieser Aufbau die Chance, eine umfassende Untersuchung des Verhaltens von Teilentladungen unter Gleichspannungsbelastung zu ermöglichen. Darüber hinaus bietet sich die Gelegenheit für weitere Untersuchungen an verschiedenen Prüfobjekten, um ein vertieftes Verständnis der TE-Mechanismen unter Gleichspannungsbelastung zu erlangen.

#### Forschungsbedarf für künftige Isoliersysteme

Die Einführung der neuen Halbleitergeneration, basierend auf Siliziumkarbid und Galliumnitrid, markiert einen bedeutenden Fortschritt im Bereich der Elektromobilität und erneuerbaren Energien. Diese Materialien bieten herausragende Leistungsvor-

teile wie höhere Schaltgeschwindigkeiten und Energieeffizienz, die in diesen Branchen von großer Bedeutung sind. Jedoch bringen diese Vorteile auch Herausforderungen mit sich. Die schnellen Spannungsfanken, die von diesen Halbleitern erzeugt werden, erfordern innovative Ansätze im Schutz elektrischer Antriebssysteme. Herkömmliche Isoliersysteme stoßen an ihre Grenzen und erfordern Anpassungen, um den Anforderungen gerecht zu werden und so die Effizienz und Zuverlässigkeit der Energiewende und Antriebstechnologien zu steigern. Besonders herausfordernd ist die Teilentladungsdiagnostik in diesen Systemen, da sie aufgrund der hohen Frequenzen und schnellen Schaltvorgänge noch wenig erforscht ist. Es ist von entscheidender Bedeutung, neue Methoden und Technologien zu entwickeln, um diese Phänomene zu erkennen und zu analysieren, um die Sicherheit und Effizienz der Energiesysteme zu gewährleisten. Insgesamt eröffnen die neuen Halbleitermaterialien aufregende Möglichkeiten für die Elektromobilität und erneuerbare Energien, bringen jedoch auch Herausforderungen mit sich, die es zu bewältigen gilt. Dies erfordert die Zusammenarbeit von Forschern, Ingenieuren und Technologen, um innovative Lösungen für diese zukunftsweisenden Branchen zu entwickeln.



DC-TE AUFBAU

Teilentladungsmessung unter Gleichspannungsbelastung

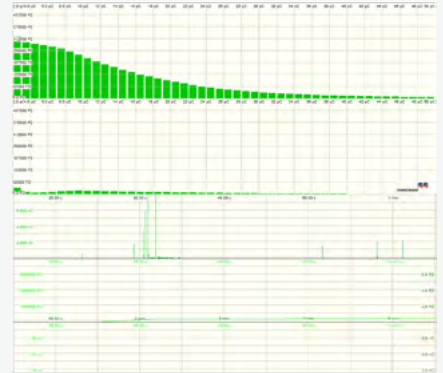
- Hochspannungsquelle bis 60 kV und 3 mA
- Impulsstrommessung nach DIN EN 60270
- Geschirmte TE-Messkabine mit Grundstörpegel < 1 pC
- Digitales Messsystem mit aktiver Störunterdrückung



HOCHSPANNUNGSQUELLE

Hochpräzise Spannungsnetzgerät

- Hochspannungsquelle
- Hohe Reproduzierbarkeit durch Automatisierung und Fernsteuerbarkeit
- Langzeitstabile Spannungserzeugung mit geringer Restwelligkeit < 0,001 %



TE-AKTIVITÄT EINER SPITZE-PLATTE-ANORDNUNG OHNE DIELEKTRISCHE BARRIERE BEI SCHNELLER SPANNUNGS-ERHÖHUNG

Beispielmessung zur Erkennung von TE

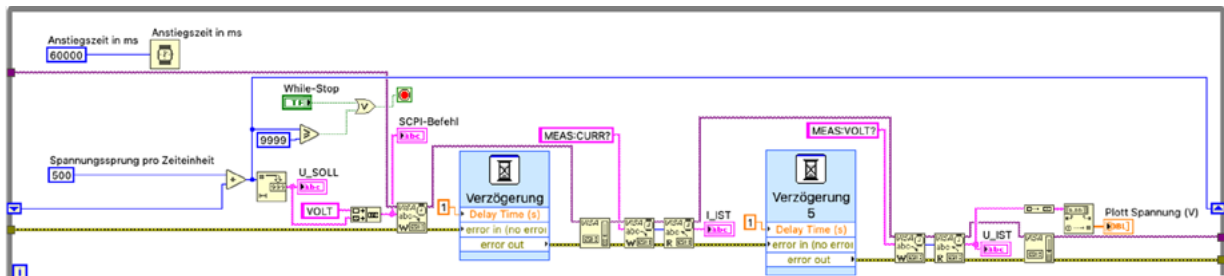
- TE-Impulszahl sortiert nach scheinbarer Ladungshöhe
- TE-Impulszahl im festgelegten Intervall



TE-MESSSYSTEM

Voll digitales Messsystem zur TE-Erkennung

- Ankopplungvierpol CPL 542A
- TE-Erfassungseinheit MPD 600
- Steuereinheit MCU 502
- Batterie MPD 600



BLOCKDIAGRAMM-ANSICHT IN LABVIEW

Programmierung der Spannungssteuerung

- Ansteuerung der Hochspannungsquelle per TCP-Protokoll
- While-Schleife zum Steuern der Rampenfunktion
- Ausschaltverzögerung und Schließen der VISA-Steuerung





# elenia-Ladepark



## KONTAKT

### Gian-Luca Di Modica, M.Sc.

✉ g.di-modica@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391 7704

### Lukas Ebbert, M.Sc.

✉ l.ebbert@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391 9727

### Robin Herman, M.Sc.

✉ r.herman@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391 7702

## WEBSEITE

<https://www.tu-braunschweig.de/elenia/forschung/elektromobilitaet>



## AUFGABEN UND LEISTUNGEN

- Erprobung von Konzepten zur Netz- und Systemintegration von Elektrofahrzeugen
- Untersuchung netzdienlicher Ladestrategien
- Forschung zu erzeugungsorientiertem und netzorientiertem Laden
- Lösungsansätze zur Erhöhung der Aufnahmekapazität von EVs im Niederspannungsnetz
- Bi- und unidirektionales Lademanagement von Elektrofahrzeugflotten

# Ladepark am Mühlenfordthaus

## Reale Erprobung von Konzepten und Strategien zur erfolgreichen Integration von Elektrofahrzeugen im Netz

Der elenia-Ladepark am idyllischen Okerufer direkt neben dem Mühlenfordthaus bietet nicht nur sechs Ladeparkplätze für die zukünftig steigende Anzahl von Elektrofahrzeugen in Braunschweig, sondern auch eine große Vielfalt an verschiedenen Ladesäulen und Wallboxen. Die dortige Ladeinfrastruktur bietet drei institutsinterne, fest installierte Ladesäulen. Der Großteil des weiteren Ladeequipments ist allerdings auf mobilen Item-Gestellen aufgebaut und lässt sich je nach Bedarf frei verschieben. So können im Netzdynamiklabor (NDL) und im Energiemanagementlabor (EML) des elenia eine große Anzahl an unterschiedlichen Testaufbauten realisiert werden. Die aus den Ladevorgängen gewonnenen Daten der institutsinternen Infrastruktur können zur weiteren Auswertung in einem eigens dafür angelegten Backend online gespeichert werden und so in am Institut laufende Projekte, wie beispielsweise MELANI oder NetFlexum, gewinnbringende Verwendung finden. Weiterhin werden die fest installierten Ladesäulen seit Neuestem auch von einem SMA Energymeter überwacht. So können diese auch in ein Energiemanagementsystem eingebunden werden, bei dem beispielsweise erzeugungsorientierte Ladestrategien untersucht werden. Abgerundet wird das Ganze durch eine Kopplung des Ladeparks mit dem EML und dem NDL. Letztere ermöglicht die Untersuchung des Einflusses von Ladevorgängen auf spezifische Netztopologien und -nutzungsfälle. Des Weiteren können so innovative netzdienliche Funktionen, wie beispielsweise eine in der Ladesäule integrierte Q(U)-Regelung, analysiert und getestet werden. Insgesamt werden die Ladeinfrastruktur und das Laborequipment laufend weiterentwickelt und verbessert, um auf die Veränderungen und Innovationen des stetig wachsenden Elektromobilitätsmarktes zu reagieren.

### Interoperabilität von Ladeequipment und EV

Ein weiterer Fokus liegt auf der Kommunikation zwischen Fahrzeug und Ladesäule. Diese ist essenziell für den reibungslosen Ablauf eines Ladevorgangs und so auch der Akzeptanz der Elektromobilität im Allgemeinen. Im Projekt LISA4CL wird in Zusammenarbeit mit Partnern ein induktives Ladesystem für Leistungen bis 22 kW entwickelt. Die Aufgabe des elenia besteht u. a. darin, eine normkonforme Kommunikation zwischen Primär- und Sekundärseite des Induktivübertragers zu entwickeln und zu erproben. Während des Ladevorgangs werden Parameter, wie die Ladeleistung oder der Ladezustand der Batterie (SoC), ausgetauscht. Um netzdienliche Funktionen, wie das bidirektionale Laden von EVs zu realisieren, muss diese Kommunikation ausgelesen und anschließend in diese eingegriffen werden. Dies geschieht mittels sogenannter Entwicklerplatinen für die Fahrzeug- und die Infrastrukturseite, welche in der Industrie zur Kommunikationsentwicklung eingesetzt werden, und wir von unseren Projektpartnern zur Verfügung gestellt bekommen. Diese können die Kommunikation im CAN-Format auslesen und so für die weitere Programmierung zur Verfügung stellen. Dadurch kann beispielsweise bei einer lokalen Spannungsabsenkung im Netz ein Signal an in der Nähe ladende Fahrzeuge übermittelt werden, sodass Leistung aus dessen Batterien zurück ins Netz gespeist wird. So kann die Spannung am entsprechenden Netzknoten wieder angehoben und Schäden an Betriebsmitteln oder Verbrauchern verhindert werden.

Eine weitere praktische Anwendung finden Entwicklerplatinen in eine für Laborversuche aufgebaute Ladenachbildung (s. Foto). Mit der Nachbildung können im Labor AC-Ladevorgänge mit verschiedenen Ladesäulen simuliert werden. Dabei bil-

det diese dem im EV befindlichen Teil der Kommunikation nach. Die Fahrzeugbatterie kann dabei durch eine AC-Last abgebildet werden. Zusätzlich ist es auch möglich, mithilfe eines bidirektionalen Gleichrichters und eines Batterieemulators die DC-Parameter des AC-Ladevorgangs zu erfassen und das Verhalten verschiedener Batterietypen und -größen zu simulieren.



AC-Ladenachbildung

Abgerundet wird der Ladepark durch eine eigens aufgebaute AC-Ladesäule für das am Institut angebotene Praktikum Elektromobilität (s. Foto Hardware). Diese wird mit einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) betrieben und kann so verschiedene Ladesituationen am institutseigenen eGolf nachbilden. Um im Praktikum auch DC-Ladevorgänge untersuchen zu können, existiert auch eine aufgebaute DC-Ladesäule. Diese ist wiederum mit einer Entwicklerplatine ausgestattet und kann so mit eigens in der Programmiersprache Python entwickelten Skripten und einer über CAN-Bus steuerbaren DC-Quellen DC-Ladevorgänge nachbilden. So können Studierende einen ganzheitlichen Einblick in die Ladeabläufe gewinnen sowie die Kommunikation zwischen Fahrzeug und Ladesäule untersuchen. Dies ermöglicht praxisnahe Einblicke in die Grundlagen der Elektromobilität und versucht den Studierenden die Herausforderungen der Netz- und Systemintegration von EVs zu verdeutlichen.



LADEPARK AM MÜHLENPFORDTHAUS

Auf 6 Ladeparkplätzen können hier EVs geladen werden

- 3 Ladesäulen mit 6 Ladepunkten
- Max. 22 kW dreiphasiges AC-Laden (32 A)
- Max. 20 kW DC-Laden (via CCS- und CHAdeMO-Stecker)



LABORLADESÄULE DES PRAKTIKUMS ELEKTROMOBILITÄT

Dreiphasige, durch SPS gesteuerte, AC-Ladesäule

- Max. Leistung 22 kW (32 A)
- Einblick in die Sicherheits- und Steuerungskomponenten
- Bidirektionales Laden möglich



PION WAVE

Mobile dreiphasige Wallbox für Laboruntersuchungen

- Max. Leistung 22 kW (32 A)
- Ein Anschlusspunkt
- Innovatives Design in Waschbetonoptik



SMA EV CHARGER BUSINESS

Mobile dreiphasige Ladesäule für Laboruntersuchungen

- Max. Leistung 22 kW (32 A)
- Zwei Anschlusspunkte
- Für den gewerblichen Bereich



MENNEKES AMTRON PREMIUM

Mobile dreiphasige Wallbox für Laboruntersuchungen

- Max. Leistung 22 kW (32 A)
- Ein Anschlusspunkt
- Gleiches Modell wie am Okerufer



# Energiemanagementlabor

The screenshot shows a Python IDE with the following code in the editor:

```

"""MELANI ENERGY MANAGEMENT SYSTEM"""

import communication_module.communication as com
import strategies.strategies as strat
import timeseries_ls.data_recording as data_recording
import tables.instantaneous_data as inst_data
import providersegment.segment as ps
# import MELANI_GUI as MEL_GUI

data_PU = com.DataTransfer_PU()
data_API = com.DataTransfer_API()
HU1 = strat.BSS_virtualization('HU1', 1, 123, 0, 23231, 21345)
timeseries = data_recording.Data_recording()
PV_timeseries = data_recording.PV_Data_recording()
instantaneous_data = inst_data.Instantaneous_datatable()
Provider_segment = ps.Providersegment()
instantaneous_data2 = ps.Instantaneous_datatable2()
# gui = MEL_GUI.MELANI_GUI()

if __name__ == '__main__':
    concurrentthreads = [data_PU, data_API, HU1, instantaneous_data, Provider_segment]
    for threads in concurrentthreads:
        threads.start()
    
```

Below the code, there are two data tables:

### Aktuelle Leistungswerte der MELANI-Anlage

Timestamp	Name	E_BSS	SoC	P_BSS	P_Load_hh	P_Load_E
23-10-2023 15:18:58	Total	7783.52	12.6	650.25	1686.68	45.5

### Überblick der Haushalte

Timestamp	Name	E_BSS	SoC	P_BSS	P_Load_hh	P_Load_E
23-10-2023 15:18:58	HU1	0.0	0.0	44.35	12.72	0.0
23-10-2023 15:18:58	HU2	0.0	0.0	0.0	309.16	0.0
23-10-2023 15:18:58	HU3	0.0	0.0	44.84	12.23	0.0
23-10-2023 15:18:58	HU4	0.0	0.0	0.0	217.17	0.0
23-10-2023 15:18:58	HU5	0.0	0.0	27.8	29.27	0.0
23-10-2023 15:18:58	HU6	0.0	0.0	0.0	187.21	0.0
23-10-2023 15:18:58	HU7	0.0	0.0	44.25	12.82	0.0
23-10-2023 15:18:58	HU8	0.0	0.0	47.99	9.08	0.0
23-10-2023 15:18:58	HU9	0.0	0.0	45.88	11.19	0.0
23-10-2023 15:18:58	HU10	0.0	0.0	49.37	0.0	7.7
23-10-2023 15:18:58	HU11	0.0	0.0	38.38	11.09	7.6
23-10-2023 15:18:58	HU12	0.0	0.0	51.19	5.88	0.0
23-10-2023 15:18:58	HU13	0.0	0.0	25.3	31.77	0.0
23-10-2023 15:18:58	HU14	0.0	0.0	43.99	9.77	7.5
23-10-2023 15:18:58	HU15	0.0	0.0	0.0	149.05	7.5
23-10-2023 15:18:58	HU16	0.0	0.0	0.0	101.16	0.0
23-10-2023 15:18:58	HU17	0.0	0.0	49.62	0.0	7.5
23-10-2023 15:18:58	HU18	0.0	0.0	12.67	44.45	0.0
23-10-2023 15:18:58	HU19	0.0	0.0	38.9	18.23	0.0
23-10-2023 15:18:58	HU20	0.0	0.0	47.06	10.06	0.0
23-10-2023 15:18:58	HU21	0.0	0.0	0.0	280.81	0.0
23-10-2023 15:18:58	HU22	0.0	0.0	44.22	12.91	0.0
23-10-2023 15:18:58	HU23	0.0	0.0	0.0	121.26	0.0
23-10-2023 15:18:58	HU24	0.0	0.0	0.0	88.59	7.7
23-10-2023 15:18:58	Providersegment	0.0	0.0	0.0	-	-

**KONTAKT**

**Dr.-Ing. Frank Soyck**  
 ✉ f.soyck@tu-braunschweig.de  
 ☎ +49 151 6511 9141

**Frederik Tiedt, M.Sc.**  
 ✉ f.tiedt@tu-braunschweig.de  
 ☎ +49 531 391-7708

**Marcel Lüdecke, M.Sc.**  
 ✉ m.luedecke@tu-braunschweig.de  
 ☎ +49 531 391-9726

**Julien Essers, M.Sc.**  
 ✉ j.essers@tu-braunschweig.de  
 ☎ +49 531 391-9716

**WEBSEITE**

[www.tu-braunschweig.de/elenia/forschung/labore/energiemanagementlabor](http://www.tu-braunschweig.de/elenia/forschung/labore/energiemanagementlabor)



**AUFGABEN UND LEISTUNGEN**

- Durchführung von Speichereffizienzmessungen
- Erprobung von Steuerungsverfahren und Kommunikationsprotokollen
- Kombinierte Versuche mit Hardwaregeräten, Simulationsmodellen und Steuerungssystemen mit einer modularen Steuerungsumgebung (HiL)
- Energie- und Leistungsmessungen
- Steuerungs- und Auswertungstools für Speichereffizienz-Messungen
- Kompatibilitätstest zur technischen Bewertung des Betriebs von Batteriespeichern mit Wechselrichtern
- Validierung von Betriebsstrategien für Energiemanagementsysteme auf Gebäudeebene

# Energiemanagementlabor

## Forschung, Innovation und Praxiserfahrung für eine nachhaltige Energiezukunft

Das Energiemanagementlabor bietet viel Raum zur Untersuchung von innovativen Energiemanagementkonzepten für Nur-Strom-Haushalt- und Prosumer-Demonstratoren. Im Zentrum der Forschung stehen das Prosumer-Verhalten im Kontext der Elektromobilität, die Kopplung des Wärme- und Elektrizitätssektors, das Last- und Speichermanagement sowie neu entwickelte Zähl- und Messkonzepte. Hierfür kann auf zahlreiche Geräte, wie beispielsweise diverse AC-Lasten, DC-Quellen, eine Ladeinfrastruktur mit Ladesäulen verschiedener Hersteller sowie ein Wärmepumpenteststand bestehend aus einer Luft-Wasser-Wärmepumpe, einer Klimakammer und einem Heizkreislauf zurückgegriffen werden. Mithilfe einer Vielzahl an mobilen Messaufbauten können diverse energietechnisch relevante Größen aufgenommen, gespeichert und ausgewertet werden. Durch die leistungs- und datentechnische Kopplung des Energiemanagementlabors mit dem Netzdynamiklabor besteht zudem die Option von laborübergreifenden Messungen. Dies ermöglicht die Bearbeitung innovativer Projekte und neu aufkommender Forschungsfragen im Bereich der ganzheitlichen laborbasierten Forschung, wie beispielsweise die Auswirkungen eines Smart Building auf die Netzstabilität.

Seit der Eröffnung des Labors Ende 2018 wurde unter anderem bereits der Aufbau eines Prosumer-Demonstrators im Projekt

NetProsum2030 realisiert und Untersuchungen zu verschiedenen Mobilitätskonzepten im Projekt EnEff Campus: blueMAP durchgeführt. Aktuell werden im Energiemanagementlabor die Forschungsvorhaben flexess und MELANI bearbeitet. Im Projekt flexess wird der zielgerichtete Einsatz von Flexibilitäten technischer Anlagen in den Bereichen Haushalt, GHD, gewerblicher Handel und Elektromobilitätsflotten untersucht. In diesem Rahmen werden im Energiemanagementlabor Haushalte mit unterschiedlichen Charakteristiken nachgebildet und vermessen. Im Forschungsprojekt MELANI werden beispielsweise Messverfahren und Zählerkonzepte zur Mehrfachnutzung von PV-Heimspeichersystemen entwickelt. Die Laborumgebung des Energiemanagementlabors wird eingesetzt, um ein Abbild des entwickelten Konzepts zu evaluieren. Auch die für MELANI erstellten Betriebsstrategien für Energiemanagementsysteme auf Gebäudeebene können im Labor validiert werden. Mehr Informationen zum genauen Vorgehen können auf den Seiten zum jeweiligen Forschungsprojekt gefunden werden.

Auch im Forschungsprojekt KEMAL (Kundenorientiertes Energiemanagement mit autonomer Lastregelung) werden Energiemanagementsysteme untersucht. Hierbei stehen jedoch die nutzbaren Potentiale in Kombination mit einem SMGW im Vordergrund. Das Projekt beschäftigt sich

mit der Weiterentwicklung und Erprobung existierender Standards rund um das Smart Meter Gateway (SMGW) und betrachtet ganzheitlich das intelligente Messsystem. Schwerpunkt ist hierbei die Entwicklung eines Home Energy Management Systems (HEMS), welche die normgerechte Anbindung vollflexibler Prosumer an das intelligente Messsystem gewährleistet. Dieses System wird nun im Labor und unter Realbedingungen erprobt.

Neben dem Forschungsbereich profitiert auch der Lehrbetrieb in Form von zahlreichen studentischen Arbeiten, die in den Laboren durchgeführt werden können und den zusätzlich angebotenen Laborversuchen parallel zu den Vorlesungen. Studierende können hier in Versuchen zu Themen wie dem Energiemanagement oder der Wärmepumpe Praxiserfahrungen im Labor sammeln und ihr theoretisch erlerntes Wissen anhand anschaulicher Praktika festigen.

Im Labor werden außerdem Kompatibilitätstest zur technischen Bewertung des Betriebs von diversen Batteriespeichern im Zusammenspiel mit Wechselrichtern durchgeführt. Darüber hinaus ermöglicht die umfangreiche Ausstattung des Energiemanagementlabors die Bearbeitung von Dienstleistungsprojekten im Kontext von Effizienzmessungen von PV-Speichersystemen nach Effizienzleitfaden und erweitert somit den Dienstleistungsbereich des Institutes.



MOBILE LADESÄULE IM LABOR

SMA EV CHARGER BUSINESS: Laden von Elektrofahrzeugen

- Laden mit bis zu 2 x 22 kW je Charger (230 VAC / 400 VAC, max. 32 A)
- voll integrierte Elektromobilitätslösung auch für das Laden mit Solarstrom
- RFID und OCPP Schnittstelle
- Schutz vor Überlastung des Netzanschlusspunktes



ENERGIESPEICHER FÜR GWERBE, INDUSTRIE ODER MEHRFAMILIENHÄUSER

TESVOLT TS HV 70

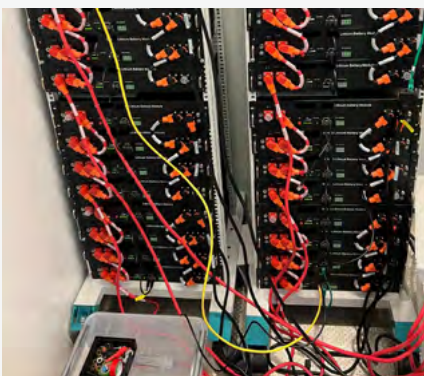
- Lithiumspeicher (NMC)
- Dauerlade/ -entladerate: 1C
- 8000 Vollzyklen (Garantie für 10 Jahre)
- Sicherste Zelltechnologie
- Hochvoltssystem



LEISTUNGSFÄHIGE EINPLATINEN-COMPUTER

Raspberry Pi 4 Model B

- 8 GB RAM, SSD-Karte als Festspeicher
- Nutzung im Projekt MELANI, um das entwickelte Energiemanagementsystem zu testen
- Entwicklung von CAN-Interface in Kooperation mit Physikalisch Technischen Bundesanstalt (PTB): Auslesen diverser Stromzähler in 1-sekündlicher Auflösung möglich → Messwerte werden zu effizienter Leistungsflusssteuerung im Energiemanagementsystem verarbeitet



KOMPATIBILITÄTSTEST ZUR TECHNISCHEN BEWERTUNG DES BETRIEBS VON BATTERIESPEICHERN

Ziele der Tests:

- Kompatibilität von Batteriespeichern mit Wechselrichtern feststellen
- Systemverhalten analysieren (unter Normalbetrieb, Überlast- und Überladebedingungen)
- Bestätigung der Sicherheitsmaßnahmen bei der Erstinbetriebnahme
- Einschaltstromprüfung und DC-Ripple-Analyse



ELEKTROMOBILITÄT AM ELENIA INSTITUT

e-Golf „emilia“

- Seit 2014 im Braunschweiger Verbundprojekt „emil“ im Einsatz
- Forschung in den Bereichen induktives Laden und Netzanbindung
- Laden mittels institutseigener Infrastruktur
- Reichweite von ca. 150km ohne Ladestopp



MESSCHRANK

- Verwendung im Forschungsprojekt MELANI und KEMAL zur Abbildung eines Gebäudenetzes
- Anschließen diverser elektronischer Lasten und DC-Quellen möglich
- Aufnahme energietechnisch relevanter Messgrößen durch integrierte Leistungsmessung





# Netzdynamiklabor



## KONTAKT

### **Björn-Oliver Winter, M.Sc.**

✉ [bjoern.winter@tu-braunschweig.de](mailto:bjoern.winter@tu-braunschweig.de)

☎ +49 531 391-7748

### **Frederik Tiedt, M.Sc.**

✉ [f.tiedt@tu-braunschweig.de](mailto:f.tiedt@tu-braunschweig.de)

☎ +49 531 391-7708

### **Timo Sauer, M.Sc.**

✉ [t.sauer@tu-braunschweig.de](mailto:t.sauer@tu-braunschweig.de)

☎ +49 531 391-7721

## AUFGABEN UND LEISTUNGEN

Untersuchungen zu Themen wie:

- Verhalten von Komponenten auf Frequenz- und Spannungsänderungen
- Überstrombegrenzung und Kurzschlussverhalten dezentraler Erzeugungsanlagen
- Bereitstellung von konventioneller und schneller Primärregelleistung
- Verhalten und Stabilität von Voltage-Control-Invertern im Inselnetzbetrieb oder Netzparallelbetrieb
- Auswirkungen veränderlicher Spannungen auf Regelungen wie bspw.  $Q(U)$  und  $P(U)$
- Anti-Islanding-Detection und Schwingkreistests bis zu 33 kVAr nach DIN EN 62116
- Entwicklung und Test neuartiger Regelungsfunktionalitäten zur Bereitstellung von systemstützenden Eigenschaften für das Verbundnetz
- Untersuchungen zu regelbaren Ortsnetztransformatoren mittels eigenem Simulationsmodell

# Netzdynamiklabor

## Netzstabilität in Zeiten stromrichterdominierter Netze – Auf Millisekunden kommt es an

Das Netzdynamiklabor, der Name ist Programm: Hier werden aktuelle Forschungsthemen zur Integration von Erzeugungsanlagen erneuerbarer Energieträger in das Niederspannungsnetz untersucht. Der Fokus liegt auf hochdynamischen, transienten Vorgängen – Zielmarke: Millisekunden bis wenige Sekunden.

Ein engagiertes Team bestehend aus wissenschaftlichem Personal, hilfswissenschaftlichen Kräften und unserer institutseigenen Werkstatt arbeitet dabei tatkräftig zusammen. Das Labor und sein Team stellen sich vor:

### Über das Labor – Zentrale Fragestellungen

Ziel der Untersuchungen im Netzdynamiklabor ist es, die Energiewende voraus zu denken. Während sich die Stabilität herkömmlicher Energieversorgungssysteme vor allem auf generatorbasierte Großkraftwerke aus höheren Spannungsebenen stützt, wandelt sich die Einspeisestruktur derzeit sehr stark. Es kommt vermehrt zu dezentraler Einspeisung aus umrichterbasierten, kleineren Anlagen aus niedrigeren Spannungsebenen. Erzeugungsanlagen erneuerbarer Energieträger geben ihre Leistung über Umrichter ans Netz ab und unterscheiden sich so von herkömmlichen thermischen Kraftwerken, welche mittels großer Synchrongeneratoren Leistung bereitstellen. Die Anforderungen an moderne Erzeugungsanlagen im Hinblick auf ihr Verhalten in einem hochvolatilen, dynamischen Netz sind vielfältig und aufgrund ihrer leistungselektronischen Charakteristik, der Kommunikationsstrukturen und ihrer Ausregelung einem hohen Maß an Komplexität unterlegen.

Mittels Szenarien, in denen diese zukünftige Stromversorgungsinfrastruktur bereits heute im Labor abgebildet wird, sollen Chancen als auch Herausforderungen bei der Versorgung mit hohem Anteil erneuerbarer Energien und der Elektromobilität im Voraus erkannt und untersucht werden.

Dies bedeutet grundlegende Änderungen in der Charakteristik zukünftiger Netzinfrastrukturen, unter denen das Zusammenspiel von konventionellen und neuartigen Energieversorgungsanlagen und Regelungen zur Sicherung der Netzstabilität laufend neu bewertet werden muss. Im Netzdynamiklabor findet sich die hierfür passende Infrastruktur: Flexibel anzuordnende Quellen, Netznachbildungen, Lasten, Erzeugungsanlagen, frei parametrierbare Vollumrichter und Power-Hardware-In-The-Loop Echtzeitsimulatoren ermöglichen die Abbildung verschiedenster Szenarien, insbesondere auch kritischer Situationen: vieles, was man in der realen Energieversorgungsinfrastruktur nicht sehen will, kann hier zunächst einmal folgenlos erprobt und durchfahren werden.

Die Laborumgebung konzentriert sich also im Speziellen auf Versuche und Szenarien, welche sich mit besonderen Belastungssituationen von Netzkomponenten sowie dem netzdienlichen Potenzial dezentraler Erzeugungsanlagen auseinandersetzen.

### Das Netzdynamiklabor als Dienstleister für Forschung und Industrie



Abbildung 1: Ladesäule der PION AG im 7-stündigen 44kW-Dauerbelastungstest

Über den Forschungsalltag hinaus bearbeiten wir auch regelmäßig externe Aufträge für externe Partner – vom Start-Up bis zu größeren Industriekunden.

Im Zentrum stehen für unsere Auftraggeber vor allem Fragestellungen zur sicheren Betriebsführung von Betriebsmitteln, Soft- und/ -oder Hardwarekomponenten im Umfeld einer abbildbaren Niederspannungsumgebung. Typische Aufträge für Externe umfassen:

- Die Charakterisierung des Verhaltens von Geräten, bspw. in Folge von verschiedenen parametrisierten Regelungen unter reproduzierbaren Szenarien
- Die Aufnahme der Robustheit von entwickelten Geräten in besonderen Belastungssituationen, wie Kurzschlüssen, Überspannungen, Oberschwingungen, etc.
- Die erste Einschätzung der Konformität von Prototypen mit (neu entwickelten/ bestehenden) Netzanschlussrichtlinien.

### Vorstellung von Laborkomponenten – Design, Bau und Einsatz von automatisierten Netznachbildungen

Herzstück der meisten Versuche im Netzdynamiklabor ist eine Netznachbildung – ein elektrisch möglichst identischer Nachbau einer Niederspannungsleitung, an der verschiedene Komponenten der Energiewende, Verbraucher wie Erzeuger, auf ihr Zusammenwirken hin geprüft werden. Insbesondere der schnelle und flexible Zusammenschluss verschiedenster Netzkomponenten, die einfache und wiederholbare Prüfung von Netzszenarien und der sichere Umgang mit den Komponenten sind wichtige Eigenschaften einer Netznachbildung.

Um den gestiegenen Anforderungen, insbesondere an genaue Tests unter einfach zu verändernder Netzimpedanz Rechnung zu tragen, wurde ein Konzept für eine neue Netznachbildung entworfen. Ihr modulares Konzept erlaubt insbesondere eine flexible Verschaltung in unterschiedliche, parallele wie serielle Verschaltung von Netzsträngen. Eine Auslegung auf Ströme bis 125A erlaubt eine ausreichende Kapazität, auch für zukünftige Erweiterungen des Labors und parallele Versuchsdurchführungen.

Die Laboringenieur\*innen des elenia übernehmen wesentliche Bestandteile des Designs, Auslegung, Beschaffung, Aufbau und Inbetriebnahme der Netznachbildung. Die entstandenen Geräte wurden für Versuche des Projekts ‚Netzregelung 2.0‘ und weitere Nachfolgeprojekte bereits eingesetzt, um verschiedene Fehlersituationen, wie Spannungseinbrüche, Oberschwingungen oder Inselnetzsituationen im Labor nachzustellen.

Herzstück der Nachbildung sind Open-Source SPS, die eine zentrale Ansteuerung, Überwachung und flexible Erweiterung ermöglichen. Dies befähigt uns zu wiederholbaren Versuchsreihen, die eine automatische Einstellung der Netzimpedanz und Schaltung von Laborkomponenten von zentralen Rechnern aus beinhalten. Vorinstallierte Messabgriffe für Strom und Spannung ermöglichen dabei eine flexible modulare Messung des Netzzustandes an der Komponente oder in der Leitung je nach Bedarf des Versuchs. Der Zustand der Nachbildung kann im Versuchsverlauf jederzeit überwacht werden.



Abbildung 2: Innenansicht der neuen Netznachbildung – Autor: M. Gand

### Vorstellung von Laborkomponenten – OPAL Real-Time-Simulator

Die Tests in unserem Labor bieten einen entscheidenden Vorteil für unsere Forschung: Szenarien oder Verhalten, die in abstrahierten und notwendigerweise vereinfachten Simulationen erdacht worden sind, können unter realistischeren Bedin-

gungen verifiziert werden. Diese Versuche sind oft aussagekräftiger, Regelungen können den Beweis ihrer korrekten Funktionsweise erstmals in der echten Welt antreten. Bevor Regelungen in Hardware implementiert werden, bietet es sich jedoch an, ihre Funktionsweise in flexibleren Einbettungsszenarien zu testen. Um Netzfehler und Reglerverhalten im Millisekundenbereich abbilden zu können bedarf das Labor einer integrierten Mess- und Steuerungsmöglichkeit, welche in diesen Bereichen zuverlässig und verzögerungsfrei arbeitet.



Abbildung 3: Rechenstarker OPAL Echtzeitsimulator mit analogen Schnittstellen zur Ansteuerung von Komponenten im Labor

Zu diesem Zweck wurde das Labor um einen rechenstarken Echtzeitsimulator ergänzt. Der Echtzeitsimulator ermöglicht es, hybride Anwendungsfälle aus Simulation und Hardware in „quasi“-Echtzeit zu ermöglichen. Das hat mehrere Vorteile: Simulationen können schrittweise in das Labor überführt werden. Ein Teil des Versuchsaufbaus wird von Laborgeräten übernommen, der Rest findet im Echtzeitsimulator statt. Geräte und Simulationsmodell arbeiten dabei parallel und in Echtzeit zusammen. Analoge Messwerte, wie Spannung und Strom einzelner Geräte werden über Messeinrichtungen auf den Echtzeitsimulator geführt, dort intern unter Einbeziehung verschiedener Simulationsparameter verrechnet und als neue Stellgrößen analog ausgegeben. So entsteht ein sogenanntes Power-Hardware-In-The-Loop (PHIL) System – Die Verkopplung von sehr schnellen Simulationen mit elektrischer und mechanischer Hardware. Im Netzynamiklabor werden Simulationsschrittweiten von unter 100 µs erzielt. Im Gegensatz zum reinen Laborbetrieb auf Hardwareebene ermöglicht ein Echtzeitsimulator die flexible Abbildung von Elementen des Niederspannungsnetzes, z. B. Maschinen unterschiedlicher Trägheiten, Batterien mit unterschiedlichen Leistungen, Netze mit unterschiedlichen Anordnungen, welche im Labor nur mit hohem Aufwand

nachzustellen wären. All das lässt sich hier einfach per Mausklick ändern. Fehlerfälle in spannungsführenden Elementen können in Simulationen abgebildet werden, ein Vorteil für die Personensicherheit und den Geräteschutz.

### Neues aus dem Labor – Prüfung der Auswirkung schnellerer Netzstützung auf die Fähigkeit von Wechselrichtern zur Erkennung von ungewollten Inseln

Angesichts der immer höheren Durchdringung des Netzes durch wechselrichterbasierte erneuerbare Energien werden diese immer wichtiger für den zukünftigen stabilen Netzbetrieb. Daher sind Überlegungen, wie ihr Verhalten derart gestaltet werden kann, dass sie im Fall von Netzfehlern bestmöglich einen Beitrag zur Stabilisierung des Betriebs leisten, fester Bestandteil der technischen Normungsarbeit. In einer Studie für das FNN wird im Netzynamiklabor des elenia derzeit evaluiert, ob die etwaige erweiterte Beteiligung von Wechselrichtern an der Netzstützung ihre Fähigkeit zur Inselnetzerkennung negativ beeinträchtigen könnte. Anhand eines marktüblichen Geräts wird hierbei in Referenzaufnahmen sein Verhalten in Fehlersituationen sowie die Effektivität seiner Fähigkeit zur Erkennung von Inselnetzen unter Variation verschiedener Ausgangsbedingungen und Arbeitspunkte charakterisiert. Anschließend wird das Verhalten des Geräts möglichst gut an verschiedene aktuell diskutierte Anforderungen angepasst und die Inselnetzversuchsreihen jeweils wiederholt. Die Auswertung der mehreren hundert geplanten Versuche allein der Inselnetztests werden dann eine umfassende Beantwortung der Frage ermöglichen. Die neue Netznachbildung und hierauf angepasster Code zur teilautonomen Versuchsdurchführung ermöglichen die Beherrschung der hierfür notwendigen Komplexität.

Fotos: Frederik Tiedt/TU Braunschweig

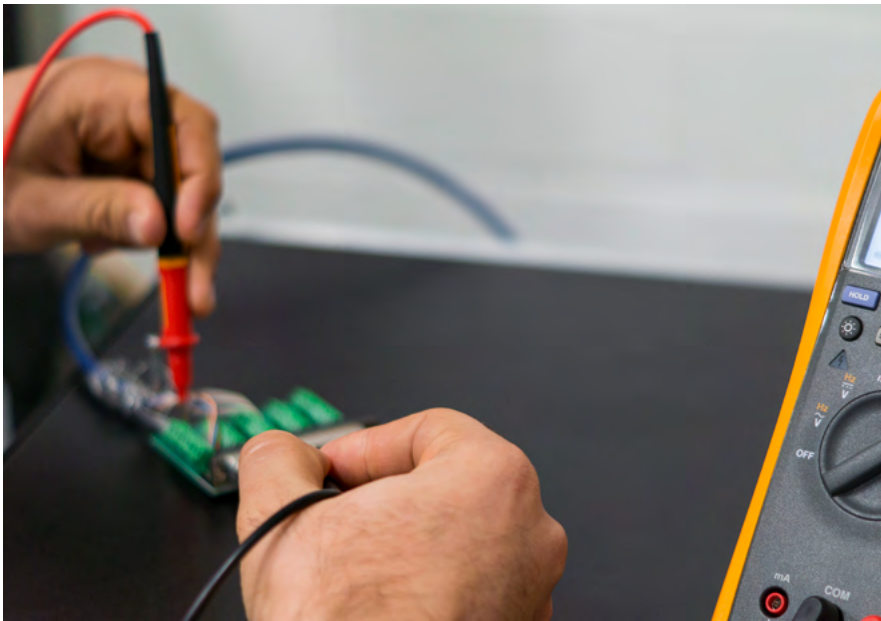


Abbildung 5: Leitungsnachbildende Elemente entsprechen bis zu 1,8 km Niederspannungskabel

### Ausbildung und Mitarbeit studentischer Hilfskräfte

Mehrere hilfswissenschaftliche Mitarbeitende sind regelmäßig im Einsatz, um wissenschaftliche Mitarbeitende im Labor zu unterstützen. Unter anderem bei Aufgaben wie der softwareseitigen Implementierung und Ansteuerung von Komponenten im Labor mittels Programmen wie LabVIEW oder MATLAB/Simulink, oder auch der Installation von elektrischen Komponenten oder Hardware – Im Labor können Studierende praktische Erfahrungen im Bereich der Elektroinstallationen, aber auch im Bereich der anwendbaren Theorie von Regelungs- und Messtechnik sammeln.

### Fakten & Zahlen zum Netzdynamiklabor

Verschiedene Komponenten wie Wechselrichter, AC- und DC-Quellen und Lasten aber auch ein 50 kVA Einzelstrangregler ermöglichen es, im Labor einen vollständigen Niederspannungsstrang nach- bzw. abzubilden. Um die Niederspannungsumgebung zu vervollständigen können bis zu 1,8 km Niederspannungskabel mittels flexibel einstellbarer Widerstände und Induktivitäten nachgebildet werden.

Ein leistungsstarkes und genaues Messsystem mit 16-Bit Messauflösung und einer Abtastrate von 500 kS/s ermöglicht ein genaues und präzises Arbeiten. Spannungen bis  $\pm 1400$  V und Ströme bis zu 200 A können an verschiedenen Messpunkten in der Laborumgebung aufgenommen und verarbeitet werden. Die Kernelemente und Versuchskomponenten, welche jedoch die zentralen Kernpunkte des Labors definieren sind im Folgenden zu finden:

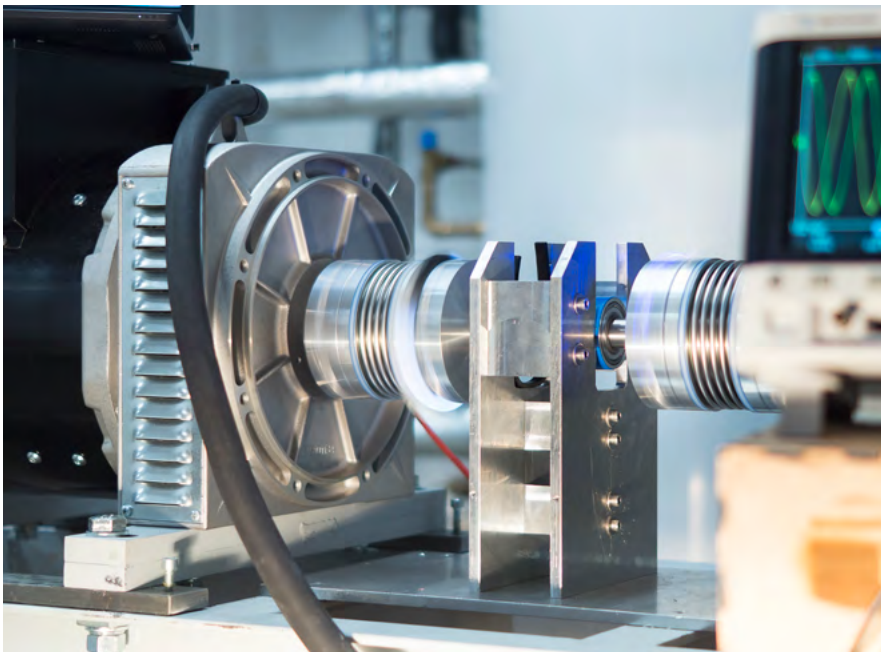


Abbildung 4: Vielfältige Arbeits- und Lernbereiche an unterschiedlichen Laborschnittstellen



NETZSIMULATOR AMETEK MX-45

Voll rückspeisefähiger Netzsimulator zur Nachbildung verschiedener Netzzustände mit variablen Netzparametern:

- 45 kVA Anschlussleistung
- Spannungen bis 300 V<sub>RMS</sub> und 400 V<sub>DC</sub>
- Ströme bis 50 A<sub>RMS</sub>
- Frequenzbereich 16–800 Hz
- 4-adriger Anschluss (Unsymmetrische Belastung)
- Integriertes Messsystem
- Analoge Schnittstellen zur präzisen Ansteuerung einzelner Phasen im Verstärkerbetrieb



NETZSIMULATOR REGATRON TC.ACS.30

Voll rückspeisefähiger Netzsimulator zur Nachbildung verschiedener Netzzustände mit variablen Netzparametern:

- 30 kVA Anschlussleistung
- Spannungen bis 305 V<sub>RMS</sub> und 800 V<sub>DC</sub>
- Ströme bis 43 A<sub>RMS</sub>
- Frequenzbereich 16–1000 Hz
- 4-adriger Anschluss (Unsymmetrische Belastung)
- Integriertes Messsystem
- Analoge Schnittstellen zur präzisen Ansteuerung einzelner Phasen im Verstärkerbetrieb
- Betrieb als simulierte RLC-Last
- Automatisierte Ablaufsteuerung mittels Python basierter Skripte
- Schnelle Flankenanstiegszeiten von bis zu 4 V/ $\mu$ s zur Untersuchung transients Ereignisse



OPAL 5700 REAL-TIME-SIMULATOR

Echtzeitsimulator mit hoher Rechenleistung für Power-Hardware-In-The-Loop Anwendungen und verzögerungsfreie Laboransteuerung:

- Analoge/Digitale Ein- und Ausgänge zur Kopplung verschiedenster Laborkomponenten
- Kommunikationsschnittstellen über Protokolle wie MODBUS, EtherNet, EtherCAT, CAN, Time-Stamp, GOOSE, etc.
- FPGA-Technik zur schnelleren Befehlsverarbeitung
- Arbeiten in der Entwicklungsumgebung von MATLAB/Simulink
- Echtzeitfähige Simulationen von Hardware und elektrischen Netzen mit Simulationsschrittweiten unter 100  $\mu$ s



TRIPHASE – VOLL PROGRAMMIERBARE UMRICHTER

Frei programmierbare Vollumrichter zur Implementierung und Untersuchung eigener Regelungsmodelle:

- Zwei Vollumrichter mit jeweils 15 kVA Nennleistung
- 1 x 3-adriger Anschluss, gekoppelter Gleich- und Umrichter, als Batteriesimulator verwendbar
- 1 x 4-adriger Anschluss, unsymmetrischer Betrieb, Nullsystemeinprägung
- Ansteuerung und Parametrierung über MAT-LAB/Simulink



30 kW GEKOPPELTER MASCHINENSATZ (ASYNCHRONMASCHINE UND SYNCHRONMASCHINE)

Gekoppelter Maschinensatz, bestehend aus Asynchron- und Synchronmaschine mit frei parametrierbarem Umrichter:

- 30 kW Anschlussleistung bei 1500 rpm nominaler Drehzahl und 150 Nm Nennmoment
- Synchronisierungseinheit zur Anbindung von externen Quellen an den Maschinensatzverbund
- Generatorischer und motorischer Betrieb möglich
- Ansteuerung mittels LabView und cRio-System



# Mechanische & Elektrotechnische Werkstatt



## KONTAKT MECHANISCHE WERKSTATT

### Kerstin Rach

Meisterin im Maschinenbaumechaniker-Handwerk,  
Werkstattleiterin und Ausbilderin  
✉ [k.rach@tu-braunschweig.de](mailto:k.rach@tu-braunschweig.de)  
☎ +49 531 391-7747

### Frank Haake

Feinmechaniker  
✉ [f.haake@tu-braunschweig.de](mailto:f.haake@tu-braunschweig.de)  
☎ +49 531 391-7507

### Julia Musebrink

Feinwerkmechanikerin Fachr. Maschinenbau, Staatl.  
gepr. Technikerin  
✉ [j.musebrink@tu-braunschweig.de](mailto:j.musebrink@tu-braunschweig.de)  
☎ +49 531 391-7507 / 7749

### Claas Narup

Industriemechaniker  
✉ [c.narup@tu-braunschweig.de](mailto:c.narup@tu-braunschweig.de)  
☎ +49 531 391-7507

### Matthis Grosche

Feinwerkmechaniker Fachr. Feinmechanik  
✉ [m.grosche@tu-braunschweig.de](mailto:m.grosche@tu-braunschweig.de)  
☎ +49 531 391-7507

## WEBSEITE

[https://www.tu-braunschweig.de/elenia/  
team/mechanische-werkstatt](https://www.tu-braunschweig.de/elenia/team/mechanische-werkstatt)



## KONTAKT ELEKTROTECHNISCHE WERKSTATT

### Christian Ryll

Werkstattleitung  
Staatl. gepr. Techniker  
✉ [c.ryll@tu-braunschweig.de](mailto:c.ryll@tu-braunschweig.de)  
☎ +49 531 391-7507 / 9731

### Henning Krüger

Elektroniker für Betriebstechnik  
✉ [h.krueger@tu-braunschweig.de](mailto:h.krueger@tu-braunschweig.de)

[https://www.tu-braunschweig.de/elenia/  
team/elektrische-werkstatt](https://www.tu-braunschweig.de/elenia/team/elektrische-werkstatt)



## Mechanische & Elektrotechnische Werkstatt

Die beiden Werkstätten des Elenia unterstützen die wissenschaftlichen Mitarbeitenden und Studierenden in der Anfertigung von Bauteilen und Anlagen für Lehre, Studien- und Abschlussarbeiten sowie Forschungsprojekten. In enger Zusammenarbeit mit den Mitarbeitenden/Studierenden werden Problemlösungen erarbeitet und auf die Umsetzbarkeit geprüft. Neben Drehmaschinen und CNC- Fräsmaschinen, zur spanenden Fertigung, stehen der mechanischen Werkstatt seit diesem Jahr mehrere 3D-Drucker (FDM/SLA) für die additive Fertigung zur Verfügung.



SLA 3D-Druck eines Adapters zur Montage von Drucksensoren



Fertigung eines Adapters aus VA zur Aufnahme von Kupfer-Schaltkontakten



CNC gefrästes Gehäuse für einen Messadapter



Fertigung einer Schaltgerätenachbildung



Montage eines 6kV Trenners und Anschluss durch Kupferschienen





Fertigung eines Schlüsselanhängers für den Zukunftstag



6KV Versorgung mit zwei Sicherheitskreisen und der Ansteuerung eines Draufschalters, eines Sicherheitstrenners, eines Erdungstrennschalters sowie eines Lasttrennschalters Projekt SMS2



Zählermessschrank zu Entwicklung von Messverfahren für Mehrfachnutzung von PV-Heimspeichersystemen bis 70kW Leistung Projekt MELANI



# IT-Abteilung des elenia



KONTAKT

**Fabian Scholz**

✉ f.scholz@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391 7753

**Lukas Oppermann**

✉ lukas.oppermann@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391 9712

WEBSEITE

<https://www.tu-braunschweig.de/elenia/team/it-administration>



AUFGABEN UND LEISTUNGEN

- Beschaffung, Wartung und Pflege der Server und Clients
- Bereitstellung von Arbeitsplätzen und Software
- Lizenzbeschaffung und -verwaltung
- Betreuung und Schulung von Mitarbeitenden und Studierenden (Service Desk)
- Analyse und Definition der IT-Systeme nach DSGVO
- Ständige Überwachung und Wartung der Instituts- und Forschungsnetzwerke
- Aufbau und Wartung spezieller projektbezogener IT-Systeme
- Administration von Instituts- und Projektwebseiten

# Die Informationstechnik im elenia

## Fortschritt der Digitalisierung im öffentlichen Bereich möglich?

### Erweiterung des Serverraums

In diesem Jahr haben wir das zentrale Element unserer IT-Infrastruktur umfangreich erweitert und auf den neuesten Stand gebracht. Ein neues 42HE Rack wurde installiert, um der wachsenden Anforderung an Speicher- und Verarbeitungskapazität gerecht zu werden. Veraltete Server wurden durch moderne Rack Server ersetzt. Dies beinhaltet nicht nur die Erneuerung der Hardware, sondern auch eine umfassende Datenmigration auf die neuen Systeme. Des Weiteren wurden zusätzliche Server beschafft und in Betrieb genommen, um den wachsenden Anforderungen des Instituts gerecht zu werden. Eine besondere Herausforderung stellte die Neustrukturierung der gesamten Verkabelung dar, die wir im Rahmen der Serverraumerweiterung vorgenommen haben. Dies gewährleistet höhere Effizienz und Zuverlässigkeit und legt das Fundament für kommende Erweiterungen.

### Elenia Intranet

Ein internes Kommunikationsnetzwerk wurde eingerichtet, um den Informationsaustausch innerhalb des Unternehmens zu optimieren. In den kommenden Jahren planen wir eine umfassende Erweiterung des Intranets, um die Digitalisierung von Organisations- und Verwaltungsprozessen gezielt voranzutreiben und so unsere internen Abläufe weiter zu optimieren.

### Migration der Homepage

Ein weiterer wichtiger Meilenstein dieses Jahres war die Migration und der Umzug unserer Homepage auf eine neue, leistungsstärkere Infrastruktur. Dies stellt sicher, dass wir auch weiterhin einen reibungslosen und schnellen Online-Zugang für unsere Mitarbeiter und Kunden gewährleisten können.

### Zusätzliche IT-Services

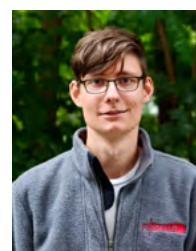
Im Auftrag der Gleichstellungsbeauftragten der Fakultät 5 wird derzeit ein maßgeschneidertes Ticketsystem entwickelt und soll im kommenden Jahr implementiert werden, um die Anforderungen, Anfragen und Verteilung der Aufgaben der Gleichstellungsbeauftragten effizient zu verwalten.

Im August 2022 wurde das Institut für Elektromagnetische Verträglichkeit durch die Einrichtung des Lehrstuhls für Mobile Elektrische Energiesysteme und die Berufung von Prof. Dr.-Ing. Michael Terörde erweitert. Im Zuge dessen übernahmen wir die IT-Dienstleistungen des neuen Lehrstuhls um deren Forschungs- und Entwicklungsarbeiten optimal zu unterstützen und eine neue Infrastruktur aufzubauen.

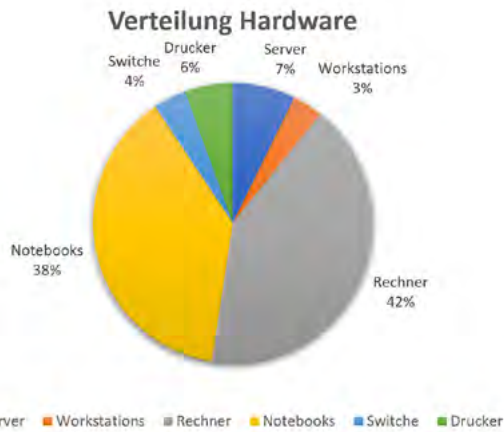
Mit Vorfreude und Engagement blicken wir in die Zukunft und werden in den nächsten Jahren weitere Innovationen und Verbesserungen realisieren.



Fabian Scholz  
IT-Leitung



Lukas Oppermann  
IT-Administration



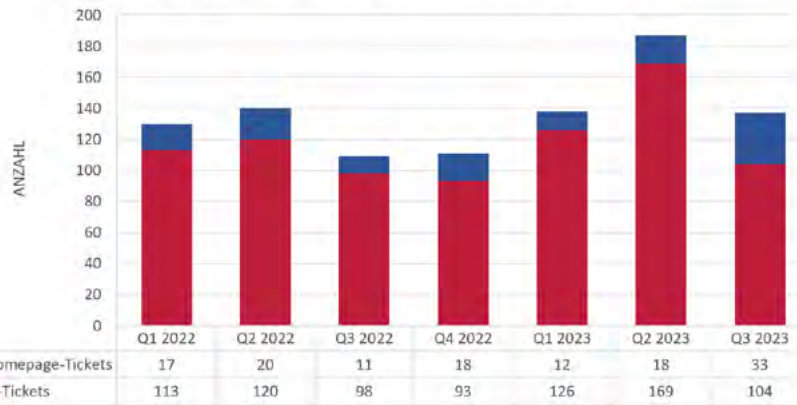
HARDWARE VERTEILUNG 2023  
(DATENERHEBUNG AM: 30.09.2023)

- 21 Serversysteme (Physisch und Virtuell, Windows und Linux)
- 120 Rechner
- 110 Notebooks
- 10 Leistungsstarke Workstations
- 18 Institutsdrucker
- 11 52-Port Switche (managed)

ERSTELLTE IT-SUPPORT TICKETS

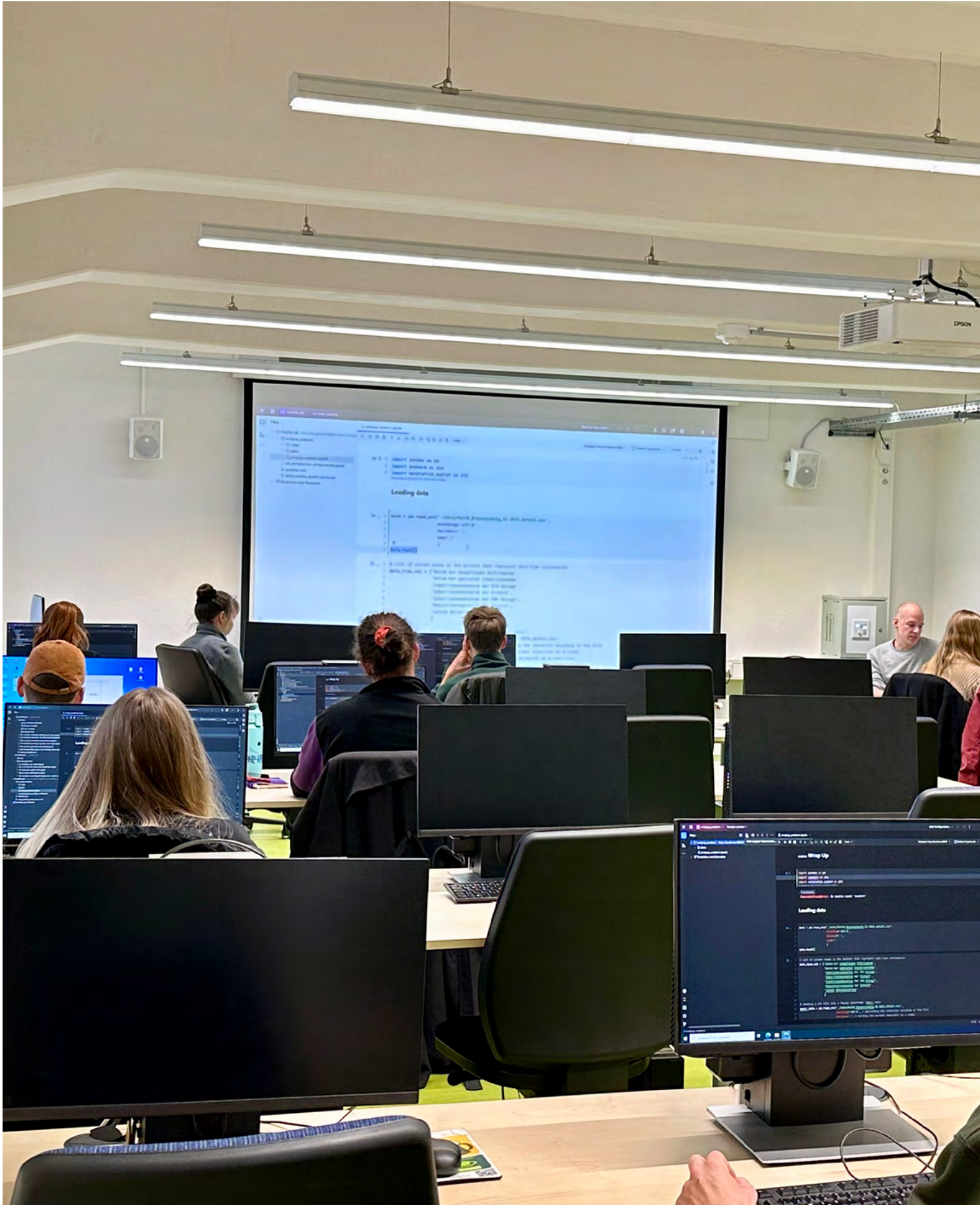
- Zeitraum: 01.01.2022 – 30.09.2023

ERSTELLTE IT-SUPPORT TICKETS



EINBLICK SERVERRAUM ELENIA

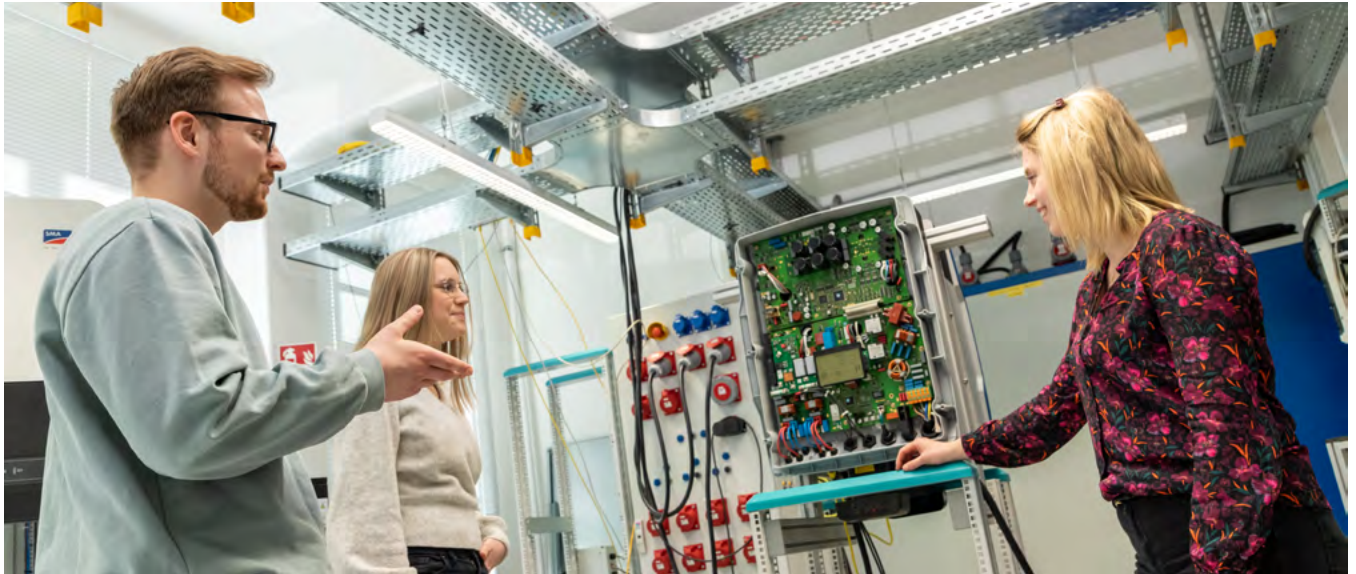
- Links: Erweiterung mit ersten neuen Servern
- Rechts: Bestand mit bereits ausgetauschten Geräten





# Lehre

Neuer Bachelorstudiengang NEEMO erfolgreich gestartet! .....	168
Lehrveranstaltungen .....	169
Studentische Arbeiten 2022 .....	173
Studentische Arbeiten 2023 .....	178



## Neuer Bachelorstudiengang NEEMO erfolgreich gestartet!

### NEEMO: Nachhaltige Energiesysteme und Elektromobilität

Das elenia Institut für Hochspannungstechnik und Energiesysteme forscht an energietechnischen Lösungen für die Welt von morgen. Vor diesem Hintergrund wurde in Zusammenarbeit mit der Fakultät und anderen Instituten ein neuer ingenieurwissenschaftlicher Bachelorstudiengang ins Leben gerufen.

Als interdisziplinärer Studiengang mit Schwerpunkt Elektrotechnik bereitet NEEMO die Studierenden auf die Gestaltung der Zukunft in den Bereichen Elektro-, Energie- und Fahrzeugtechnik vor. Während des Studiums lernen die Studierenden, wie ein nachhaltiges Energiesystem der Zukunft aussieht, wie sich das auf die Mobilität und die Stadtentwicklung auswirkt, und wie die Klimaneutralität in Deutschland bis zum Jahr 2045 erreicht werden kann.

#### Aufbau des Studiums

Der Aufbau des Studiengangs ist vielschichtig und umfasst verschiedene Schwerpunkte. Im ersten Studienjahr erlernen die Studierenden mathematische, physikalische, chemische und elektrotechnische Grundlagen. Außerdem werden im Studiengang NEEMO ab dem ersten Semester vertiefende Veranstaltungen zu nachhaltigen Ingenieurwissenschaften angeboten.

So erwerben die Studierenden zum Beispiel in der Vorlesung „Nachhaltige Energiesysteme“ bereits Kenntnisse über den Aufbau und die Funktionsweise verschiedener regenerativer Energieerzeugungsmöglichkeiten wie Photovoltaik- und Windkraftanlagen. In der Veranstaltung „Elektromobilität“ hingegen werden postfossile Antriebstechnologien gelehrt und wie dadurch eine saubere und nachhaltige Verkehrswende gelingen kann. Neben den verschiedenen Technologien auf Komponentenebene erlernen die Studierenden auch die sektorenübergreifende Systemmodellierung und gesamtheitliche Technikfolgenbewertung. Darüber hinaus werden erste vertiefende Fachkenntnisse in wählbaren Vertiefungen erworben sowie überfachliche Qualifikationen erlangt.

Verschiedene Laborpraktika in diversen Fachbereichen ermöglichen das in den Vorlesungen erlernte Wissen in spannenden Laborversuchen auch in der Praxis anzuwenden und zu festigen. Durch Exkursionen zu Forschungseinrichtungen und Betrieben der Umgebung, wie zum Beispiel zu dem Heizkraftwerk Mitte in Braunschweig, erhalten die Studierenden die Möglichkeit, über den Tellerrand zu schauen und sie können sehen, wie abstrakte Konzepte und Theorien in der Realität angewandt werden. Das Industriefachpraktikum im fünften Studiensemester bietet den Studierenden erste Einblicke in organisatorische und betriebliche Abläufe und Arbeitsmethoden, sowie eine optimale Vorbereitung für den späteren Übergang in das Berufsleben.

#### Exzellente Berufsaussichten

Die ingenieurwissenschaftliche Ausbildung in zukunftsweisenden Schlüsselbereichen wie Energie-, Wärme- und Verkehrswende bietet vielversprechende Berufsaussichten auf dem Weg zur Klimaneutralität in Deutschland. Neben dem Direkteinstieg in den Beruf bieten sich aufbauende Masterstudiengänge wie Elektrotechnik, Elektromobilität und Nachhaltige Energietechnik zur Vertiefung an.



# Lehrveranstaltungen

## Vorlesungen: Arbeitsgruppe Energietechnologien

Vorlesung	Inhalte	Dozent
<b>GSS – Aufbau und Berechnung von Gleichstromsystemen</b>	Berechnung und Auslegung von Gleichstromnetzen, Betrieb von Gleichstromnetzen, Fehlerdetektion und -ortung, Anlagentechnik, Komponenten zur Stromerzeugung, Verteilung und Speicherung, Industrienetze, Inselnetze, Bordnetze.	Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat
<b>Electric Power Systems Engineering</b>	Fundamental knowledge of power systems, Formulate research problems, Select adequate abstraction level, Use scientific theories and model concepts, Analyze social, economic and cultural consequences, Apply Systems Engineering for system design.	Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat, Dr.-Ing. Melanie Hoffmann
<b>Hochspannungstechnik I</b>	Hochspannungsnetze, Überspannungen, Isoliersysteme, Gasentladungen, Isolierstoffe, Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung.	Dr.-Ing. Michael Hilbert
<b>Aufbau und Funktion von Speichersystemen</b>	Ladeinfrastruktur, Speicherkenngrößen, Systemauslegung, Speichertechnologien, Doppelschichtkondensator, Energiespeicherung in Form von Wasserstoff, Aufbau und Funktionsweise von Lithium-Ionen-Batteriespeichern, Batteriealterung und -diagnostik.	Dr.-Ing. Frank Lienesch
<b>Elektrische Energieanlagen II</b>	Thermische und mechanische Belastbarkeit von Betriebsmitteln, Verhalten der Netzspannung nach der Unterbrechung des Stromflusses und die Auswirkung auf die Schaltstrecke, Aufbau von verschiedenen Schaltgeräten und Sicherungen der unterschiedlichen Spannungen.	Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat
<b>High Voltage Direct Current Transmission Technology</b>	Introduction to HVDC transmission systems, Operation of LCC and VSC based HVDC systems, Main components of HVDC converter stations, Interaction between AC and DC systems, Basic principles of modeling, analysis and control of dynamic systems.	Dr.-Ing. Nasser Hemdan, Dr.-Ing. Melanie Hoffmann
<b>High-Voltage Test- and Measurement Systems</b>	Fundamental Knowledge of High-Voltage and High-Current Tests, Fundamental Analysis of High-Voltage and High-Current Test and Measurement Circuits, Quality Assessment, Evaluation and Documentation of Test Performance for High-Voltage Components.	Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat
<b>Hochspannungstechnik II</b>	Einführung, Grundlagen der Hochstrom- und Hochspannungsprüftechnik, Qualitätssicherung und Messunsicherheitsbestimmung, Erzeugung und Messung hoher Gleich-, Wechsel- und Impulsspannungen.	Dr.-Ing. Johann Meisner
<b>Numerische Berechnungsverfahren</b>	Grundlagen zur numerischen Lösung von linearen Gleichungssystemen, DGL 1. Ordnung (Anfangswertprobleme), Partielle DGL (Finite-Differenzen-Methode), Rechnerübungen LT-Spice.	Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat

Vorlesung	Inhalte	Dozent
Technologien der Übertragungsnetze	Grundlagen der Übertragungsnetze: Struktur, Komponenten, Entwicklungen, Betriebsweisen, Herausforderungen; Berechnung von Übertragungsnetzen mit Ersatzschaltbildern: Freileitungen, Kabel, Synchrongeneratoren, Transformatoren, Kompensationselemente; Grundsätzliche Technologien der Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ).	Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat, Dr.-Ing. Christian Schulz

## Vorlesungen: Arbeitsgruppe Energiesysteme

Vorlesung	Inhalte	Dozent
Elektrische Grundlagen der Energietechnik für das Verkehrs- und Umweltingenieurwesen	Grundlagen der elektrischen Energieversorgung. Komplexe Wechselstromrechnung und ihre Anwendung in Drehstromsystemen und Netzbetriebsmitteln. Themen der elektrischen Sicherheit.	Prof. Dr.-Ing. Michael Terörde, Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel, Prof. Dr.-Ing. Markus Henke
Energiewirtschaft und Marktintegration erneuerbarer Energien	Vermittlung der Marktrollen und Akteure in der Energiewirtschaft. Grundlagen des Energiehandels (Märkte, Netze etc.), sowie Mechanismen für die Integration von erneuerbaren Energien in die Strommärkte.	Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel
Innovative Energiesysteme	Entwicklung der Energieversorgung und Klimaziele, Innovationen konventioneller Kraftwerke, Regenerative Energieformen, Power-to-X sowie Sektorenkopplungen (Verkehr, Wärme, Gas), Speichersysteme, Wasserstoffnutzung, Inselnetze, Prosumer-Haushalte.	Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel, Dr.-Ing. Jonas Wussow
Grundlagen der elektrischen Energietechnik (Teil 1)	Einführung in die Grundlagen der elektrischen Energieübertragung und -verteilung. Grundlagen und Berechnung von Drehstromsystemen, Transformatoren und Synchrongeneratoren.	Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel, Prof. Dr.-Ing. Markus Henke, Prof. Dr.-Ing. Regine Mallwitz
Elektrische Anlagen und Netze	Einführung in die elektrische Energieversorgung, elektrische Betriebsmittel wie Synchronmaschinen, Leistungsfluss- und symmetrische wie unsymmetrische Kurzschlussrechnungen, Stabilität, Sternpunktbehandlung, Schutzmaßnahmen.	Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel
Regelung in der elektrischen Energieversorgung	Einführung in die Netzregelung, Übertragung elektrischer Energie, Dynamisches Verhalten sowie Frequenz- und Spannungsregelung von Synchrongeneratoren in Kraftwerken, Übergeordnete Regelung von Stromnetzen, Regelung von DC-Systemen, Umrichtertechnik, netzfolgende und netzbildende Stromrichterregelungen.	Dr.-Ing. Stefan Laudahn
Elektrische Ausrüstung von Schienenfahrzeugen	Elektrische Traktion, Bremsen, Hilfsbetriebe, Signal- und Sicherungssysteme, Leittechnik auf Schienenfahrzeugen, Fahrgastinformation und Multimedia, Ausgeführte Fahrzeuge, Zukünftige Entwicklungen.	Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel

Vorlesung	Inhalte	Dozent
<b>Elektrische Bahnen</b>	Wiederholung der relevanten Grundlagen der Elektrotechnik, Einführung in Schienenfahrzeugtechnik, Überblick Elektrische Bussysteme, Bahnstromsysteme national und international, DC und AC, Antriebe für elektrische Bahnen, Bremsen, Hilfsbetriebe, Signal- und Sicherungssysteme, Ausgeführte Fahrzeuge, Zukünftige Entwicklungen: Brennstoffzelle, Berührungslose Energieübertragung, Elektrische Straßenbussysteme (Oberleitungsbus, Batteriebus mit induktiver/konduktiver Ladung), BEMU und seine Ladeinfrastruktur.	Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel
<b>Systemtechnik in der Photovoltaik</b>	Systemtechnische Betrachtung von photovoltaischen Erzeugungsanlagen: Anlagenkonfigurationen, Wechselrichtertopologien und technische Funktionsweise selbstgeführter Wechselrichter. Herausforderungen bei der Netzintegration von PV-Anlagen. Analyse von Inselnetzsystemen sowie netzgekoppelten PV-Anlagen mit Speicher.	Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel
<b>Regenerative Energietechnik</b>	Grundlagen des Aufbaus des deutschen und europäischen Stromversorgungssystems und deren Komponenten, wie zum Beispiel Freileitungen, Kabel und Transformatoren, Technische Grundlagen des Netzbetriebes durch Netzbetreiber und deren Umgang mit Systemdienstleistungen.	Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel
<b>Technologien der Verteilungsnetze</b>	Rolle der Verteilungsnetze in der Energieversorgung, Netzstrukturen, Betriebsmittel (Kabel, Freileitungen, Transformatoren, Schaltanlagen), Schutzkonzepte, Systemdienstleistungen, Netzentgelte, Zukünftige Entwicklungen im Verteilungsnetz (Smart + X).	Dr.-Ing. Johannes Schmiesing
<b>Nachhaltige Energiesysteme</b>	Großkraftwerke, Solartechnik, Offshore-Windparks, Wasserkraft, Geothermie, Biomasse, Wasserstoff, Energieverteilung, Systems Engineering, Industrie 4.0, DC-Industrie, Netzintegration Erneuerbarer Energien, E-Mobilität, Batteriespeicher, Sektorenkopplung.	Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat, Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel

## Seminare: Für Studierende

Seminar	Inhalte	Dozent
<b>Studienseminar Elektrische Energiesysteme</b>	Vortragsreihen und Präsentationstraining zu energietechnischen und energiewirtschaftlichen Themen.	Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat, Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel
<b>Technikfolgenbewertung</b>	Die Energie- und Mobilitätswende bieten große Potentiale zur Begrenzung des Klimawandels. Wie lassen sich die Chancen der neuen Technologien so einsetzen, dass die gesellschaftlichen Probleme bewältigt werden können, ohne erhebliche Risiken und Nebenwirkungen zu verursachen. Hierzu werden Technikfolgenbewertungen ausgearbeitet und präsentiert.	Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat, Prof. Dr.-Ing. Michael Terörde, Prof. Dr.-Ing. Markus Henke, Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel

## Seminare: Für Doktoranden

Seminar	Inhalte	Dozent
Hochspannungstechnik für Doktoranden	Systemdenken kennen und verstehen, Verständnis der Systemtheorie, Nachhaltige Energiesysteme.	Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat, Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel

## Praktika

Praktikum	Inhalte	Dozent
Analyse, Simulation und Planung von Netzen	Einführung in die Netzmodellierung und -berechnung mit DigSILENT PowerFactory, Einführung in Datenverarbeitung und -modellierung mit Python, Anwendung von Python in der Energiesystemmodellierung und -analyse.	Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel
Innovative Energiesysteme	Ziel dieses Kurses ist es, einen kompakten Einblick in Energiesysteme zu vermitteln, die maßgeblich zur Energiewende in Prosumerhaushalten beitragen. Im Fokus stehen Schlüsselkomponenten wie Photovoltaikzellen, PV-Wechselrichter, Inselnetzsysteme, Wärmepumpen und Energiemanagement.	Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel
Elektromobilität	Batteriediagnostik, Elektrodenherstellung, Elektrodenpackaging, Leistungselektronik und elektrische Maschinen, Antriebsstrangsimulation.	Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat, Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel
Hochspannungstechnik	Hochspannungsmesstechnik, Isolierstofftechnik, Erzeugung hoher Gleich- und Wechselspannung, Blitzstoßspannung, Durchschlaguntersuchungen, Einsatz von Augmented Reality und Ausschaltuntersuchungen von Leistungsschalter.	Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat
elektrotechnisches Laborpraktikum Vertiefung Batterietechnologien (eLVBatt)	Impedanzspektroskopie für instabile Zustände, Druckverteilung in LIB, Oberflächenanalytik von Elektroden, Explosionsversuche mit LIB, Simulation und Modellierung von Batterien.	Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat

# Studentische Arbeiten 2022

## Studienarbeiten

Autor*in	Titel der Arbeit
Filipe Budnik	Entwicklung einer Simulationsumgebung für das Testing von Fallback-Strategien innerhalb eines aktiven Blindleistungsmanagements
Dirk Wilhelm Franke-Hameke	Recherche und Bewertung unterschiedlicher Ansätze und aktueller Projekte zum Bidirektionalen Laden
Caroline Hampe	Modellierung relevanter Einflussparameter auf den zukünftigen Nettostromverbrauch in Deutschland 2030
Niklas Hardebusch	Entwicklung eines Optimierungsmodells zur Deckung des Bedarfs an Systemdienstleistungen durch Angebote aus Prosumer-Haushalten
Eric Krupp	Ermittlung möglicher zukünftiger Ladetechnologieszenarien für eine flächendeckende Ladeinfrastruktur von batterieelektrischen Heavy Duty-Fahrzeugen
Nils Reinköster	Ökologische Bewertung von Neubaumaßnahmen im deutschen Stromnetz
Victor Schnell	Recherche, Konzeptionierung und Bewertung von Strategien zur Bereitstellung von Systemdienstleistungen durch Prosumer in der Niederspannung
Birte Sönnichsen	Techno-ökonomische Analyse von Wasserstoffimporten vor dem Hintergrund der deutschen Klimaziele im Jahr 2045
Kim Maria Tigelaar	Entwicklung von Betriebsstrategien für HEMS zur Bereitstellung dezentraler Frequenzhaltung durch Haushalte
Zhaoxian Ye	Konzepte für den Supraleitereinsatz in der Luftfahrt
Amelie Zech	Flexibilisierung moderner Verbraucherkomponenten von Prosumern für eine netzdienliche Betriebsweise

## Bachelorarbeiten

Autor*in	Titel der Arbeit
Alexandra Aumüller	Teilentladungsmessungen und dielektrische Untersuchungen an additiv gefertigten Isolierstoffproben
Julika Dertnig	Konzeptionierung und Umsetzung einer teilautomatisierten Lastflussberechnung für Niederspannungsnetze der Avacon zur Bewertung der Integration von Ladepunkten
Lisa Ermer	Entwicklung eines dynamischen Modells zur Analyse des Potenzials der Bereitstellung von Momentanreserve aus Elektrolyseuren

Autor*in	Titel der Arbeit
<b>Mats Göhrmann</b>	Untersuchung von Oberschwingungen durch Laden von Elektrofahrzeugen im Industrienetz und deren Auswirkungen oberhalb der 50. Ordnung
<b>Nils Hartau</b>	Recherche und Vergleich unterschiedlicher Ansätze für die Batteriealterung durch bidirektionales Laden
<b>Sophie Herbeck</b>	Spannungshaltung in Verteilungsnetzen mit Sensitivitäten
<b>Marius Hinz</b>	Anforderungsanalyse für Untersuchungen von Hochtemperatur-Supraleiter im elektrischen Fliegen
<b>Tobias Jesberger</b>	Untersuchung des Einflusses äußerer Feldsteuerringe auf die elektrische Festigkeit von Vakuum-Leistungsschaltern
<b>Firas Jmili</b>	Technische Einsatzmöglichkeiten von Heimspeichern zur Verbesserung der Spannungsqualität (Unsymmetrie) durch lokale Spannungshaltung
<b>Simon Löbel</b>	Labortechnische Untersuchung des phasenscharfen Ladens von Elektrofahrzeugen zur Reduzierung von Unsymmetrie im Niederspannungsnetz
<b>Ingtyas Megahayu</b>	Offshore Transformer Design through Dynamic Loading
<b>Lukas Meuer</b>	Ermittlung und Vergleich der Betriebscharakteristik eines Batteriespeichersystems
<b>Corvin Nothdurft</b>	Messtechnische Untersuchung von entstehenden Wechselwirkungen bezüglich Oberschwingungen zwischen Elektrofahrzeugen und dem Industrienetz
<b>Marlene Pape</b>	Vorhersage des Blindleistungsverhaltens in elektrischen Energiesystemen unter Anwendung eines maschinell lernenden Prognoseverfahrens
<b>Sebastian Prien</b>	Statistische Untersuchung der Entwicklung energietechnischer Anlagen von Prosumern bis zum Jahr 2030 und Analyse der Auswirkungen auf die Niederspannungsnetze
<b>Röthig Thomas</b>	Untersuchung der Abhängigkeit der Ausbildung der Wiederkehrspannung in einer LVDC Modellanordnung von der Lichtbogen-Abbildung mittels Hochgeschwindigkeitskamera

## Masterarbeiten

Autor*in	Titel der Arbeit
<b>Jonas Biniek</b>	Untersuchung des Temperaturverhaltens von Lithium-Ionen-Pouch-Zellen bei Schnellladeversuchen mittels thermischen Ersatzschaltbild-Modellen
<b>Paul Broschinski</b>	Implementation und simulative Auswertung der Synergien der Mehrfachnutzung von häuslichen Batteriespeichern
<b>Lei Chen</b>	Kommunikation von Heimspeichern in PowerFactory zur Unsymmetrieminderung durch koordinierte Betriebsstrategien
<b>Miguel Dorantes Ledesma</b>	Untersuchung der Auswirkungen von Kommunikationsunterbrechungen auf die ÜNB-VNB-Schnittstelle in elektrischen Energieversorgungsnetzen

Autor*in	Titel der Arbeit
<b>Levente Egyházi</b>	Entwicklung einer Methodik zur ökonomischen Bewertung zukünftiger Agri-Photovoltaik-Projekte im Kontext wechselnder Hauptkulturen
<b>Julien Essers</b>	Entwicklung einer Plattform zur realitätsnahen Erprobung von Energiemanagement-Systemen in Prosumer-Haushalten und Mehrfamilienhäusern
<b>Johann Fetkötter</b>	Optimierung der Gesteungskosten für Power-to-X-Produkte in Python
<b>Gerrit Fröhlich</b>	Möglichkeiten zur Optimierung der Netzintegration von Ladeeinrichtungen zur Erhöhung des Anschlusspotentials in Mittelspannungsnetzen
<b>Sophia Giere</b>	Analyse und Vergleich der Möglichkeiten zur Umsetzung von alternativen Antrieben im Busbetrieb
<b>Johanna Grobler</b>	Erstellung eines Gesamtkonzepts zum Laden von Elektrofahrzeugen aus dezentraler und zentraler Erneuerbarer Energie
<b>Yifan Gu</b>	Vergleich der Messgeräte zur Charakterisierung von Permittivität und Verlustfaktor und Erstellung einer Auswertungsroutine zu deren Darstellung
<b>Benjamin Hoppe</b>	Konzeptentwicklung für die Nutzung von Photovoltaikanlagen im Nahbereich von Bahnschienen im deutschen Schienennetz
<b>Markus Klages</b>	Normative, simulative und wirtschaftliche Analyse zu Einsatzmöglichkeiten von privaten Heimspeichern zur Verbesserung der Unsymmetrie
<b>Alexandra Klinger</b>	Ermittlung von Lastgangs-Zeitreihen für unterschiedliche Ladekonzepte beim Depotladen von batteriebetriebenen leichten Nutzfahrzeugen
<b>Jasper Klinkig</b>	Konzeptionierung und Auswertung der Verteilung von externen Steuerungssignalen durch häusliche Energiemanagementsysteme
<b>Julius Kohlhepp</b>	Implementierung und simulative Auswertung eines Engpassmanagements mit flexiblen Prosumer-Anlagen in der Niederspannungsebene
<b>Felix Korff</b>	Entwicklung einer technoökonomischen Methodik zur Abschätzung von Wirkleistungsverlusten in Wind- und PV-Parks bei der Bereitstellung von Blindleistung
<b>Hendrik Kösjan</b>	Untersuchung von Methoden zur Reduzierung der Unsymmetrie im Niederspannungsnetz mit Fokus auf phasenscharfes Laden von Elektrofahrzeugen
<b>Ilja-Pascal Krecker</b>	Implementierung von elektrochemischer Impedanzspektroskopie in die Hardware des Zell-Controllers eines automotive Batteriesystems
<b>Karsten Laaken</b>	Implementierung einer Strombegrenzung von netzbildenden Wechselrichtern für unsymmetrische Netzfehlersituationen
<b>Jannes Langemann</b>	Metrologische Charakterisierung der Auswirkungen von Ladeeinrichtungen für Elektrofahrzeuge auf die Netzanschlusspunkte und die Messtechnik
<b>Jiao Li</b>	Untersuchung des Nachstromverhaltens einer Vakuumschaltkammer bei Hochstromausschaltungen mittels Methodik der statistischen Versuchsplanung

Autor*in	Titel der Arbeit
<b>Lennard Meinecke</b>	Modellierung und simulative Auswertung der Regelung innovativer Netzbetriebsmittel zum Einsatz in der Spannungshaltung
<b>Katja Metzler</b>	Untersuchung von Maßnahmen zur netzdienlichen und verursachergerechten Allokation zukünftiger Stromsystemkosten für PV-Eigenstromsysteme
<b>Kai Neumann</b>	Untersuchung der Einflussgrößen einer Serienschaltung im Vakuum
<b>Jannik Pohl</b>	Untersuchung der Plasmaleitfähigkeit in einer Modellfunkenstrecke im Zeitbereich der wiederkehrenden Spannung
<b>Daniel Rausch</b>	Modellierung, Analyse und Bewertung wasserstoffbetriebener Landmaschinen in der Feldbewirtschaftung
<b>Andre Rehbock</b>	Simulationen und Laboruntersuchung einer Spannungs- und Unsymmetrieregung für einphasige Batteriewechselrichter
<b>Nelly Schulz</b>	Entwicklung eines elektrischen Elektrolyseurmodells einschließlich dynamischer Leistungsregelung zur Bereitstellung von frequenzstabilisierenden Maßnahmen
<b>Buri Sen</b>	Wirtschaftliche und technische Bewertung des Einsatzes von dezentralen Batteriespeichersystemen für Ladeinfrastrukturen
<b>Mike Stefan Skroch</b>	Erstellung typischer Fahrprofile von Kraftfahrzeugen und Hot-Spot-Analyse von Ladepunkten und -zeiten auf Basis empirischer Daten
<b>Benedikt Skurk</b>	Analyse, simulative Umsetzung und systematischer Vergleich von Konzepten zur Spannungshaltung mit Wechselrichter-basierten Anlagen in der Niederspannungsebene
<b>Lei Song</b>	Experimentelle Untersuchung des Vakuumbogens bei Parametervariation
<b>Peirui Song</b>	Untersuchung des Einflusses verschiedener Komponenten auf die Effektivität der Inselnetzerkennung mit strom- und spannungseinprägenden Umrichtern
<b>Lia Stücke</b>	Entwicklung und Validierung von Lösungsstrategien für die Behandlung von Fehlmessungen bei Distanzschutzsystemen
<b>Jaruwan Suisuwan</b>	Entwicklung eines Modells zur optimalen Dimensionierung energietechnischer Komponenten für Wohngebäude
<b>Marten Thomes</b>	Validierung eines semiempirischen Modells zur Beschreibung der Wiederkehrspannung einer gekapselten Modellanordnung nach Strombelastungen im Betriebsbereich eines LVDC-Hybridschalters
<b>Laura Tiedemann</b>	Teilentladungsuntersuchungen an Lackdrähten zur Einflusserkennung von verschiedenen Isoliermedien
<b>Rui Wang</b>	Optimierung und Validierung eines Spannungsqualitätsreglers (UPQC) insbesondere Betrachtung kritischer Anwendungsfälle
<b>Yang Wang</b>	Optimierung und Validierung eines Spannungsqualitätsreglers (UPQC) und Transformationsmöglichkeiten in andere Komponenten



Autor*in	Titel der Arbeit
<b>Emil Weymann</b>	Entwicklung und Erprobung der Kommunikationsinfrastruktur für ein induktives Ladesystem für Elektrofahrzeuge
<b>Till Zeumer</b>	Untersuchung und Entwicklung von DC-Schutzkonzepten für Bordnetze in elektrischen Flugzeugen unter Anwendung des Model-Based Systems Engineering
<b>Yusheng Zhou</b>	Regelung im Niederspannungsverteilnetz mit Fokus auf Ladeinfrastruktur
<b>Shaojie Zhu</b>	Implementierung eines Spannungsqualitätsreglers in Form eines Simulinkmodells auf Wechselrichterhardware zur Erstellung eines Prototypens
<b>Maximilian Zirkler</b>	Analyse, simulative Umsetzung und systematischer Vergleich von Konzepten zur Spannungshaltung mit wechselrichter-basierten Anlagen in der Niederspannungsebene

# Studentische Arbeiten 2023

## Studienarbeiten

Autor*in	Titel der Arbeit
Paulina Bilic	Preisbasierte Modellierung des Regelleistungsmarktes zur Untersuchung von innovativen Gebotsstrategien
Thea Böttcher	Regionalisierte Verbrauchsprognose des zukünftigen Stromverbrauchs der Industrie in Deutschland 2030
Ayscha El Menuawy	Aktueller Stand und zukünftige Trends für alternative Antriebssysteme in der Feldbewirtschaftung
Gerrit Everwin	Analyse der Datenqualität und -abweichungen des EnergieMonitor als digitale Lösung zur regionalen Strombilanz
Merle Ferk	Konzeptionierung, simulative Umsetzung und Auswertung der Frequenzhaltung durch Prosumer in Niederspannungsnetzen
Janina Gottschalk	Untersuchung der chemischen Reaktivität verschiedener Metalloxalate in Lithium-Ionen-Batterien
Henning König	Ökonomische Analyse von teileinspeisenden Erneuerbaren Energien in Landwirtschaftsbetrieben
Klaas Koring	Analyse des Potentials von Elektrolyseuren zur Deckung des zukünftigen Momentanreservebedarfs
Leon Küchler-Völkel	Analyse und Konzeptionierung der Aggregation von Kleinstanlagen in Prosumer-Haushalten für netzdienliche Funktionen
Rasmus Offt	Energiewirtschaftliche Potenziale von Speicherkraftwerken vor dem Hintergrund der Regelleistungsbereitstellung
Aicha Platzdasch	Untersuchung von maschinell lernenden Modellen zur Zeitreihenvorhersage in elektrischen Energiesystemen
Lara Prüßmeier	Potenzialanalyse von halböffentlichen Laden in Braunschweig
Eike Schwarz	Entwicklung einer Methodik zur Potentialabschätzung für Dach-Photovoltaikanlagen auf Gebäuden von Landwirtschaftsbetrieben
Thorben Wehmeier	Entwicklung einer Methodik zur Potentialabschätzung von abfallverwertenden Biogasanlagen in landwirtschaftlich geprägten Regionen

## Bachelorarbeiten

Autor*in	Titel der Arbeit
Ibtissam Bel Khattar	Analyse und Bewertung von netzorientierten Ladekonzepten für Elektrofahrzeuge
Steffen Bollhorn	Entwurf und Anwendung eines Datenvorverarbeitungsprozesses für maschinell lernende Prognoseverfahren
Selim Dimassi	Concept study and planning of a test park for different solar generation and regenerative transformation systems in Tunisia

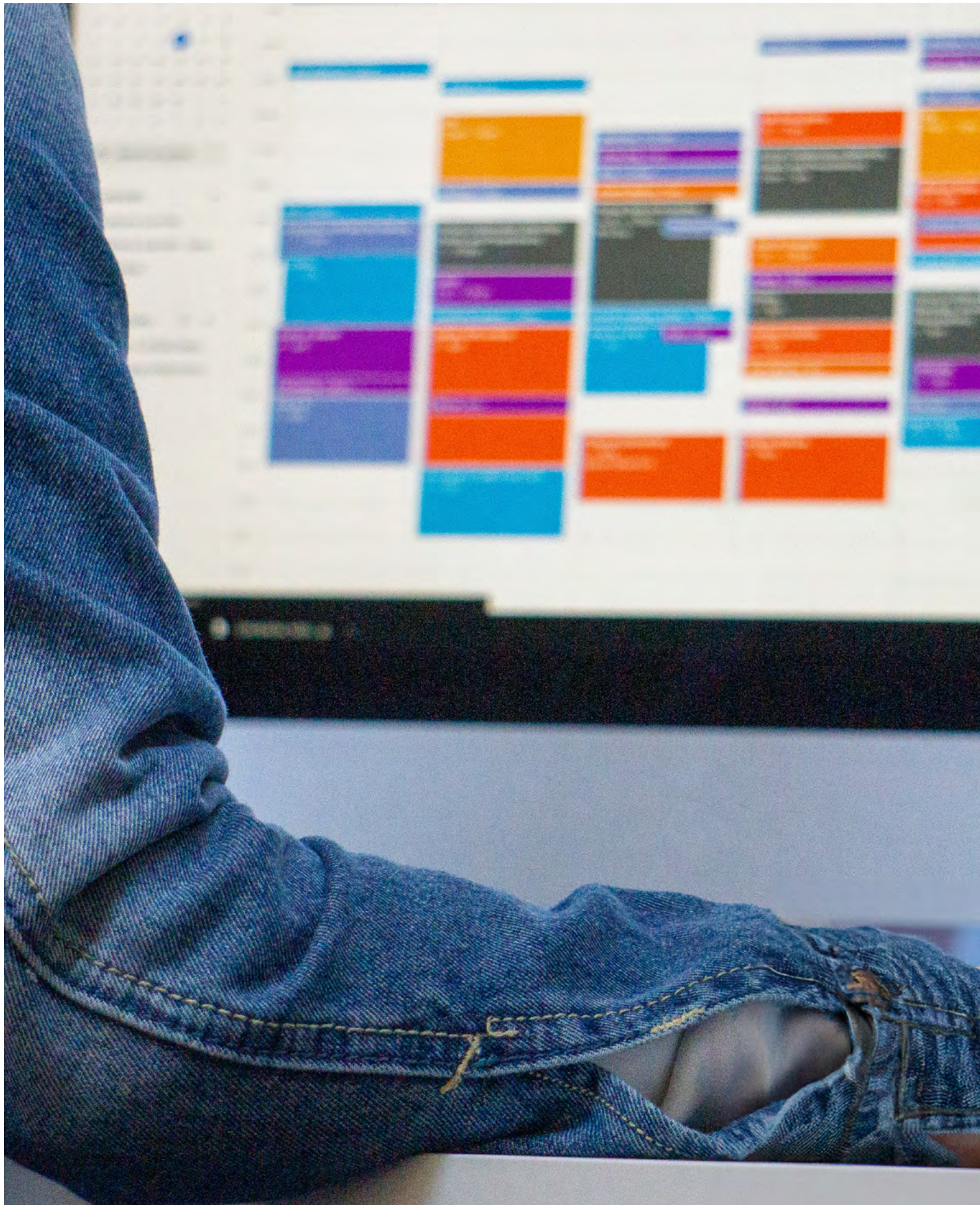
Autor*in	Titel der Arbeit
Claas Ebert	Auswertung, Analyse und Bewertung landwirtschaftlicher Stromverbräuche im Kontext der Energiewende
Stefan Hofmann	Analyse, Modellierung und Transformation der Energieversorgung von Beregnungsanlagen in der Landwirtschaft im Rahmen der Energiewende
Hannes Kurzmann	Aufbau einer Planungshilfe zur Identifikation von mittel- und langfristigen Netzausbaumaßnahmen in der Niederspannung
Michelle Leopold	Analyse und Bewertung des Status quo und der Entwicklungsmöglichkeiten von Biogasanlagen in der deutschen Landwirtschaft
Samar Ouadhani	Systematic specification of new residential energy management control strategies
Emma Pensky	Analyse der Auswirkungen von unterschiedlichen Energiebeschaffungsmodellen und unterschiedlicher Topologien auf den Einsatz von Bidirektionalem Laden
Mika Radler	Modellierung des Stromverbrauchs im GHD- und Haushaltssektor unter Beachtung von Effizienzsteigerungen in Deutschland bis 2030
Anthea Rieseberg	Automatisierung einer Auswertung & Analyse von Messdaten aus einem Feldtest mit Elektrofahrzeugen
Nils Rosebrock	Aufbau einer Teilentladungsmessung
Johannes Rothert	Entwicklung eines Kommunikationskonzeptes für verteiltes Energiemanagement unter Verwendung der Smart-Meter-Infrastruktur in Deutschland
Hannah Schröder	Stakeholderanalyse zum Ausbau von Ladeinfrastruktur
Kai Schulze	Simulative Auswertung des netzdienlichen Flexibilitätseinsatzes für höhere Spannungsebenen
Alexander Wedemann	Analyse und Diskussion von Anreizen und Richtlinien zur Unsymmetrieverbesserung durch (Heim-)Batteriespeicher
Laura Zalewski	Auswertung von Ladeinfrastrukturoptionen für Batterieelektrische Triebzüge am Beispiel Goslar und Bad Harzburg

## Masterarbeiten

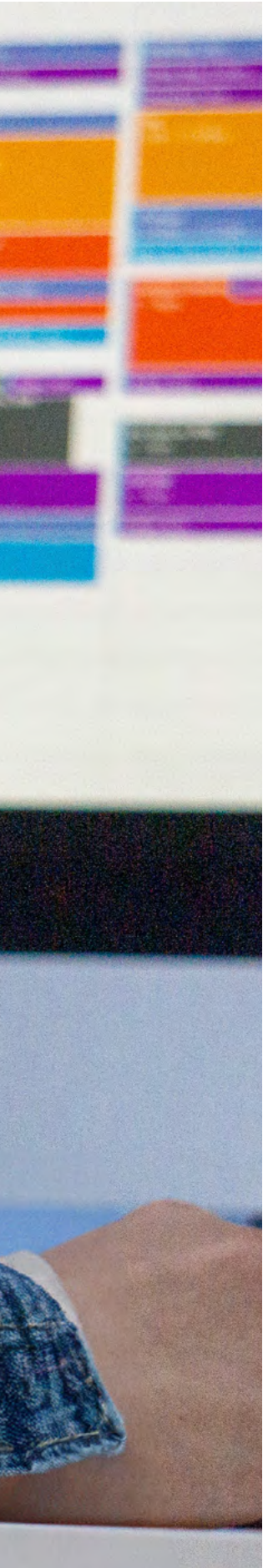
Autor*in	Titel der Arbeit
Faraj Abd Alraheem	Untersuchung und Bewertung des Metaldampfbogens eines Vakuumschalters mit unterschiedlichen TMF-Kontakten
Leonie Maria Brümmer	Entwicklung eines thermischen Gebäudemodells mit Implementierung in Python zur Analyse von Energieeffizienz und Wärmebedarf unter Berücksichtigung der Bestandsgebäude in Deutschland
Eray Cinkaya	Analyse und Implementierung von Grid-Forming-Konzepten für HGÜ-Systeme
Yannic Cullmann	Laboruntersuchung einer Spannungshaltungs- und Unsymmetrieregulierung für ein-, zwei- und dreiphasige Batteriewechselrichtersysteme
Felten Feldt	Simulation Studies needed for Planning and Specification of Offshore Wind HVDC Interconnectors
Merle Ferk	Konzeptionierung, modellbasierte Implementierung und simulative Auswertung der anwendungsorientierten Mehrfachnutzung von häuslichen Batteriespeichersystemen
Keno Giesselmann	Bewertung netzdienlicher und netzstützender Ladeansätze für Elektrofahrzeuge anhand von Messdaten eines kommerziellen Fuhrparks

Autor*in	Titel der Arbeit
Nils Hendrik Grafelmann	Entwicklung eines Versuchsaufbaus und Durchführung von Ausschaltversuchen an Cutout Hochspannungssicherungen
Caroline Hampe	Entwicklung von Betreibermodellen für deutsche EE-Gemeinschaften im Spannungsfeld Ökonomie, Umwelt und Soziales
Niklas Hardebusch	Analyse der Leistungsfähigkeit von Online und Offline Algorithmen für Energiemanagement in Prosumer-Haushalten
Ahmed Hassanin	Weiterentwicklung eines Modells zur optimalen Dimensionierung energietechnischer Komponenten für Wohngebäude
Zhuoyao Huang	Entwicklung nachhaltiger Ladestrategien für Elektrofahrzeuge zur Integration in das Betriebskonzept eines Home-Energiemanagementsystems
Jan Philip Jäger	Untersuchung, Umsetzung und Bewertung verschiedener Klassifikationsalgorithmen für den LVDC-Selektivschutz
Maximilian Jantos	Detaillierte technische Beschreibung und Normierungsmöglichkeiten von Anlagen für ein exponentielles Wachstum der EE-Erzeugung, lokale Nutzung und Erzeugung von grünem Wasserstoff für Länder in Nordafrika
Anouar Jemai	Development of a testing-tool for communication scenarios in prosumer energy management systems
Tim Joswig	Entwicklung und Integration einer Ladestrategie für eine Flotte auf Basis lokaler Erneuerbarer Energie in einem Energiemanagementsystem
Henning König	Entwurf und ökonomische Analyse von Geschäftsmodellen für Windenergieanlagen zur Wasserstoffherstellung und -rückverstromung
Eric Krupp	Entwicklung und Bewertung von unterschiedliche abstrahierten AEM-Elektrolyseurmodellen für dynamische Netzstabilitätsuntersuchungen
Jianuo Li	Integration unterschiedlicher Modelle zur Energieerzeugung zur Simulation von Ladestrategien auf Basis der Erneuerbaren Erzeugung“
Sebastian Lindemann	Untersuchung von Verstärkungs- und Kompensationseffekten hinsichtlich Oberschwingungen durch Einbindung von Elektrofahrzeugen in ein vorhandenes Industrienetz
Yasmin Loeper	Konzeptionierung der möglichen Teilnahme von volatilen Erzeugern an Regelleistungs- und Regelenergiemärkten
Linus von Loh	Anforderungsdefinition und Systemkonzeption eines DC-Systems im Projekt Netflexum mithilfe von MBSE
Adrian Lux	Untersuchung und Bewertung der Integration von Notstromanlagen in ein Industrienetz mit inkludiertem Gas- und Dampfkraftwerk im Kontext eines Blackout-Szenarios
Edgar Martins Pires	Detailed technical description of concepts for exponential growth of RE generation and transformation of energy into tradable products for countries in North Africa
Mattias Meinert	Entwicklung eines Optimierungsmodells zur Steuerung von Ladevorgängen von Elektrofahrzeugen in Quartieren
Marleen Möller	Gemeinschaftliche Energienutzung: lokale Energiemärkte und P2P-Handel
Duc Anh Nguyen	Entwicklung eines dynamischen Batteriespeichermodells für transiente Netzstabilitätsuntersuchungen
Friederike Paul	Explorative Datenanalyse von spannungsebenen- und netzbetreiberübergreifenden Datensätzen

Autor*in	Titel der Arbeit
Zhiyan Peng	Methodenentwicklung zur Zustandsbestimmung kontaminierter Lithium-Ionen-Batterien
Marten Probst	Analyse der Auswirkungen von Fehlern in HGÜ-Systemen
Daniel Redlich	Untersuchungen zur Erhöhung der elektrischen Festigkeit einer Vakuum-Schaltkammer mit äußeren Feldsteuerringen
Peter-Matthias Reimers	Konzeptionierung, Analyse und Bewertung von Ladeinfrastruktur für Batterieelektrische Triebzüge am Beispiel Goslar und Bad Harzburg
Nils Reinköster	Modellierung und Simulation des §14 a EnWG im Niederspannungsnetz
Kevin Schiemenz	Optische in-situ Diagnose der elektrodenstruktur während des Formierprozesses
Victor Schnell	DC Fault Isolation in Power Systems on a Component Level
Julian Schwung	Laboruntersuchung des Einflusses netzbildender Umrichter auf industrieübliche Inselnetzerkennungsverfahren von Bestandsanlagen in der Niederspannung und auf ihre Prüfung nach Schwingkreistest
Jinyuan Si	Untersuchung zum Einfluss der Signalerfassung und -verarbeitung auf die Bestimmung von Explosionsdrücken
Chenye Song	Thermal Runaway Untersuchungen an Lithium-Ionen-Batterien mittels elektrochemischer Impedanzspektroskopie
Christian Staudenmaier	Entwicklung von Fallbackszenarien für Energiemanagementsysteme
Daniel Swientek	Entwicklung eines Modells zur wirtschaftlichen Analyse von energetischen Komponenten unter der Berücksichtigung von Betreibermodellen in Quartieren
Kim Maria Tigelaar	Erstellung eines Transformationskonzepts zur klimaneutralen Energieversorgung eines Schlachtbetriebs
Jurek Türk	Entwicklung einer netznutzungsfallabhängigen Blindleistungsbereitstellung für umrichtergekoppelte erneuerbare Energieanlagen
Manuel Wagner	Untersuchung eines optimierten PV-Anlagendesigns durch Einsatz von Laststufenschaltern zur Ertragssteigerung und Verbesserung der Fähigkeit des Systems zur Leistungsbereitstellung
Stefanie Walujski	Analyse und Bewertung des Einflusses hochdynamischer Frequenzhaltungsmechanismen auf den zukünftigen Bedarf von Momentanreserve
Ziang Wang	Elektrochemische Untersuchung der Formierung von Lithium-Ionen-Batterien in Abhängigkeit von Verunreinigungszusätzen
Fabian Witt	Entwicklung eines thermischen Modells zur Nachbildung des Wärmebedarfs von Stallhaltungen in der Landwirtschaft
Qianyu Wu	Grid Forming Wind Farm Converter Controllability Fault Ride Through Study with Participation of HVDC
Yushijie Xin	Erstellung unterschiedlicher Preismodelle und deren Auswirkungen auf die Ladezeiträume von Elektrofahrzeugen
Edgar Zeitler	Untersuchung der dynamischen Stabilität und sinnvoller Arbeitsbereiche von stufenstellenden Transformatoren beim Einsatz in PV-Parks zur Ertragssteigerung
Zijian Zhao	Elektrolytveränderungen bei zyklischer Alterung von Lithium-Ionen-Batterien
Huanni Zhu	Modellbasierte Entwicklung von PHIL-Experimenten für DC-Systeme



# Chronologie



Veröffentlichungen 2022–2023 .....	184
Veranstaltungen und Events 2022 .....	188
Veranstaltungen und Events 2023 .....	190
Beteiligung an der Selbstverwaltung 2022 .....	192
Beteiligung an der Selbstverwaltung 2023 .....	193

# Veröffentlichungen 2022 – 2023

**Rauscher, F., Zimmermann, V., Sauer, T., Engel, B.**

*Bereitstellung von Momentanreserve aus Mittel- und Niederspannungsnetzen*

ENINNOV2022 — 17. SYMPOSIUM

ENERGIEINNOVATION, GRAZ, AUSTRIA (ONLINE), 16.–18.02.2022

**Ries, J., Essers, J., Hadlak, M., Reinhold, C.**

*Entwicklung einer Rapid Control Prototyping Plattform für die Analyse von Energiemanagementstrategien auf Laborebene*

ENINNOV2022 — 17. SYMPOSIUM

ENERGIEINNOVATION, GRAZ, AUSTRIA (ONLINE), 16.–18.02.2022

**Klabunde, F., Reinhold, C., Engel, B.**

*Regionsabhängige Energiesystemanalysen auf Basis einer datengesteuerten Verteilnetzmodellierung*

ENINNOV2022 — 17. SYMPOSIUM

ENERGIEINNOVATION, GRAZ, AUSTRIA (ONLINE), 16.–18.02.2022

**Sauer, T., Tiedt, F., Rauscher, F., Engel, B.**

*Vergleich verschiedener Wechselrichterregelungen in Netzfehlersituationen im Netzdynamiklabor*

ENINNOV2022 — 17. SYMPOSIUM

ENERGIEINNOVATION, GRAZ, AUSTRIA (ONLINE), 16.–18.02.2022

**Jennert, T., Kurrat, M.**

*Diagnosis of cell properties by electrochemical impedance spectroscopy during formation*

14. INTERNATIONALE FACHTAGUNG KRAFTWERK

BATTERIE – ADVANCED BATTERY POWER“, MÜNSTER, GERMANY, 28.–30.03.2022

**Kopp, T., Bösche, D., Vieth, P., Anspach, F., Kurrat, M., Meyer, S.**  
*Prüfungen von Hybridschaltern in dem neuartigen Hochleistungs-Gleichstromprüffeld DC.lab der TU Braunschweig*

26. FACHTAGUNG ALBERT-KEIL-KONTAKTSEMINAR, KARLSRUHE, GERMANY, 30.03.–01.04.2022, S. 141–145. ISBN: 978-3-8007-5780-0

**Vieth, P., Anspach, F., Bösche, D., Wilkening, E., Kurrat, M.**

*Untersuchung der Anforderungen und modellgestützte Komponentenauslegung eines 3-kV-Hybridschaltgerätes in einem MVDC-Netz*

26. FACHTAGUNG ALBERT-KEIL-KONTAKTSEMINAR, KARLSRUHE, GERMANY, 30.03.–01.04.2022, S. 146–153. ISBN: 978-3-8007-5780-0

**Gartner, J., Xu, Z., Wussow, J., Engel, B.**

*Harmonics in industrial grids as a result of charging infrastructure in employee parking lots*

ATZLIVE POWERTRAINS AND ENERGY SYSTEMS OF TOMORROW 2022“, BERLIN, GERMANY, 10.–11.05.2022

**Garn, T., Vanselow, A., Biedermann, C., Moser, A., Engel, B.**

*Flicker Emission Of Electric Vehicle Charging In Low Voltage Grids*

CIRE PORTO WORKSHOP 2022: E-MOBILITY AND POWER DISTRIBUTION SYSTEMS, PORTO, PORTUGAL, 02.–03.06.2022

**Anspach, F., Peters, E., Bösche, D., Vieth, P., Kopp, T., Kurrat, M.**

*Electrical investigation of the time development of the recovery voltage of a closed model arrangement after current loads in the operating range of an LVDC hybrid switch*

31ST INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL CONTACTS, SAPPORO, JAPAN, 13.–16.06.2022

**Ferenz, S., Ofenloch, A., Vaca, F., Wagner, H., Werth, O., Breitner, M., Lehnhoff, S., Nieße, A.**

*An Open Digital Platform to Support Interdisciplinary Energy Research and Practice—Conceptualization*

ENERGIES 2022, 15 (17), 6417, 02.09.2022, DOI: 10.3390/EN15176417

**Flügel, K., Gentsch, D., Kurrat, M.**

*Investigations of Lightning Impuls Voltage on Vacuum Circuit Breakers and Comparison of Effects between Industry and Research*

8TH ITG INTERNATIONAL VACUUM ELECTRONICS WORKSHOP, BAD HONNEF, GERMANY, 02.–03.09.2022

**Klabunde, F., Wegkamp, C., Engel, B.**

*Provision of grid-serving flexibility by agricultural operations and households in rural power distribution grids*

NEIS 2022 — CONFERENCE ON SUSTAINABLE ENERGY SUPPLY AND ENERGY STORAGE SYSTEMS, HAMBURG, GERMANY, 26.–27.09.2022, S. 208–214. ISBN: 978-3-8007-5983-5

**Meyer, T., Gentsch, D., Kurrat, M.**

*Review of post-arc current measurements and simulation of test circuit interaction*

CURRENT ZERO CLUB VACUUM CIRCLE, DÄTTWIL, SWITZERLAND, 27.09.2022

**Wegkamp, C., Buchholz, S., Tiemann, P., Engel, B., Weyer, H., Nieße, A.**

*Specific Product Characteristics of System Services and a Discussion of the joint market-based Procurement in a Single Product*

11TH INTERNATIONAL RUHR ENERGY CONFERENCE (INREC), ESSEN, GERMANY, 27.–28.09.2022

**Ebbert, L., Di-Modica, G., Wussow, J., Engel, B.**

*Comparing different price models and their impact on the charging times of battery electric vehicles*

6TH E-MOBILITY POWER SYSTEM INTEGRATION SYMPOSIUM, EMOB 2022, THE HAGUE, NETHERLANDS, 10.10.2022, DOI: 10.1049/ICP.2022.2723



- Wagner, H., Peñaherrera V. F., Fayed, S., Werth, O., Eckhoff, S.**  
*Co-simulation-based Analysis of the Grid Capacity for Electric Vehicles in Districts: the Case of Am Ölper Berge” in Lower Saxony*  
6TH E-MOBILITY POWER SYSTEM INTEGRATION SYMPOSIUM, EMOB 2022, THE HAGUE, NETHERLANDS, 10.10.2022, DOI: 10.1049/ICP.2022.2713
- Fayed, S., Peñaherrera V. F., Wagner, H., Rolink, J.**  
*An Open Source Grid Observer for the Analysis of Power Flexibilities in Low Voltage Distribution Grid Simulations*  
10TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON SMART GRID AND CLEAN ENERGY TECHNOLOGIES (ICSGCE), KUALA LUMPUR, MALAYSIA (ONLINE), 14.–16.10.2022, DOI: 10.1109/ICSGCE55997.2022.9953716
- Anspach, F., Vieth, P., Bösche, D., Kurrat, M.**  
*Commissioning of a novel high power medium voltage DC laboratory with exemplary studies on an MVDC hybrid contactor*  
67TH IEEE HOLM CONFERENCE ON ELECTRICAL CONTACTS, TAMPA, USA, 23.–26.10.2022, P-ISSN: 2158-9992
- Jennert, T., Kurrat, M.**  
*Effects of electrochemical impedance spectroscopy before and after formation*  
INTERNATIONAL BATTERY PRODUCTION CONFERENCE, BRAUNSCHWEIG, GERMANY, 07.–09.11.2022
- Landrath, O., Kurrat, M.**  
*Development of fast charging strategies for lithium-ion battery cells using an electro-thermal model approach*  
INTERNATIONAL BATTERY PRODUCTION CONFERENCE, BRAUNSCHWEIG, GERMANY, 07.–09.11.2022
- Rollin, A., Kurrat, M.**  
*Impact of Metal Oxalates on Lithium-Ion Batteries*  
INTERNATIONAL BATTERY PRODUCTION CONFERENCE, BRAUNSCHWEIG, GERMANY, 07.–09.11.2022
- Schneider, A., Klabunde, F., Buck, L., Ohlhoff, M., Reis, L., Olvermann, M., Kauffeld, S., Engel, B., Glatzel, G., Schröder, B., Frerichs, L.**  
*Drawing transformation pathways for making use of joint effects of food and energy production with biodiversity agriphotovoltaics and electrified agricultural machinery*  
JOURNAL OF ENVIRONMENTAL MANAGEMENT, VOLUME 335, 2023, 24.02.2023, H. 335, S. 1–10. DOI: 10.1016/J.JENVMAN.2023.117539
- Gartner, J., Nothdurft, C., Engel, B.**  
*Wechselwirkungen zwischen Oberschwingungsquellen aus dem Industrienetz und Elektrofahrzeugen*  
ATZ ELEKTRON 18, 26–32 (2023), 06.04.2023, DOI: 10.1007/S35658-022-1432-6
- Jennert, T., Song, C., Kurrat, M.**  
*Investigation of battery cells during thermal runaway using electrochemical impedance spectroscopy*  
15. INTERNATIONALE FACHTAGUNG KRAFTWERK BATTERIE – ADVANCED BATTERY POWER”, AACHEN, GERMANY, 27.–28.04.2023
- Rollin, A., Gottschalk, J., Novák, P., Kurrat, M.**  
*How Are Different Metal Oxalates Influencing Li-Ion-Batteries?*  
15. INTERNATIONALE FACHTAGUNG KRAFTWERK BATTERIE – ADVANCED BATTERY POWER”, AACHEN, GERMANY, 26.–28.04.2023
- Schuster, M., Pape, M., Studt, J., Bollhorn, S., Engel, B.**  
*Design of a Data Driven Reactive Power Forecasting for an Active Cross-Voltage Level Reactive Power Management*  
ETG-KONGRESS 2023 — DIE ENERGIEWENDE BESCHLEUNIGEN, KASSEL, GERMANY, 25.–26.05.2023, S. 1–6. [HTTPS://IEEEEXPLORE.IEEE.ORG/DOCUMENT/10172984](https://ieeexplore.ieee.org/document/10172984)
- Di-Modica, G., Ebbert, L., Kösjan, H., Müller, N., Engel, B.**  
*Phase-Precise Control of Electric Vehicles to Reduce Voltage Unbalance in Low-Voltage Grids*  
ETG-KONGRESS 2023 — DIE ENERGIEWENDE BESCHLEUNIGEN, KASSEL, GERMANY, 25.–26.05.2023, S. 121–128. ISBN: 978-3-8007-6108-1
- Biedermann, C., Beutel, V., Beyrodt, J., Brand, M., Buchholz, S., Gerlach, J., Majumdar, N., Leveringhaus, T., Lotz, M., Raeiszadeh, A., Scheunert, A., Teimourzadeh Baboli, P., Tiemann, P. H., Wegkamp, C., Agert, C., Breitner, M. H., Engel, B., Geissendörfer, S., Hofmann, L., Könnemund, M., Kurrat, M., Lehnhoff, S., von Maydell, K., Nieße, A., Weyers, H.**  
*Research Project SiNED Insights – Ancillary Services for Reliable Power Grids in Times of the Progressive German Energiewende and Digital Transformation*  
ETG-KONGRESS 2023 — DIE ENERGIEWENDE BESCHLEUNIGEN, KASSEL, GERMANY, 25.–26.05.2023
- Klabunde, F., Engel, B.**  
*Rooftop Photovoltaic Systems in German Agriculture – An Analysis of the Status quo and Potential for the future*  
ETG-KONGRESS 2023 — DIE ENERGIEWENDE BESCHLEUNIGEN, KASSEL, GERMANY, 25.–26.05.2023
- Biedermann, C., Rehbock, A., Uhde, D., Engel, B.**  
*Unbalance Control in Low Voltage Grids by single-phase BESS, Simulations and Laboratory Tests*  
ETG-KONGRESS 2023 — DIE ENERGIEWENDE BESCHLEUNIGEN, KASSEL, GERMANY, 25.–26.05.2023

**Lotz, M. R., Könemund, M., Kurrat, M.**  
*Adaption of Inverter-Based System Controls to Reduce the Negative Impact of Intermediate Infeed on Distance Protection Systems*  
ETG-KONGRESS 2023 — DIE ENERGIEWENDE  
BESCHLEUNIGEN, KASSEL, GERMANY, 25.–26.05.2023

**Wegkamp, C., Hadlak, M., Wagner, H., Kohlhepp, J., Engel, B.**  
*Optimized provision of local ancillary services with sensitivity factors using prosumer flexibility*  
CIRED 2023 INTERNATIONAL CONFERENCE & EXHIBITION ON ELECTRICITY DISTRIBUTION, ROME, ITALY, 12.–15.06.2023

**Korff, F., Köppe, H., Engel, B.**  
*Techno-economic Estimation of Reactive Power Related Additional Losses In Wind Farms During Reactive Power Supply*  
CIRED 2023 INTERNATIONAL CONFERENCE & EXHIBITION ON ELECTRICITY DISTRIBUTION, ROME, ITALY, 12.–15.06.2023

**Winter, B. O., Schwung, J., Engel, B.**  
*Robust Detection Method of Low-Voltage Islanding for Grid-Forming Inverters Operated in Conjunction with Existing PV Inverters*  
50TH IEEE PHOTOVOLTAIC SPECIALISTS CONFERENCE, SAN JUAN, PUERTO RICO, USA, 11.–16.06.2023, DOI: 10.36227/TECHRXIV.22561351.V1 (PREPRINT)

**Kahn, M., Tiedemann, L., Kurrat, M.**  
*Partial Discharge measuring of additive manufactured component with a defined cavity*  
2023 IEEE ELECTRICAL INSULATION CONFERENCE (EIC 2023), QUEBEC, CANADA, 18.–21.06.2023, S. 1–4. DOI: 10.1109/EIC55835.2023.10177325

**Kahn, M., Tiedemann, L., Kurrat, M.**  
*Partial Discharge measuring of additive manufactured component with a defined cavity*  
2023 IEEE ELECTRICAL INSULATION CONFERENCE (EIC 2023), QUEBEC, CANADA, 18.–21.06.2023

**Reimann, T., Winter, B. O., Heckmann, W.**  
*Need for grid-forming units in the distribution grid and their impact on protection, automation and control*  
PAC WORLD 2023 — PROTECTION, AUTOMATION & CONTROL WORLD CONFERENCE, GLASGOW, UNITED KINGDOM, 26.–29.06.2023

**Meyer, T., Gentsch, D., Kurrat, M.**  
*Analysis of the plasma behaviour after current zero phase based on the post-arc current of a vacuum interrupter*  
30TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON DISCHARGE AND ELECTRICAL INSULATION IN VACUUM (ISDEIV), OKINAWA, JAPAN, 25.–30.06.2023

**Weber, B., Gentsch, D., Kurrat, M., Meyer, T.**  
*Influence of increased gap lengths above 20 mm for rotating vacuum arcs between TMF-contacts*  
30TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON DISCHARGE AND ELECTRICAL INSULATION IN VACUUM (ISDEIV), OKINAWA, JAPAN, 25.–30.06.2023

**Flügel, K., Gentsch, D., Kurrat, M.**  
*Overview of Test Methods for Electric Strength of Vacuum Interrupter using Lightning Impulse Voltage*  
30TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON DISCHARGE AND ELECTRICAL INSULATION IN VACUUM (ISDEIV), OKINAWA, JAPAN, 25.–30.06.2023

**Peters, E., Weber, B., Kopp, T., Kurrat, M.**  
*Computer-aided optical plasma postprocessing applied on model spark gaps*  
PLASMA PHYSICS AND TECHNOLOGY 10 (1) . J.G.(2023), 08.08.2023, S. 9–14. DOI: 10.14311/PPT.2023.1.9

**Meyer, T., Gentsch, D., Kurrat, M.**  
*Measurement and simulation of synthetic test circuit interaction during breaking operation in a vacuum interrupter*  
23RD INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING, GLASGOW, UNITED KINGDOM, 28.08.–01.09.2023

**Flügel, K., Meyer, T., Gentsch, D., Kurrat, M.**  
*Partial Breakdown Detection in Vacuum Interrupter under Lightning Impulse Voltage*  
23RD INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING, GLASGOW, UNITED KINGDOM, 28.08.–01.09.2023

**Kahn, M., Tiedemann, L., Kurrat, M.**  
*High Voltage Design of Additive Manufactured Dielectric Test Samples*  
23RD INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING, GLASGOW, UNITED KINGDOM, 28.08.–01.09.2023

**Zeng, F., Kopp, T., Bösch, D., Claaßen, L., Vieth, P., Terörde, M., Kurrat, M.**  
*Investigation of DC circuit breaker with extinguishing chamber at reduced ambient pressure for an application in avionics*  
CONFERENCE ON SUSTAINABLE ENERGY SUPPLY AND ENERGY STORAGE SYSTEMS (NEIS), HAMBURG, GERMANY, 04.–05.09.2023

**Grandel, M., Kübler, C., Niehs, E., Wachenfeld, V., Engel, B.**  
*Prioritized EV Charging – Enhanced Smart Meter Gateway infrastructure enabling an event driven dynamic tariff*  
CONFERENCE ON SUSTAINABLE ENERGY SUPPLY AND ENERGY STORAGE SYSTEMS (NEIS), HAMBURG, GERMANY, 04.–05.09.2023

**Peters, E., Bösch, D., Kurrat, M.**  
*Design of a triggerable ignition circuit for model spark gap diagnostics*  
23ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON GAS DISCHARGES AND THEIR APPLICATIONS, GREIFSWALD, GERMANY, 10.–15.09.2023

**Kurrat, M., Alija, M., Peters, E.**  
*High-pressure plasma phenomena in spark gaps — a survey*  
23ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON GAS DISCHARGES AND THEIR APPLICATIONS, GREIFSWALD, GERMANY, 10.–15.09.2023, DOI: 10.24355/DBBS.084-202310240740-0

**Ebbert, L., Di-Modica, G., Engel, B.**  
*Field Test of a Battery Electric Logistics Fleet: Results from a Field Test and Comparison of Different Charging Strategies*  
 7TH E-MOBILITY POWER SYSTEM INTEGRATION SYMPOSIUM, COPENHAGEN, DENMARK, 25.09.2023

**Kübler, C., Niehs, E., Grandel, M., Engel, B.**  
*Smart EV Charging with Event Driven Tariffs in the German Smart Meter Infrastructure*  
 7TH E-MOBILITY POWER SYSTEM INTEGRATION SYMPOSIUM, COPENHAGEN, DENMARK, 25.09.2023

**Sauer, T., Schulz, N., Engel, B.**  
*Control Strategies of Electrolyzers to contribute Inertia an Fast Frequency Reserve in Context of a Megawatt-Scale Hydrogen Living-Lab*  
 22ND WIND & SOLAR INTEGRATION WORKSHOP, COPENHAGEN, DENMARK, 26.–28.09.2023

**Wagner, H., Lüdecke, M., Scheunert, A., Wegkamp, C., Engel, B., Weyer, H.**  
*Technical and Legal Analysis of the Grid-Serving Multi-Use of Battery Storage Systems for Prosumers*  
 22ND WIND & SOLAR INTEGRATION WORKSHOP, COPENHAGEN, DENMARK, 26.–28.09.2023

**Winter, B. O., Schwung, J., Schulz, N., Engel, B.**  
*Limitations of Current Norms to Predict Reliable Islanding Detection by Example of two Detection Methods for Grid-Forming Inverters*  
 22ND WIND & SOLAR INTEGRATION WORKSHOP, COPENHAGEN, DENMARK, 26.–28.09.2023

**Türk, J., Schuster, M., Köppe, H., Engel, B.**  
*Development approach of a volt-var control for inverter-coupled renewable energy plants using deep reinforcement learning*  
 22ND WIND & SOLAR INTEGRATION WORKSHOP, COPENHAGEN, DENMARK, 26.–28.09.2023

**Eichner, S., Schuster, M., Köppe, H., Sass, F., Grab, R.**  
*Development of a Pricing Model for the Reactive Power Supply via Statcom Capability of a real PV Power Plant*  
 22ND WIND & SOLAR INTEGRATION WORKSHOP, COPENHAGEN, DENMARK, 26.–28.09.2023

**Köppe, H., Schuster, M., Engel, B.**  
*Improving Power System Efficiency: A Case Study on optimized Reactive Power Management in High-Voltage Grids*  
 22ND WIND & SOLAR INTEGRATION WORKSHOP, COPENHAGEN, DENMARK, 26.–28.09.2023

**Wegkamp, C., Ferk, M., Grobler, J., Engel, B.**  
*Application of Residential Prosumer Flexibility for Frequency Control – Analysis and Simulative Investigation Considering Control Power and Inertia*  
 22ND WIND & SOLAR INTEGRATION WORKSHOP, COPENHAGEN, DENMARK, 26.–28.09.2023

**Jennert, T., Spörhase, S., Kianfar, A., Essmann, S.**  
*Effect of thermal runaway of lithium-ion batteries in a flameproof enclosure and simultaneous electrochemical impedance spectroscopy*  
 4TH IBSW 2023 – INTERNATIONAL BATTERY SAFETY WORKSHOP, ULM, GERMANY, 28.–29.09.2023

**Zeng, F., Kopp, T., Bösche, D., Vieth, P., Kurrat, M.**  
*Schalten von DC-Lichtbögen unter Umgebungsbedingungen der Luftfahrt*  
 27. VDE-FACHTAGUNG ALBERT-KEIL-KONTAKTSEMINAR, KARLSRUHE, GERMANY, 27.–29.09.2023

**Vieth, P., Bösche, D., Anspach, F., Kurrat, M.**  
*Investigation on the recovery behavior of the mechanical switching path of DC hybrid circuit breakers*  
 68TH IEEE HOLM CONFERENCE ON ELECTRICAL CONTACTS, SEATTLE, USA, 08.–11.10.2023

**Heckmann, W., Reimann, T., Degner, T., Winter, B. O., Ohrem, S.**  
*Das Runde muss ins Eckige – Momentanreserve durch netzbildende Stromrichter im Verteilnetz*  
 NETZPRAXIS 62 (10-23), 13.10.2023, [HTTPS://EMAGAZIN.NP-MAGAZIN.DE/DE/PROFILES/4223BF679ADA/EDITIONS/9D3CC35F8588CB0EF03C](https://emagazin.np-magazin.de/de/profiles/4223BF679ADA/EDITIONS/9D3CC35F8588CB0EF03C)

**Ndoh, E. T., Byeon, S., Lotz, M. R., Ehlers, S.**  
*A Method to Enable Reduced Sensor Capacitor Voltage Estimation in Modular Multilevel Converters*  
 4TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON MODELLING AND OPTIMISATION OF SHIP ENERGY SYSTEMS (MOSES), DELFT, NETHERLANDS, 26.–27.10.2023

**Jennert, T., Gomez, M. R.**  
*Comparison of Thermal Runaway Early Detection Using Different Electrical Measurement Methods*  
 INTERNATIONAL BATTERY PRODUCTION CONFERENCE, BRAUNSCHWEIG, GERMANY, 7.–9.11.2023

**Noronha, F., Rollin, A., Sukanya, S., Wilhelm, R., Kurrat, M., Kwade, A.**  
*From end-of-life batteries to high quality graphite – developing a recycling process focused on anodic materials*  
 INTERNATIONAL BATTERY PRODUCTION CONFERENCE, BRAUNSCHWEIG, GERMANY, 07.–09.11.2023

# Veranstaltungen und Events 2022

**20.01.2022**

Studienseminar WiSe 21/22  
KURRAT

**25.01.–27.01.2022**

Tagung Zukünftige Stromnetze, Sessionleitung  
ENGEL

**11.02.2022**

Promotion Jan Bellin  
KURRAT

**15.02.2022**

DFG  
KURRAT

**16.02.2022**

Current Zero Club Plenary meeting  
KURRAT

**17.02.2022**

B-IGSM: Plenary Meeting  
KURRAT

**24.02.2022**

FNN Infotag Unsymmetrie in Niederspannungsnetzen  
ENGEL

**25.02.2022**

Promotion Ying Su (PTB), Zweitgutachter  
ENGEL

**10.03.2022**

Dreharbeiten Film NEEMO  
ENGEL

**24.03.2022**

BMWK: Beiratssitzung - Digitalisierungsbarometer 2021  
ENGEL

**25.03.2022**

Begehung Nachhaltige Energiesysteme und Elektromobilität (NEEMO) durch Akkreditierungsinstitut  
ENGEL, KURRAT

**29.03.–30.03.2022**

Battery-Konferenz  
KURRAT

**29.03.–31.03.2022**

Klausur der AG Energiesysteme  
ENGEL

**04.04.2022**

ZIEHL-Konferenz  
KURRAT

**21.04.–22.04.2022**

EFZN Jahrestreffen Wasserstoff  
ENGEL

**06.05.2022**

JHV VDE Stiftung Erwin Marx  
KURRAT

**12.05.–13.05.2022**

Fachtagung Sicherheit und Zulassung elektr. Bahn-ausrüstungen  
ENGEL

**19.05.2022**

5. Niedersächsisches Forum Solarenergie, Vortrag  
ENGEL

**20.05.2022**

Förderkreissitzung des Forums Netztechnik Netzbetrieb (FNN) im VDE  
ENGEL

**30.05.2022**

Abschlussworkshop Initiative Hochschulentwicklung  
KURRAT

**09.06.2022**

Consortium Meeting EU-Forschungsprojekt AL-PHEUS  
ENGEL

**16.06.2022**

Graduiertenkolleg/CircularLIB  
KURRAT

**22.06.2022**

ESYS 2022 Konferenz Energiepreise und Versorgungssicherheit  
ENGEL

**21.06.–23.06.2022**

PV-Symposium 2022, Sessionleitung  
ENGEL

**23.06.–24.06.2022**

FNN-Workshop Netzbildende Wechselrichter, Vortrag  
ENGEL

**27.06.2022**

Preisverleihung FK 5  
KURRAT

**06.07.–07.07.2022**

Abschlusskonferenz BMWK-Forschungsprojekt Netzregelung 2.0, Moderation  
ENGEL

**18.07.–19.07.2022**

Strategie Workshop Niedersächsisches Forschungszentrum Fahrzeugtechnik  
ENGEL

**24.07.2022**

NFF-Workshop  
KURRAT

**28.07.2022**

VDE Hochspannungstechnik Programmausschuss Sitzung  
KURRAT

**06.09.2022**

Prof.–Sommerfest  
KURRAT

**15.09.2022**

Fachseminar Grid Forming für TenneT TSO GmbH  
ENGEL

**19.09.2022**

Fachtagung Energie der Norddeutschen Wissenschaftsminister-Konferenz  
ENGEL

**20.09.2022**

AG Energietechnologien  
Workshop  
KURRAT

**26.09.–27.09.2022**

Abschlusskonferenz BMWK-  
Forschungsprojekt U-Con-  
trol  
ENGEL

**28.09.–29.09.2022**

Fachtagung ETG GMA  
Netzregelung und System-  
führung  
ENGEL

**04.10.–06.10.2022**

Klausurtagung der Fakultät  
Elektrotechnik, Informati-  
onstechnik und Physik  
ENGEL, KURRAT

**12.10.2022**

VDE FNN: netz.con 2022  
- der Kongress zum Klima-  
schutznetz  
ENGEL

**13.10.2022**

NFF-Hauptversammlung  
KURRAT

**10.10.–14.10.2022**

Grid Integration Week, 2  
Vorträge, Sessionleitung  
ENGEL

**24.10.2022**

Erstsemesterbegrüßung  
EMOB  
KURRAT

**27.10.2022**

ZDIN-Verbundtreffen 2022  
ENGEL

**04.11.2022**

EITP-Absolventenfeier  
KURRAT

**10.11.2022**

Abschlusskonferenz BMWK-  
Forschungsprojekt Q-In-  
tegral  
ENGEL

**08.11.–10.11.2022**

VDE - Hochspannungstage  
KURRAT

**17.11.2022**

Prof@Turntables  
ENGEL

**21.11.2022**

ETG Fachtagung Erzeugung  
und Speicherung elekt-  
rischer Energie - Versor-  
gungssicherheit im Ener-  
giesystem der Zukunft,  
Moderation Podiumsdis-  
kussion  
ENGEL

**22.11.–23.11.2022**

Niedersächsische Energie-  
tage  
ENGEL

**01.12.2022**

VDE-Symposium Bezirks-  
verein Thüringen, Vortrag  
ENGEL

**13.12.2022**

ETG-Kongress / Programm-  
ausschuss  
KURRAT

**Laufend**

ETG Task Force Young  
Enthusiasts  
ENGEL

**Laufend**

VDE BS-Vorstands-  
Beiratssitzung  
KURRAT

**Laufend**

ETG Vorstandssitzung  
ENGEL

**Laufend**

EFZN-Vorstandssitzung  
ENGEL

**Laufend**

FNN Expertennetzwerk  
Unsymmetrie  
ENGEL

**Laufend**

ETG Q2-Sitzung/  
Programmausschuss  
KURRAT

**Laufend**

Stadt der Zukunft -  
Vorstandssitzung  
KURRAT

**Laufend**

BK Robust H/S-Systems  
KURRAT

**Laufend**

Braunschweigische  
Wissenschaftliche  
Gesellschaft - BWG  
KURRAT

**Laufend**

Sitzung DKE/K124  
(Hochspannungs- und  
Hochstrom-Prüftechnik)  
KURRAT

**Laufend**

PISC - Meeting  
KURRAT

**Laufend**

JRG Wiring Technologies  
Beiratssitzung  
KURRAT

**Laufend**

Beiratssitzung BMWK  
Roadmap Systemstabilität  
ENGEL

# Veranstaltungen und Events 2023

**18.01.2023**

VDE Neujahrsempfang  
ENGEL

**23.01.2023**

FNN Workshop zu europäischen Grid Codes  
ENGEL

**25.01.–26.01.2023**

Tagung Zukünftige Stromnetze  
ENGEL

**31.01.–01.02.2023**

Berufungskommission Energienetze  
KURRAT

**02.02.–03.02.2023**

Workshop EFZN-Vorstand  
ENGEL

**14.02.2023**

PTB Stakeholder Workshop Wasserstoff, Vortrag  
ENGEL

**16.02.2023**

ZLE Präsenzworkshop  
ENGEL

**20.02.2023**

VDE\_BS Strategietreffen Region Hanse  
KURRAT

**22.02.2023**

Forschungsaustausch Ilmenau  
KURRAT

**23.02.–24.02.2023**

24. NFF-Workshop  
ENGEL

**28.02.2023**

Current Zero Club meeting on planning ads future  
KURRAT

**28.02.–02.03.2023**

PV-Symposium 2023, Sessio-  
nleitung  
ENGEL

**08.03.2023**

Kick-Off-Treffen BMWK-  
Forschungsprojekt Q-REAL  
ENGEL

**14.03.2023**

Regionalnetzwerktreffen der  
Region Hannover und Süd-  
niedersachsen  
ENGEL

**16.03.–17.03.2023**

Jahrestreffen EFZN  
ENGEL

**23.03.2023**

Spatenstich H2 Terminal  
ENGEL

**23.03.2023**

MetroPolis Workshop  
KURRAT

**24.03.2023**

Promotion Marian Meyer,  
Zweitgutachter  
ENGEL

**28.03.2023**

InZePro-Forschungskollo-  
quium  
KURRAT

**28.03.2023**

ETG-Q2  
KURRAT

**18.04.2023**

BK Chemie Energiespeicher  
KURRAT

**19.04.2023**

ZDIN/ZLE Hannover-Messe  
ENGEL

**20.04.2023**

3. Beiratssitzung Roadmap  
Systemstabilität  
ENGEL

**21.04.2023**

Braunschweigische Wis-  
senschaftliche Gesellschaft  
- BWG - Jahresversamm-  
lung-/feier  
KURRAT

**24.04.2023**

Promotion Dirk Bösche  
KURRAT

**26.04.2023**

Vortrag vor Technisches  
Consulting DB Netze  
ENGEL

**28.04.2023**

Braunschweigische Wissen-  
schaftliche Gesellschaft -  
BWG - Plenarversammlung  
KURRAT

**03.05.2023**

Einweihung Fraunhofer IEE/  
Jubiläum 35 Jahre  
ENGEL

**02.05.–03.05.2023**

DKE-124-Sitzung  
KURRAT

**04.05.2023**

NFF - Vorstandssitzung  
ENGEL

**05.05.2023**

Sommerliches Zu-  
sammenkommen der  
Professor\*innen  
KURRAT

**10.05.–11.05.2023**

BNetzA/EFZN: 14. Göttinger  
Energietagung, Grußwort  
ENGEL

**23.05.2023**

Kick-Off BMWK-For-  
schungsprojekt Verteilnetz  
2030plus intern  
ENGEL

**25.05.–26.05.2023**

ETG-Kongress 2023  
ENGEL, KURRAT

**07.06.2023**

BLB-Vollversammlung 2023  
KURRAT

**14.06.2023**

Promotion Frederik An-  
spach  
KURRAT

**16.06.2023**

Förderkreistreffen des VDE  
FNN  
ENGEL

**22.06.2023**

Kick-Off BMWK-For-  
schungsprojekt Verteilnetz  
2030plus  
ENGEL

**26.06.2023**

Vortrag Neue Systemdienst-  
leistungen aus Photovoltaik  
und Batterieanlagen  
ENGEL

**23.06.–01.07.2023**

ISDEIV-Konferenz  
KURRAT

**05.07.2023**

EFZN Forschungsworkshop  
ENGEL

**07.07.2023**

Fakultätentag Elektrotech-  
nik  
ENGEL

**10.07.2023**

JRG-Wiring Technologies-  
advisory Board Meeting  
KURRAT

**14.07.2023**

VDE Hansetag  
KURRAT

- 14.07.2023**  
BK Thermodynamik  
KURRAT

---

- 18.07.2023**  
Promotion Robin Drees  
KURRAT

---

- 20.07.2023**  
Betriebsausflug Institut  
ENGEL, KURRAT

---

- 21.08.–23.08.2023**  
AG Energietechnologien  
Workshop  
KURRAT

---

- 28.08.2023**  
Projektabschlusstreffen des  
BMWK-Forschungsprojek-  
tes flexess  
ENGEL

---

- 29.08.–31.08.2023**  
Klausur der AG Energiesys-  
teme  
ENGEL

---

- 11.09.2023**  
Gas Discharge 23  
KURRAT

---

- 11.09.–12.09.2023**  
FNN Infotag Systemanfor-  
derungen  
ENGEL

---

- 18.09.2023**  
Kick-Off BMWK-For-  
schungsprojekt Fuchstal  
leuchtet  
ENGEL

---

- 19.09.2023**  
ZDIN Verbundtreffen 2023  
ENGEL

---

- 21.09.2023**  
Tagung Energieforschung  
der norddeutschen Wissen-  
schaftministerkonferenz  
ENGEL

- 21.09.–22.09.2023**  
elenia Symposium/Energie-  
seminar  
ENGEL, KURRAT

---

- 25.09.–26.09.2023**  
NFF-Workshop  
KURRAT

---

- 27.09.2023**  
Promotion Benjamin Weber  
KURRAT

---

- 25.09.–28.09.2023**  
Renewable Energy Grid In-  
tegration Week, Sessionlei-  
tungen  
ENGEL

---

- 28.09.2023**  
VDE FNN Netzcamp  
ENGEL

---

- 29.09.2023**  
Symposium Hochspan-  
nungstechnik  
KURRAT

---

- 10.10.–11.10.2023**  
Klausur Fakultät Elektro-  
technik, Informatiotech-  
nik, Physik  
ENGEL, KURRAT

---

- 12.10.2023**  
Vortrag bei Workshop des  
Bundesverbandes Schienen-  
Nahverkehr (BSN) zu Infra-  
struktur für den Betrieb mit  
batterieelektrischen Fahr-  
zeugen (BEMU)  
ENGEL

---

- 12.10.2023**  
Promotion L. Hanisch  
KURRAT

---

- 16.10.–17.10.2023**  
Konsortialtreffen NetFlexum  
KURRAT

- 19.10.2023**  
Regionalnetzwerktreffen  
vom Bürgerdialog Strom-  
netz  
ENGEL

---

- 27.10.2023**  
Promotion Florian Rauscher  
ENGEL

---

- 02.11.2023**  
Erstsemesterbegüßung  
EMOB  
KURRAT

---

- 03.11.2023**  
Absolventenfeier Fakultät  
Elektrotechnik, Informati-  
ontechnik, Physik  
ENGEL

---

- 06.11.–08.11.2023**  
ETG-Fachtagung Flexible  
Erzeuger, Verbraucher und  
Speicher  
ENGEL

---

- 13.11.2023**  
NFF Doktoranden-Preis-  
Verleihung  
ENGEL

---

- 16.11.2023**  
Prof@Turntables  
ENGEL

---

- 20.11.–21.11.2023**  
15. Niedersächsische Ener-  
gietage  
ENGEL

---

- 23.11.2023**  
Promotion Stefanie Celan  
ENGEL, KURRAT

---

- 25.11.–26.11.2023**  
ETG High-Voltage goes  
green  
KURRAT

- 14.12.2023**  
Weihnachtsfeier Institut  
ENGEL

---

- Laufend**  
ETG Task Force Young  
Enthusiasts  
ENGEL

---

- Laufend**  
EFZN-Vorstandssitzung  
ENGEL

---

- Laufend**  
ETG-Kongress-  
Programmausschuss  
KURRAT

---

- Laufend**  
VDE\_BS- Vorstands-und  
Beiratssitzung  
KURRAT

---

- Laufend**  
Stadt der Zukunft -  
Vorstandssitzung  
KURRAT

---

- Laufend**  
PISC-Meeting  
KURRAT

---

- Laufend**  
BK Elektrochemie  
KURRAT

---

- Laufend**  
BK Photonische Systeme  
und Technologien  
KURRAT

---

- Laufend**  
Beiratstreffen BMWK  
Roadmap Systemstabilität  
ENGEL

---

- Laufend**  
EFZN-Aufsichtsratsitzung  
ENGEL

# Beteiligung an der Selbstverwaltung 2022

## Universität

MICHAEL KURRAT

- Dekanatsitzung  
20.01. | 10.02. | 31.05.
- Dekanat  
10.02. | 22.02. | 17.03. | 22.09. | 08.12.

BERND ENGEL

- Energiebeirat  
09.03.
- AG Nachhaltigkeit  
11.01. | 20.01. | 17.02. | 17.03. | 21.04. |  
12.05. | 16.06. | 07.07. | 25.08. | 22.09. |  
02.11. | 12.12.

## Fakultät

MICHAEL KURRAT

- Fachvertreter-Versammlungen  
21.01. | 22.04. | 20.05.2 | 24.06. |  
22.07. | 16.12.
- Fakultätsratssitzung (FKR) / Sonder  
FKR  
21.03. | 25.04. | 23.05. | 27.06. | 15.08. |  
19.09. | 10.10. | 21.11. | 19.12.
- Fakultätsratssitzung (Gremien) au-  
ßerplanmäßig  
03.02.
- Planungsrunde EITP  
14.01. | 18.03. | 16.05. | 10.06. | 30.09. |  
02.12.
- Fakultätsrat EITP

BERND ENGEL

- Fachvertreter-Versammlungen
- Fakultätsratssitzung  
24.01.
- Fakultätsrat EITP (Vertretung)
- Studienkommission  
ET/WIING-ET/NEEMO/ELSY/EMOB  
10.01. | 28.09. | 13.12.
- Prüfungsausschuss  
ET/EMOB/ELSY/NEEMO/QTEC

## elenia Institut

MICHAEL KURRAT

- Geschäftsführender Institutsleiter
- Institutsrunde (Vorstand)  
Laufend (monatlich)
- Vorstandsrunde elenia  
31.01. | 14.02. | 16.05. | 16.06. | 13.06. |  
11.07. | 17.10. | 14.11. | 12.12.
- Statussitzung (Mitarbeiter\*innen-  
Versammlung)  
Laufend (monatlich)
- Projektmanagement Office  
Laufend (nach Bedarf)
- Teamleitersitzungen der AG Ener-  
gietechnologien  
Laufend (monatlich)
- Novizengruppe (Doktorandense-  
minar)  
Laufend (monatlich)
- Mentorentreffen  
12.01. | 31.05. | 06.07. | 14.11.
- Mentorengruppe  
Einmal pro Semester
- Studentisches Kolloquium  
Laufend (wöchentlich)
- Erstsemesterbegrüßung  
24.10.

BERND ENGEL

- Institutsrunde (Vorstand)  
Laufend (monatlich)
- Vorstandsrunde elenia  
31.01. | 14.02. | 16.05. | 16.06. | 13.06. |  
11.07. | 17.10. | 14.11. | 12.12.
- Statussitzung (Mitarbeiter\*innen-  
Versammlung)  
Laufend (monatlich)
- Projektmanagement Office  
Laufend (nach Bedarf)
- Teamleitersitzungen der AG Ener-  
giesysteme  
Laufend (monatlich)
- Mentorentreffen
- Mentorengruppe  
Einmal pro Semester
- Studentisches Kolloquium  
Laufend (wöchentlich)



# Beteiligung an der Selbstverwaltung 2023

## Universität

BERND ENGEL

- Energiebeirat  
27.04. | 06.12.
- AG Nachhaltigkeit  
23.01. | 20.02. | 12.04. | 13.06. | 01.11.

## Fakultät

MICHAEL KURRAT

- Fakultätsrat EITP
- Fachvertreter-Versammlungen  
20.01. | 14.04. | 16.06. | 22.09. | 20.10. |  
17.11 | 15.12.
- Fachvertreter-Versammlungen Leh-  
re  
12.07.
- Fakultätsratssitzung  
23.01 | 02.02. | 20.03. | 17.04. | 15.05. |  
19.06. | 24.07. | 23.10. | 20.11. | 18.12.
- Planungsrunde EITP  
10.02. | 10.03. | 07.07.

BERND ENGEL

- Fakultätsrat EITP (Vertretung)
- Fachvertreter-Versammlungen  
20.01. | 16.06. | 12.07. | 18.07. | 22.09.
- Fakultätsratssitzung  
24.07.
- Studienkommission  
ET/WIING-ET/NEEMO/ELSY/EMOB  
22.02. | 08.05.
- Prüfungsausschuss  
ET/EMOB/ELSY/NEEMO/QTEC

## elenia Institut

MICHAEL KURRAT

- Geschäftsführender Institutsleiter  
Bis April 2023
- Institutsrunde (Vorstand)  
Laufend - monatlich
- Vorstandsrunde elenia  
24.01. | 21.02. | 20.03. | 24.04. | 25.05. |  
19.06 | 24.07. | 20.09 | 23.10 | 13.11. |  
11.12.
- Statussitzung (Mitarbeiter\*innen-  
Versammlung)  
Laufend – monatlich
- Projektmanagement Office  
Laufend - nach Bedarf
- Teamleitersitzungen der AG Ener-  
gietechnologien  
Laufend - monatlich
- Novizengruppe (Doktorandense-  
minar)  
Laufend - monatlich
- Mentorentreffen  
30.01. | 24.05. | 17.07.
- Mentorengruppe  
Einmal pro Semester
- Studentisches Kolloquium  
Laufend - wöchentlich

BERND ENGEL

- Geschäftsführender Institutsleiter  
Ab April 2023
- Institutsrunde (Vorstand)  
Laufend - monatlich
- Vorstandsrunde elenia  
24.01. | 21.02. | 20.03. | 24.04. | 25.05. |  
19.06 | 24.07. | 20.09 | 23.10 | 13.11. |  
11.12.
- Statussitzung (Mitarbeiter\*innen-  
Versammlung)  
Laufend – monatlich
- Projektmanagement Office  
Laufend - nach Bedarf
- Teamleitersitzungen der AG Ener-  
giesysteme  
Laufend - monatlich
- Mentorentreffen
- Mentorengruppe  
Einmal pro Semester
- Studentisches Kolloquium  
Laufend - wöchentlich

# Impressum

**© 2024 Technische Universität Braunschweig  
elenia Institut für Hochspannungstechnik  
und Energiesysteme**

Schleinitzstraße 23  
38106 Braunschweig  
Telefon +49 531 391-7700  
Telefax +49 531 391-8106

[elenia@tu-braunschweig.de](mailto:elenia@tu-braunschweig.de)  
[www.tu-braunschweig.de/elenia](http://www.tu-braunschweig.de/elenia)

Redaktion: Merten Schuster, Johanna Grobler, Nelly Schulz  
Gestaltung: Jakob Piest, [jpgd.de](mailto:jpgd.de)  
Fotos: Wenn nicht anders angegeben elenia/TU Braunschweig

Berichtszeitraum: 01/2022–10/2023



© Technische Universität Braunschweig  
elenia Institut für Hochspannungstechnik  
und Energiesysteme

Schleinitzstraße 23  
38106 Braunschweig  
Telefon +49 531 391-7700  
Telefax +49 531 391-8106

[elenia@tu-braunschweig.de](mailto:elenia@tu-braunschweig.de)  
[www.tu-braunschweig.de/elenia](http://www.tu-braunschweig.de/elenia)