



Technische  
Universität  
Braunschweig

**elenia**  
Institut für Hochspannungstechnik  
und Elektrische Energieanlagen

Institut für Hochspannungstechnik und  
Elektrische Energieanlagen - elenia

# Jahresbericht

# 2019



# Vorwort

Liebe Freunde des Instituts elenia,

das Jahr 2019 war geprägt von heftigen Diskussionen in der Öffentlichkeit bezüglich Klimaschutz, Fridays for Future und dem Klimapaket der Großen Koalition. Auch bei uns an der TU Braunschweig waren Students und Scientists for Future aktiv und haben gemeinsam mit dem Präsidium die Entwicklung eines neuen Leitbildes einer nachhaltigen, klimaneutralen Universität initiiert.

Unsere Forschungsschwerpunkte passen in diese Zeit mit mehr Elektromobilität, größerem Zubau von erneuerbaren Energien und Speichern sowie dem Ausbau der Stromnetze. Deshalb entwickeln wir uns erfreulich gut und viele Antragstellungen waren von Erfolg gekrönt. Von der anwendungsnahen Auftragsforschung bis zur von der Deutschen Forschungsgesellschaft (DFG) geförderten Grundlagenforschung haben wir eine gesunde Mischung der Drittmittelfinanzierung durch Unternehmen, Bundes- und Landesministerien sowie der DFG. Die Entwicklung ist mit einem personellen Zuwachs verbunden, sodass wir jetzt mit über 50 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern eng zusammenrutschen müssen.

Für die Fakultät stellt das elenia mit Michael Kurrat für zwei weitere Jahre den Dekan. Mit dem Kernziel der Strukturierung traf sich die Fakultät im Februar zu ihrer Klausurtagung „Lehre“ im Kloster Wöltingerode, um die Chancen der Reakkreditierung von Elektrotechnik und Informationstechnik für die Fakultätsentwicklung zu nutzen.

Die EnergietechnikerInnen der TU unterstützen verstärkt die Gremienarbeit der Energietechnischen Gesellschaft (ETG) im VDE. Unsere Kollegin Regine Mallwitz vom Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen übernimmt die Leitung des ETG-Fachbereichs Q1 „Leistungselektronik“, Michael Kurrat leitet den Fachbereich Q2 „Werkstoffe, Isoliersysteme, Diagnostik“ und Bernd Engel wurde als Vertreter der Wissenschaft im ETG-Vorstand wiedergewählt.

Mit dem Wunsch für ein gutes und erfolgreiches Jahr 2020 bedanken wir uns herzlich bei Ihnen, unseren Partnern aus den Unternehmen und Forschungseinrichtungen, den Lehrbeauftragten, der DFG, den Projektträgern, den Bundesministerien, der Volkswagenstiftung und den Niedersächsischen Ministerien für Wissenschaft und Kultur sowie für Umwelt, Energie und Klimaschutz für die Unterstützung unserer Arbeiten.

Braunschweig, im Dezember 2019



Bernd Engel



Michael Kurrat

*Bernd Engel*

*Michael Kurrat*

# Inhaltsübersicht

## 2 Forschung



## 3 Labore

## 1 Portrait

# 6 Chronologie

## 4 Lehre



## 5 Veranstaltungen

# Inhaltsverzeichnis

## 1 Portait

Jahresrückblick	8
Das Institut 2019	11
Zahlen und Fakten	12
Neue und ehemalige Mitarbeiter	13
Wege zum elenia I	14
Wege zum elenia II	15

## 2 Forschung

Energiewirtschaft & Energiemanagement	18
Netzdynamik & Systemstabilität	22
Elektromobilität	36
Batterietechnik	40
Gleichstromsysteme	48
Anlagentechnik	52
Forschungsbereich Plasmen	58
Hochspannungstechnik	60
Promotionen	62
Veröffentlichungen	70

## 3 Labore & Werkstätten

Energiemanagementlabor	74
Netzdynamiklabor	76
Batterietest-Labore am elenia	80
Hochleistungs-DC-Prüffeld	82
Leistungsprüffeld	84
Blitzschutzlabor	86
Hochspannungshalle	88
Mechanische Werkstatt	90
Elektrotechnische Werkstatt	91

## 4 Lehre

Vorlesungen	94
Labor : Intelligentes Laden	96
Labore und Seminare des elenia	97
Erfahrungen eines Masteranden	98
Studentische Abschlussarbeiten am elenia 2019	99

## 5 Veranstaltungen

Besondere Veranstaltungen	102
<i>Berichte zu ausgewählten Events des Jahres 2019</i>	

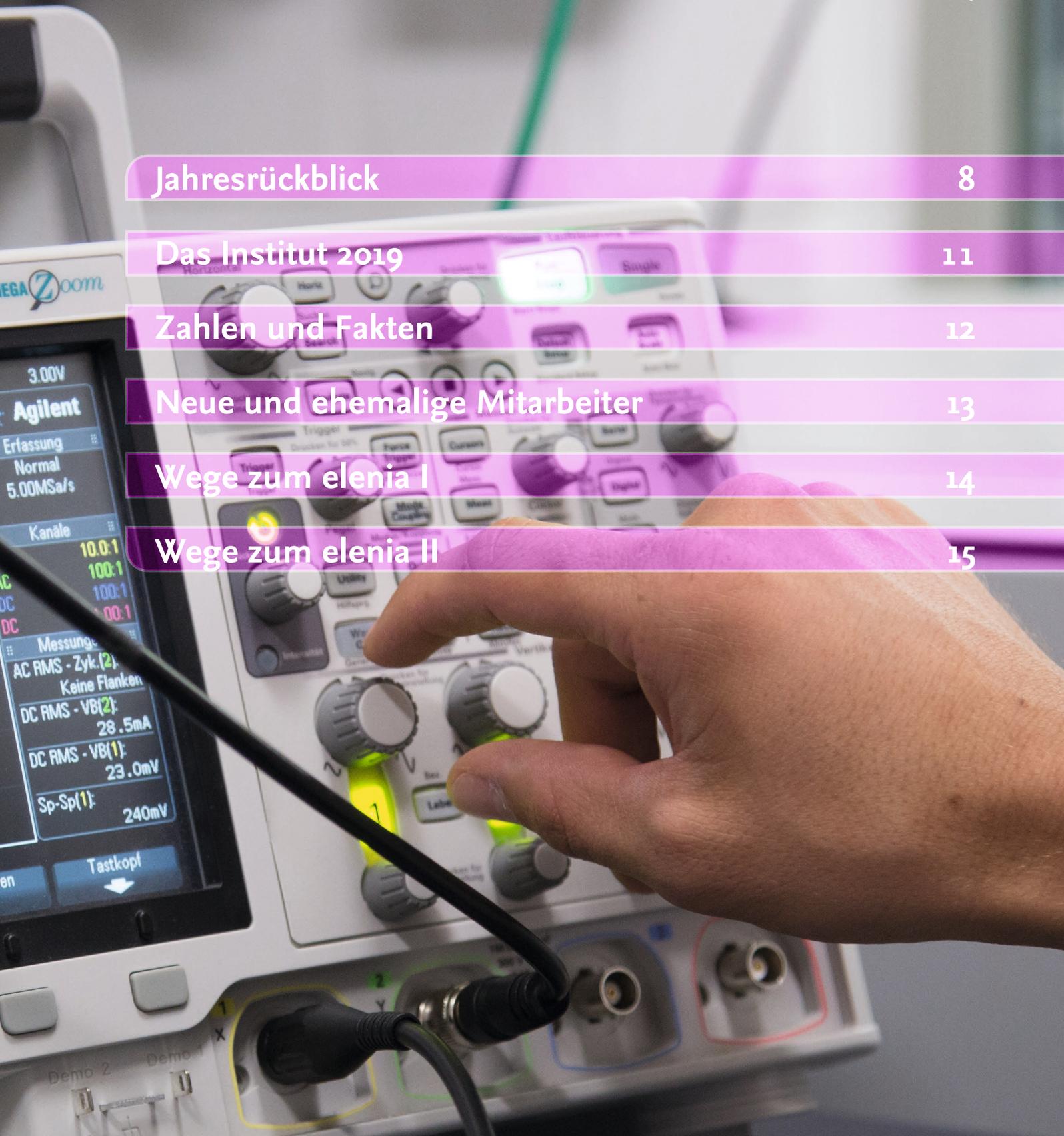
## 6 Chronologie

Das Jahr 2019 am elenia	106
-------------------------	-----



# Portrait

# 1



Jahresrückblick

8

Das Institut 2019

11

Zahlen und Fakten

12

Neue und ehemalige Mitarbeiter

13

Wege zum elenia I

14

Wege zum elenia II

15

Das Institut für Hochspannungstechnik und Elektrische Energieanlagen - elenia ist in der Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik, Physik der Technischen Universität Braunschweig angesiedelt. Mit nunmehr über 50 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern sind wir in den letzten Jahren aufgrund von steigendem Forschungsbedarf in der Ener-

gietechnik deutlich gewachsen. Unser Team arbeitet fachlich tiefgehend, wissenschaftlich sorgfältig und hoch motiviert an gemeinsamen Projekten und ist der wesentliche Faktor für den Erfolg des elenia. Dabei orientieren wir uns zwischenmenschlich sowie professionell stets an unserem instituts-eigenen Wertekanon.



# Jahresrückblick

## Rückblick auf das Jahr 2019 am Institut für Hochspannungstechnik und Elektrische Energieanlagen - elenia

Aus Forschung und Lehre gibt es vom elenia auch in 2019 viel zu berichten. Die drei Forschungsschwerpunkte waren sehr aktiv. Höhepunkt war der Schwerpunkttag am 14.5.2019, der dieses Jahr in der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) stattfand. Über 30 Poster wurden präsentiert und eifrig diskutiert.

In unserem Forschungsschwerpunkt „Komponenten der Energieversorgung“ (Mentor Prof. Kurrat) arbeiten wir daran neue Methoden der Hochspannungstechnik sowie neue Anlagen zu entwickeln. Dadurch ist es uns möglich ein tieferes Verständnis der elektrotechnischen und physikalischen Phänomene zu erfassen und zu erklären. In diesem Jahr sind neue, anspruchsvolle Projekte hinzugekommen. Bei der Betrachtung von Mittelspannungsgleichstromnetzen werden im Projekt *Smart Modular Switchgear 2* neue Schaltkonzepte und Fehlerdetektionsalgorithmen entwickelt und getestet. Dieses Projekt stärkt insbesondere unseren wissenschaftlichen Austausch mit den Kollegen aus dem IMAB, der PTB und mit der Firma ETA. Im Bereich der Vakuumtechnik ist dieses Jahr ein DFG gefördertes Projekt mit der TU Darmstadt gestartet, welches sich mit der magnetooptischen Lichtbogenanalyse befasst.

Weiterhin beschäftigen wir uns mit den theoretischen, optischen und thermodynamischen Eigenschaften von Plasmen

in verschiedenen Anwendungsbereichen von Funkenstrecken bis Vakuumschaltern mit unseren langjährigen Industriepartnern. Im Bereich der Isoliersysteme ist dieses Jahr eine Dissertation im Bereich der kryogenen Isolierstoffe durch Herrn Nicholas Hill abgeschlossen worden. Durch diese Dissertation konnten wir das Profil des Instituts nochmals in Richtung der Durchschlagstheorie von Gasen schärfen.

Der Forschungsschwerpunkt „Elektromobilität“ (Mentor Dr.-Ing. Lienesch) hat das vom BMWi geförderte Projekt *DaLion4.0* im direkten Anschluss an das Ende 2018 erfolgreich abgeschlossene Leuchtturmprojekt *DaLion* der BLB einwerben können. Damit wurden bereits wesentliche Arbeiten in Richtung größerer Transparenz bezüglich Einflussfaktoren in der Batteriezellproduktion durchgeführt. Der Fokus liegt neben der Entwicklung von regelungsfähigen Modellen, die eine Abbildung der Zellproduktion in cyberphysischen Systemen verfolgt, in der Integration neuer Messtechniken sowie dem Qualitätsmanagement. Darüber hinaus konnte durch die Tätigkeiten zum Projekt *NetProSum2030* die Laborkapazität für die Untersuchung von Batteriemodulen und -systemen erweitert und wertvolle Kompetenz in diesem Bereich aufgebaut werden. Zudem wurde durch *NetProSum2030* sowie das in 2018 gestartete Projekt *BaSS* die stets gute Zusammenarbeit mit der PTB intensiviert.

Anfang des Jahres erarbeitete ein kleines Antragsteam unter der Leitung der BLB die Bewerbung um die „Forschungsfertigung Batterie-zelle“ für den Standort Braunschweig/Salzgitter. Die Batterieforschungsfabrik bettet sich mit ihrer wettbewerbsfähigen Batterieproduktion in das Dachkonzept Batterieforschung des BMBF ein. Ende Juni fiel die Entscheidung zwar auf den Standort Münster. Derzeit finden jedoch Gespräche zwischen dem BMBF und den anderen Bewerbern statt, um die besten Konzepte zu identifizieren, zu fördern und gemeinsam umzusetzen. Ebenso erfolgreich wie im Vorjahr fand die BLB-eigene "International Battery Production Conference (IBPC)" in Braunschweig statt und erfreute sich über 230 Batterieexperten aus 17 verschiedenen Ländern.

Im Bereich der Netzintegration von Elektromobilität wird aktiv mit örtlichen Unternehmen zusammengearbeitet. Mit dem ÖPNV-Unternehmen Braunschweiger Verkehrs GmbH wurden bereits in der jungen Vergangenheit in zwei Forschungsprojekten zu der Elektrifizierung der innerstädtischen Busringlinie zusammengearbeitet. Aktuell wird im Rahmen einer Studie die vollständige Umstellung auf eine elektrische Busflotte untersucht. Im Rahmen einer Kooperation mit dem örtlichen Energieversorger BS|Energy und dem örtlichen Netzbetreiber BS|Netz werden aktuelle Fragestellungen rund um die Netzinteg-



Gemeinsamer Schwerpunkttag des elenia 14. Mai 2019

ration von Elektrofahrzeugen und damit verbundenen Herausforderungen analysiert.

Im Forschungsschwerpunkt „Aktives Verteilnetz“ (Mentor Prof. Engel) endeten und starteten 2019 hochspannende Projekte. In *PV-Wind-Symbiose* wurde die Blindleistungsbereitstellung aus PV- und Windenergieanlagen untersucht sowie ein Blindleistungsmanagement für Verteilnetze entwickelt. Das Nachfolgeprojekt *Q-Integral* wird die Arbeiten logisch fortsetzen. Ziel ist die Erweiterung des Managementsystems zu einem spannungsebenen- und netzbetreiberübergreifenden Ansatz. Auch das Projekt *U-Control* hat mit *U-Quality* einen Nachfolger bekommen. Im Projekt werden u.a. die Einflüsse umrichterbasierter Komponenten sowie von Wärmepumpen auf die Spannungsqualität untersucht. Die Simulationen werden in einer umfassenden Feldmesskampagne validiert. Im Projektkonsortium zusammen mit der RWTH Aachen, der TU München und der Forschungsgemeinschaft für Elektrische Anlagen und Stromwirtschaft e.V. wurde auch eine FNN-Studie zum Thema Unsymmetrie eingeworben, die im Jahr 2020 zusammen mit der TU Dresden durchgeführt wird.

Im abgeschlossenen Forschungsprojekt *NEDS – Nachhaltige Energieversorgung Niedersachsen* wurden denkbare Transitionspfade hin zu einer auf erneuerbaren Energien basierenden Stromversorgung in Niedersachsen bis 2050 entwickelt und auf ihre Nachhaltigkeit und Umsetzbarkeit analysiert. Das elenia untersuchte in den vier Jahren die technischen und wirtschaftlichen Auswirkungen einer ganzheitlichen Netzintegration von vernetzten Gebäuden mit einzelnen Kom-

ponenten in der Niederspannungsebene sowie die koordinierte und multikriterielle Steuerung über ein agentenbasiertes, verteiltes Optimierungsverfahren. In dem neuen Forschungsprojekt *Energy-4-Agri* beschäftigt sich das elenia in den nächsten Jahren mit der Elektrifizierung des landwirtschaftlichen Sektors zur nachhaltigen Reduktion der Treibhausgasemissionen.

Im institutseigenen Projekt Management Office (PMO) wurde an erste Erfolge aus den angestoßenen Veränderungsprozessen des Jahres 2018 angeknüpft. In einem Workshop wurden agile Managementmethoden erarbeitet, um institutsinterne Prozesse zu optimieren. Wichtige Institutsthemen werden zwischen den interessierten Institutsangehörigen im „Open Space“ schnell und unbürokratisch geklärt. Mit dem Ziel, Entscheidungswege zu verkürzen, wurden Kompetenzverteilungen am Institut kritisch reflektiert und in einer neuen Entscheidungsmatrix festgelegt.

Der Institutsworkshop im September 2019 hatte mit dem Energieforschungszentrum Niedersachsen (EFZN) in Goslar ein besonderes, wissenschaftliches Ziel. Der Tag wurde mit einer historischen Stadtführung komplettiert. Im EFZN, Einrichtung der fünf Universitäten Braunschweig, Clausthal, Göttingen, Hannover und Oldenburg, wurde im Oktober 2019 außerdem der Vorstand auf den meisten Funktionen neu bestimmt. Die TU Braunschweig wird dort fortan von Prof. Engel vertreten.

In umfangreichen Lehrangebot des elenia gibt es seit 2019 neue Vorlesungen und neue Lehrbeauftragte: „Aufbau und Funktion von Speichersystemen“ von

Herrn Dr.-Ing. Frank Lienesch und die Beteiligung von Prof. Engel an „Regenerative Energietechnik“, die sich insbesondere an Studierende der Nachhaltige Energietechnik richtet.

Der Umbau des elenia für Forschung und Lehre geht weiter. Innerhalb der Hochspannungshalle wurde das neue Hochleistungsgleichstromprüffeld eingebaut. Außerdem wurde der Startschuss gegeben für einen neuen, studentischen Arbeitsraum im Südturm sowie die Renovierung von drei Räumen im ersten Stock für die Elektrowerkstatt. Zu den Umbauten gehört auf Hochschulebene auch die Renovierung des AudiMax. Für die Bauphase wurde als provisorischer Ersatz ein großes Zirkuszelt auf einer Freifläche errichtet – welches den Spitznamen „TentoMax“ trägt.

Im Jahr 2019 haben am elenia 11 Mitarbeiter neu begonnen, während 6 Mitarbeiter das Institut verlassen haben. Nach Einreichung ihrer Dissertation haben in diesem Jahr 8 Mitarbeiter ihre Promotionsprüfungen erfolgreich abgeschlossen. Im Gegensatz zu dieser natürlichen Fluktuation wird das Verwaltungspersonal in der Geschäftsstelle gemeinsam mit den Professoren alt. Mit der Einarbeitung unserer neuen Mitarbeiterin Frau Droemer wurde in der Geschäftsstelle eine neue Aufgabenverteilung vereinbart. Während Frau Droemer nun das Tagesgeschäft übernimmt, konzentrieren sich Frau Schmidt und Frau Thiele auf die Bewirtschaftung der umfangreichen Drittmittelprojekte. Alles in allem war das Jahr 2019 für das elenia wieder ein hochspannendes, gleichzeitig aber auch zukunftsträchtiges Jahr, auf das wir mit Freude zurückblicken.



## Das Institut 2019

# INSTITUT FÜR HOCHSPANNUNGSTECHNIK

### 1. Reihe (oben) v.l.n.r.

Jacqueline Schmidt, Christian Ryll, Dirk Bösche, Stefanie Čelan, Dr.-Ing. Ernst-Dieter Wilkening, Henrik Herr, Sören Meyer, Robin Drees, Frederik Tiedt

### 2. Reihe (oben) v.l.n.r.

Muhamet Alija, Kerstin Rach, Julia Musebrink, Nils Gräfer, Benjamin Weber, Florian Rauscher, Julia Seidel, Petra Thiele,

### 3. Reihe (Mitte) v.l.n.r.

Björn Oliver Winter, Timo Meyer, Benjamin Kühn, Edwin Rebak, Fabian Scholz, Jonathan Ries, Elke Droemer,

### 4. Reihe (vorne) v.l.n.r.

Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat, Julia Brockschmidt, Kerstin Ryll, Olga Pronobis, Louisa Hoffmann, Nicholas Hill, Frederik Anspach,

**Nicht im Bild** Mattias Hadlak, Reinhard Meyer, Alessa Damrath

**Lehrbeauftragte** Dr.-Ing. Michael Hilbert (PTB), Dr.-Ing. Christian Schulz (TenneT), Dr.-Ing. Johannes Schmiesing (avacon)



## UND ELEKTRISCHE ENERGIEANLAGEN - elenia

Lily Kahl, Lars Claaßen, Christian Reinhold, Enno Peters, Till Garn, Frank Soyck, Jonas Wussow, Oliver Landrath, Tobias Kopp,

Hartmut Köppe, Merten Schuster, Frank Haake, Cornelius Biedermann, Lorenz Soleymani

Gian-Luca Di Modica, Melanie Hoffmann, Björn Osterkamp

Christoph Klosinski, Prof. Dr-Ing. Bernd Engel

# Zahlen und Fakten

## Die Werte des elenia

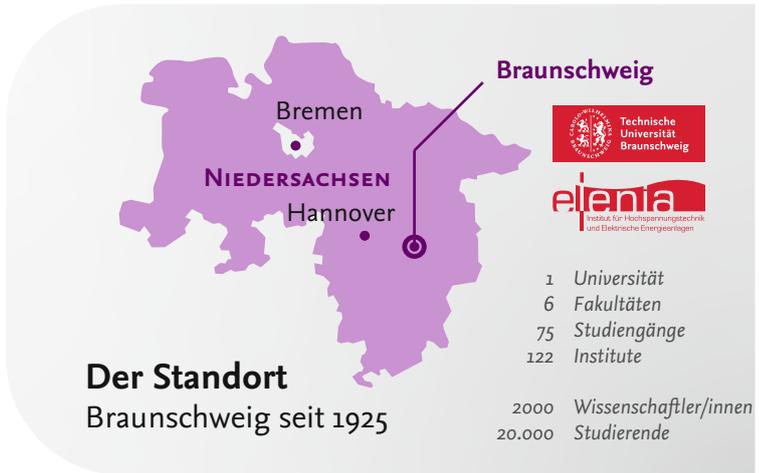
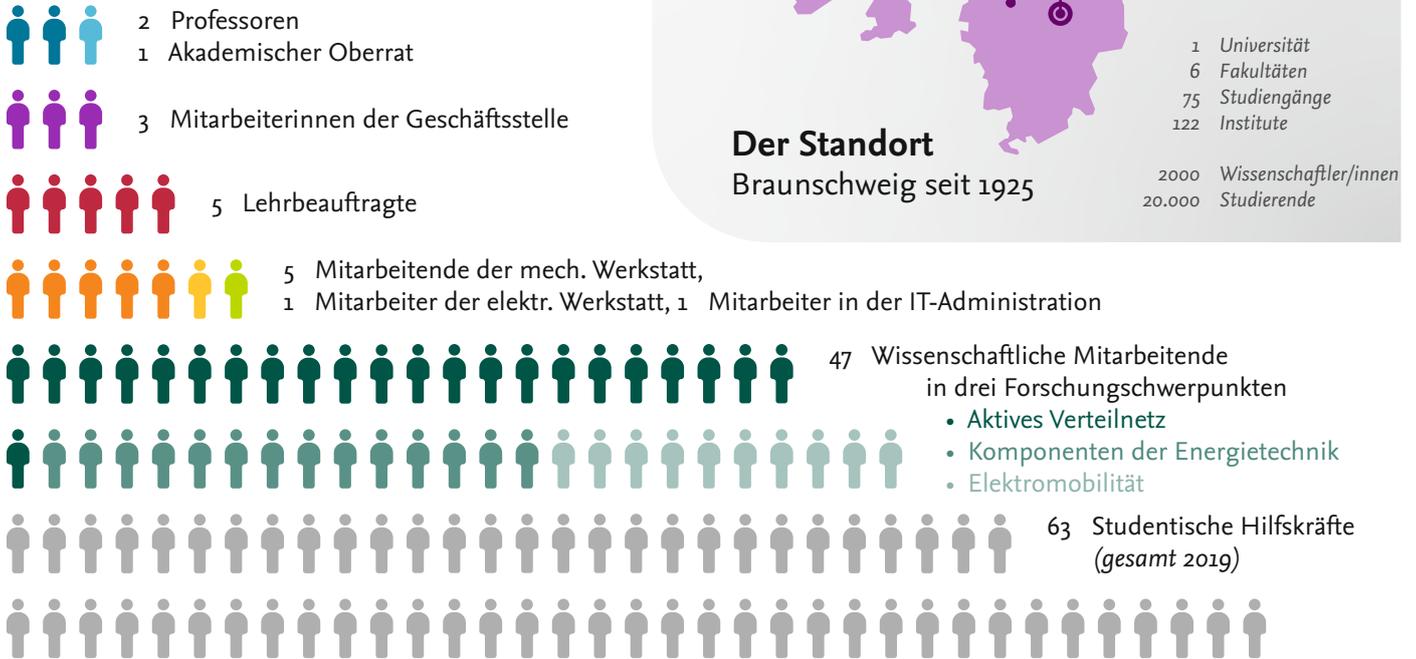
Unsere Vision



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

## Das Institut

Die Menschen am elenia im Jahr 2019



### Forschung am elenia

Drei Forschungsschwerpunkte

**Elektromobilität**

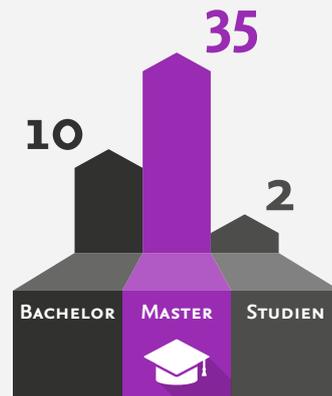
**Aktives Verteilnetz**

**Komponenten der Energietechnik**

- 19 geförderte Forschungsprojekte wurden im Jahr 2019 bearbeitet mit
- 12 Mio. Euro Drittmittelvolumen
- 83,3 Tassen Kaffee wurden dabei durchschnittlich pro Tag getrunken

### Lehre am elenia

- 20 angebotene Vorlesungen
- 4 vorlesungsbegleitende Praktika
- 2 Studienseminare



**Studentische Arbeiten**

# Neue und ehemalige Mitarbeiter

Im Jahr 2019 neu eingestellte Mitarbeiter:

## Arbeitsgruppe Energietechnologien

### SCHWERPUNKT ELEKTROMOBILITÄT



**Oliver Landrath**, B.Sc. Elektrotechnik  
Projekt/Forschungsbereich  
Fast EV, Elektrolytwetting,  
Batterietechnik  
Interessen: Tennis, Bouldern, Gitarre spielen



**Robin Drees**, M.Sc. Elektromobilität  
Projekt/Forschungsbereich  
OptiZellForm  
Formierung und Schnellladen  
Interessen: Sport, Reisen, Computerspiele

### SCHWERPUNKT KOMPONENTEN



**Frederik Anspach**, M.Sc. Elektrotechnik  
Projekt/Forschungsbereich  
Smart Modular Switchgear II  
Ausschaltverhalten von DC-Schaltgeräten  
Interessen: Sport, Geschichte, Technik, Kochen



**Lars Claaßen**, M.Sc. Elektrotechnik  
Projekt/Forschungsbereich  
Smart Modular Switchgear II  
Anlagentechnik und Gleichstromsysteme  
Interessen: Tennis, Fußball, Wintersport



**Timo Meyer**, M.Sc. Elektrotechnik  
Projekt/Forschungsbereich  
Untersuchung einer Doppel-Unterbrechung  
mit TMF-Kontakten im Vakuum  
Interessen: Fußball, Joggen, japanische Kultur

## Arbeitsgruppe Energiesysteme

### SCHWERPUNKT AKTIVES VERTEILNETZ



**Merten Schuster**, M.Sc. Wi.-Ing. Energiemanagement  
Projekt/Forschungsbereich  
Q-Integral - Aktives Blindleistungsmanagement  
Prognose von Blindleistung, Fallback-Strat.  
Interessen: -/-



**Mattias Hadlak** M.Sc. Umweltingenieurwesen  
Projekt/Forschungsbereich  
Netz- und verbraucherdienliche Integration  
von Speichersystemen in Haushalten  
Interessen: Gitarre, Fußball, Bouldern, Fitness



**Till Garn**, B.Sc. Elektrotechnik  
Projekt/Forschungsbereich  
Forschungsprojekt U-Quality  
Netzsimulationen  
Interessen: Laufen, Bouldern, Hockey



**Frederik Tiedt**, B.Sc. Wi.-Ing. ET  
Projekt/Forschungsbereich  
Einbindung und Installation von Laborkomponenten und -Software im EEL und NDL  
Interessen: Sport, Gitarre spielen, Wandern



**Cornelius Biedermann**, M.Sc. Wi.-Ing. ET  
Projekt/Forschungsbereich  
U-Quality: Auswirkungen zukünftiger  
Netznutzungsfälle der Niederspannung  
Interessen: Sport, Satire

## Folgende Mitarbeiter verließen 2019 das Institut:

Dr.-Ing. Nasser Hemdan, Dr.-Ing. Michael Hilbert, Björn Osterkamp, Ole Marggraf, Lorenz Soleymani, Christoph Klosinski

## Diese Studierenden haben 2019 als Hilfskraft am Institut mitgewirkt:

Abolaila, Saleh  
Azimzade, Ibrahim  
Bardachev, Dmitry  
Beste, Justus  
Brüggemann, Max  
Cherni, Ahmed  
Chung, Gaseng  
Clausen, Steffen  
Dabash, Ahmad  
Falinski, Marcel  
Feldt, Felten  
Flügel, Karen  
Gerig, Joel  
Gengatharan, Garsan  
Gitin, Ilja  
Goldschmidt, Robert

Hasse, Henrik  
Haßelmann, Tobias  
Hemme, Tom  
Herman, Robin Frederik  
Himstedt, Luca  
Hölk, Jan  
Jannasch, Ian Oswald  
Jäger, Jan  
Kahn, Maik Kevin  
Korff, Felix  
Körte, Christian  
Kreft, Gloria  
Kruse, Marvin  
Köhler, Heiko  
Krüger, Jan  
Lakaw, Josia David

Lütge, Chris  
Mai, Thanh  
Marquard, Lena  
Moayed, Kamyab  
Moeilsiahrodkoloi, Behrooz  
Niemann, Sönke  
Neumann, Shivananda  
Neumann, Kai  
Özdemir, Okan  
Rabe, Ann-Katrin  
Rahn, Alexander  
Rehbock, André  
Ribel, Anton  
Riechelmann, Nina Marie  
Reimers, Felix  
Sauer, Timo

Shaheen, Heeba  
Suchorukov, Vjacelsav  
Studt, Julian  
Schneider, Chris Aaron  
Themelis, Alexandros  
Torunoglu, Kenan  
Van Ohlen, Nils  
von Kölln, Kristina  
Vieth, Patrick  
Vu, David  
Walter, Hendrik  
Weinmann, Simon  
Weymann, Emil  
Xu, Zexuan  
Zeumer, Till



# Wege zum elenia I

## Mein Weg vom Studenten zum Mitarbeiter des elenia

### Vorgeschichte

Mein Name ist Frederik Anspach, ich habe mein Bachelorstudium der Elektrotechnik als duales Studium in Koblenz absolviert. Meinen Master wollte ich mit dem Schwerpunkt Energietechnik studieren. Braunschweig und die TU boten in allen Lebensbereichen ideale Voraussetzungen. Ich begann mein Masterstudium zum Sommersemester 2017.



Frederik Anspach, M.Sc.  
am elenia seit Mai 2019

### Wer bin ich und wo bin ich?

Das erste Mastersemester stand vor der Tür und die ersten Kurse mussten ausgewählt werden. Mehr oder weniger wurden die Kurse nach dem Modulnamen ausgesucht. An meinem ersten Tag konnte ich aufgrund der nicht vorhandenen Einführungswoche im SoSe noch nicht viel von der TU, geschweige denn hatte ich soziale Kontakte in meinem Studiengang. Nach einer kleinen Suche fand ich schließlich SN. 23.3 im elenia und fand mich in der Vorlesung Hochspannungstechnik II wieder. Ehrlich gesagt verging die Zeit bis zu diesem Zeitpunkt, an dem

ich jetzt hier auf diesem Stuhl sitze und meinen Erfahrungsbericht schreibe, wie im Flug.

Zurück zum Tag der ersten Vorlesung. Der erste Vorlesungsraum war gefunden, die Vorlesung machte Spaß. Die erste Angst, dass ich nichts verstehe, da ich meine BA an einer Hochschule absolviert hatte, legte sich auch. Doch die nächste Frage stand schon wieder im Raum. Wo ist die nächste Vorlesung? Gesucht war die Hans-Sommer-Straße 66. Nach kurzer Investigation auf dem Smartphone war diese auf jeden Fall nicht in der Nähe. In der kurzen Pause fragte ich meine Sitznachbarn. Mein erster sozialer Kontakt hatte stattgefunden und hält auch noch bis heute. Einer nennt sich heutzutage sogar Bürokollege.

### Studium und Abschlussarbeit

Der erste Kontakt zu Mitarbeitern des Instituts fand über mündliche Prüfungen statt. Nach der Prüfung wurden offene Gespräche über meine Interessen und zukünftigen Pläne geführt. Des Weiteren wurden mir Mitarbeiter, welche Hiwi-Jobs in meinen Schwerpunktgebieten anbieten, genannt. Letztendlich entschied ich mich für eine Hiwi-Stelle im Simulationsteam „Comsol Multiphysics“. Im Rahmen dieser Hiwi-Anstellung erlangte ich viele Kontakte am Institut. Aus diesen Kontakten ergaben sich weitere Anstellungen. Das Arbeitsverhältnis in allen Anstellungen war stets lehrreich. Die Zusammenarbeit mit den Mitarbeitern erfolgte auf Augenhöhe. Die erhaltene Wertschätzung der Arbeit war auch immer ein Motivationsschub

für das gesamte Studium. Ich kann jedem Studenten nur empfehlen einen Hiwi-Job anzutreten, man erhält sehr viel spannendes Wissen und trainiert das wissenschaftliche Arbeiten. Diese Vorteile helfen bei der Prüfungsvorbereitung und der Abschlussarbeit. Aufgrund der guten Vernetzung am Institut konnte ich mein Masterarbeitsthema schnell finden und zum Teil mitgestalten. Während der Masterarbeit wurde ich umfangreich betreut. Ich konnte neben meinem Betreuer mit vielen anderen Mitarbeitern meine Ergebnisse diskutieren und fühlte mich dabei immer ernstgenommen. Das elenia ermöglicht dem Studenten eine sehr interaktive Abschlussarbeit. Währenddessen lernt man auch noch andere Dinge außer eine gute Masterarbeit zu verfassen.

### Anstellung am Institut

Bereits im Vorfeld meiner Masterarbeit bestand ein beidseitiges Interesse auf eine Zusammenarbeit über das Studium hinaus. Die absolvierte Masterarbeit wurde auf den eventuellen späteren Tätigkeitsbereich abgestimmt. Des Weiteren durfte ich auch schon in einige Arbeitsbereiche eintauchen. Dadurch konnte ich mich versichern, ob das wissenschaftliche Arbeiten zu mir passt. Was soll ich sagen, es hat zu mir gepasst. Am Ende Masterarbeit bewarb ich mich offiziell auf eine Anstellung als wissenschaftlicher Mitarbeiter. Die Bewerbungsgespräche mit Prof. Dr. Kurrat waren sehr offen und ungezwungen: Letztendlich begann ich zum 1.05.2019 meine Arbeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter.



# Wege zum elenia II

## Meine Entwicklung vom Vollzeitstudenten zum Teilzeitmitarbeiter

### Die Zeit vor dem elenia

Nach dem Abitur musste ich mir Gedanken über meinen weiteren Weg machen. Dabei war mir wichtig eine Tätigkeit zu finden, die mir liegt und Spaß macht. Nach ausführlicher Recherche entschied ich mich mein Interesse am Naturwissenschaftlichen und meine Freude am sprachlichen in der Laufbahn eines Patentanwaltes zu kombinieren. Dafür brauchte ich zunächst ein Ingenieursstudium. Also entschied ich mich Elektrotechnik in Braunschweig zu studieren. Nun startete ich mein Bachelorstudium mit einem vagen Plan in entfernter Zukunft Patentanwalt zu werden. Und nachdem man gefühlt gerade erst angekommen war, musste man sich im fünften Semester eine Vertiefungsrichtung suchen. Darin sah ich zunächst eine unerwartete Herausforderung. Im Grundstudium hat man viele der Vertiefungsrichtungen kaum kennengelernt und aufgrund meines Berufswunschs war ich auch für keine Vertiefung prädestiniert. Also besuchte ich zunächst einfach Vorlesungen, die mich interessierten. Hier stieß ich dann auf meine ersten Vorlesungen am elenia.

### Warum das elenia?

Die Auswahl an elektrotechnischen Instituten an der TU Braunschweig ist groß. Das elenia stach allerdings in den Vorlesungen, die ich besuchte direkt heraus. Zum einen durch die thematische Nähe an der Energiewende und den engen Bezug der Lehre auf die Herausforderungen durch dieses Thema. Zum anderen im Aufbau der Vorlesungen und der

Mühe die dort hineingesteckt wird.

Da mir das Institut von der Thematik aber auch vom Lehrstil gefiel entschied ich mich hier meine Bachelorarbeit zu schreiben. Dafür schrieb ich eine Mitarbeiterin an, die ich aus der Übung kannte. Leider hatte sie gerade kein passendes Thema für mich. Aber sie gab meine Anfrage weiter und so bekam ich zwei Rückmeldungen, die thematisch ähnlich genug waren, um sie in einer Bachelorarbeit zu kombinieren. So kam ich in den Genuss von zwei Betreuern.



Till Garn, B.Sc.  
am elenia seit April 2019

### Von der Abschlussarbeit zur Anstellung

In der Bachelorarbeit habe ich schon sehr eng mit meinen Betreuern zusammengearbeitet. Es fanden viele Treffen statt und ich hatte ein sehr interessantes Thema erwirbt. Da mir die Tätigkeiten während meiner Bachelorarbeit gefielen nahm ich das Angebot an, am elenia als HiWi weiterzuarbeiten. Als HiWi konnte ich direkt an meine während der Bachelorarbeit gesammelten Erfahrungen anknüpfen. Die Simulationstools, die

ich vorher schon genutzt habe konnte ich durch neue Arbeitsaufträge genauer kennenlernen und zusammen mit meinem Betreuer arbeitete ich meine Ergebnisse aus der Bachelorarbeit für eine Veröffentlichung in Form eines Kongresspapers aus. Im Anschluss an das Bachelorstudium spezialisierte ich mich im Master auf Energietechnik und fuhr mit meiner HiWi-Tätigkeit fort. Mein Betreuer kam nun so langsam auch in die Endphase seiner Dissertation und es gab viel zu tun. Ich habe weiterhin viel simuliert und die Ergebnisse graphisch dargestellt, habe aber auch erste Erfahrungen im Labor sammeln können. Im November 2018 wurde ich dann gefragt, ob ich mir vorstellen könne neben dem Studium halbtags am elenia zu arbeiten. Da mir die Arbeit sehr gefiel und ich mir auch vorstellen konnte nach dem Studium zu promovieren bewarb ich mich auf die vorgeschlagene Stelle.

### Arbeit und Studium

Schon in meinem Vorstellungsgespräch ging es darum wie sich Studium und Halbtagsjob zusammen gestalten würden. Es wurde auch klargestellt, dass das Studium noch meine Hauptbeschäftigung sein sollte. Am 01.04. dieses Jahres fing ich dann an neben dem Studium 20 Stunden die Woche am elenia zu arbeiten. Natürlich stellte dies erstmal schon eine Herausforderung dar, aber man wächst ja bekanntlich mit seinen Aufgaben. Die Erfahrungen und der tiefere Einblick in die Forschung den ich jetzt bekommen kann ist es jedoch auf jeden Fall wert.

## Energiewirtschaft und Energiemanagement

Energiemanagement für Prosumer	18
Simulationsumgebung eSE	20

## Netzdynamik und Systemstabilität

Robuster Netzbetrieb	22
Netzregelung mit Umrichtern	24
Regelleistung mit PV-Anlagen	26

## Netzbetrieb und Netzplanung

Spannungsqualität im Netz	28
Sektorkopplung in Haushalten	30
Blindleistungsmanagement	32

## Elektromobilität

Netzintegration Elektromobilität	36
lautlos&einsatzbereit	38

ARBEITSGRUPPE  
ENERGIESYSTEME

# Forschung

# 2

**Batterietechnik**

Second Life Speichersysteme	40
Optimierte Zellformierung	42
Wissensbasierte Batteriezellproduktion	44
Qualitätsanalyse in der Zellproduktion	46

**Gleichstromsysteme**

Smart Modular Switchgear II	48
Systems Engineering	50

**Anlagentechnik**

Bewegung von Vakuumbögen	52
Blitzstromableiter	54
Universal Power Switch	56
Forschungsbereich Plasmen	58

**Hochspannungstechnik**

Dielektrische Festigkeit	60
--------------------------	----

**Promotionen (beide Arbeitsgruppen)**

Nicholas Hill - Eine kalte Promotion	62
Tobias Marseille - Vakuumschalter	63
Ole Binder - HGÜ	64
Uwe Westerhoff - Batterietechnik	65
Jan Mummel - Elektromobilität	66
Ole Marggraf - Spannungsregelung	67
Stephan Diekmann - Energiemanagement	68
Daniel Unger - Solarstromspeicher	69

**Veröffentlichungen (beide Arbeitsgruppen)**

74

Unsere Forschungsprojekte und -themen bilden den Kern unserer Arbeit am elenia. In zwei Arbeitsgruppen und drei Forschungsschwerpunkten – **Aktives Verteilnetz**, **Elektromobilität** und **Komponenten der Energieversorgung** – stellen wir uns immer wieder neuen Herausforderungen der Energiewende. Der Schwerpunkt Aktives Verteilnetz umfasst bspw. Forschungsthemen zu Prosumerhaushalten, Energiewirtschaft, dynamischem Verhalten von Umrichtern oder

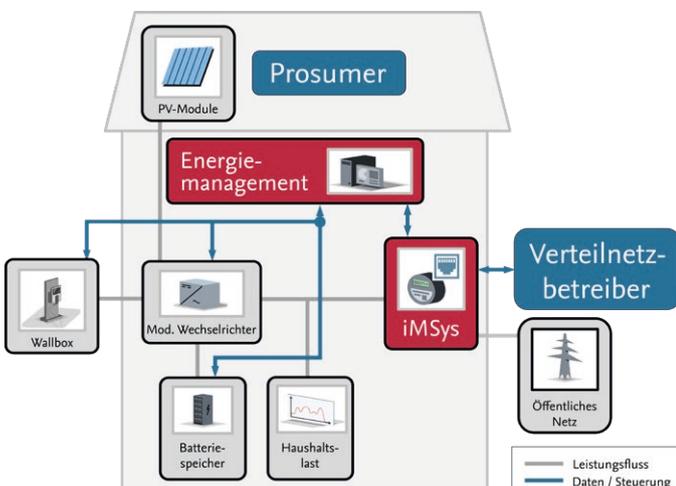
Blindleistungsmanagement. Als Schnittpunkt zwischen den beiden Arbeitsgruppen deckt der Schwerpunkt Elektromobilität sowohl die Netzintegration von Elektrofahrzeugen als auch die Batterietechnik ab. Im Schwerpunkt Komponenten der Energieversorgung wird an Gleichstromsystemen, Vakuumbögen, ebenso wie an Schalter- und Hochspannungstechnik geforscht. Außerdem konnten in diesem Jahr acht Mitarbeiter ihre Promotion erfolgreich abschließen.



# Energiemanagement für Prosumer

Entwicklung (netzdienlicher) Betriebsstrategien zur Bestimmung des Netzverhaltens zukünftiger Prosumer-Haushalte

In einem Energiesystem mit zeitweise 100 % Energieeinspeisung aus regenerativen Energien spielen auf Haushaltsebene installierte Erzeugungsanlagen, ergänzt um Speicherkonzepte wie (2nd-use-)Batteriespeicher aus Netzsicht eine entscheidende Rolle. Die technischen Komponenten (siehe Abbildung) können beispielsweise zu einer Begrenzung der Austauschleistung am Netzanschlusspunkt auch bei hoher Anschlussleistung der Elektromobilität (20 kW und mehr) genutzt werden und so Netzausbau vermeiden oder zeitlich verzögern. Zum anderen können Prosumer das Netz stützen, in dem sie Netzsystemdienstleistungen wie spannungsabhängige Blindleistungsbereitstellung, Kurzschlussleistung im Fehlerfall oder Flexibilitätsangebote für die Nutzung durch Aggregatoren erbringen. Voraussetzung ist die Koordinierung der Leistungsflüsse sowohl intern (zwischen Erzeugungsanlagen und angeschlossenen Verbrauchern) als auch in Richtung Netz mittels intelligenter und vernetzter Steuerungs- bzw. Energiemanagementsysteme (EMS).



Komponenten des im Projekt NetProsum2030 betrachteten Prosumer-Haushalts

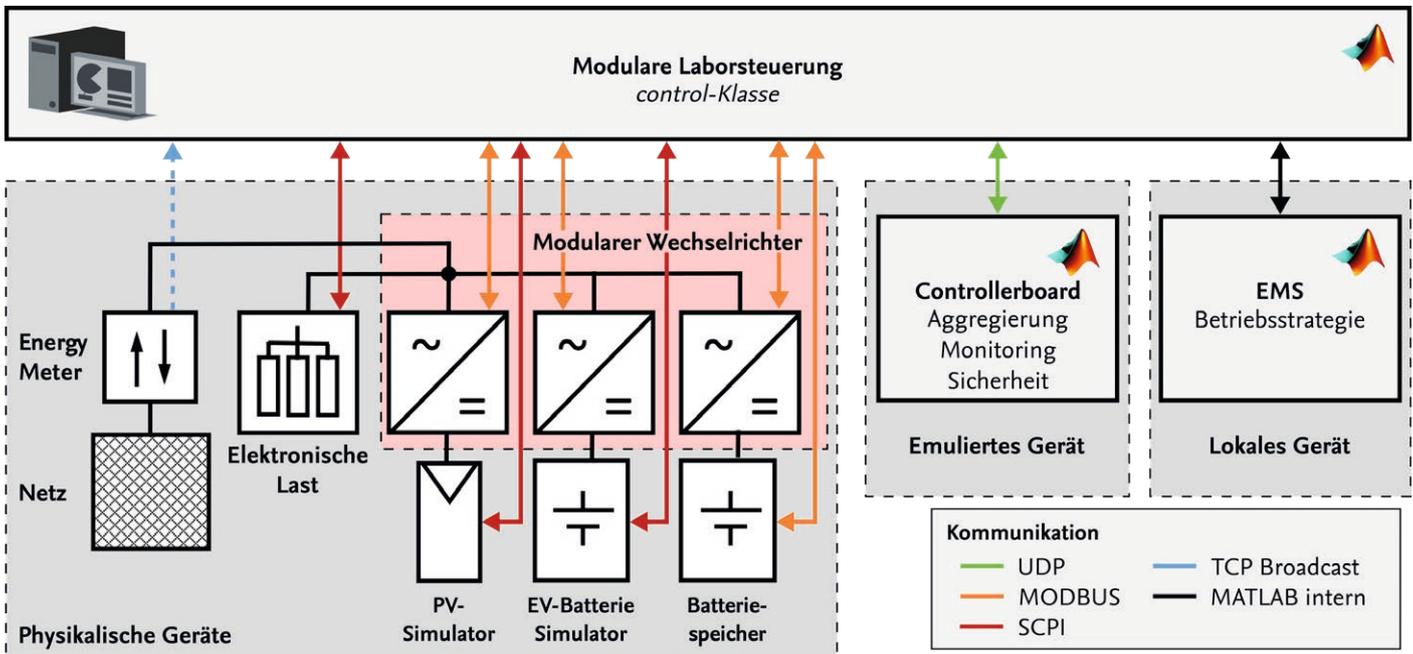
Durch die Vernetzung von EMS über ein intelligentes Messsystem (iMSys) wird dem Netzbetreiber erstmalig die Möglichkeit gegeben, auf den unteren Spannungsebenen individuelle und gezielte netzdienliche Vorgaben zu implementieren (z.B. durch die Vorgabe von „netzdienlichen Soll-Profilen“).

## Dimensionierung der PV-Anlage und des Speichers

Für die Dimensionierung der Komponenten (PV-Anlage, Batteriespeicher) und damit auch für die technischen Möglichkeiten netzdienlich zu agieren ist aus Anlagenbetreibersicht die Wirtschaftlichkeit des getätigten Invests von entscheidender Bedeutung. Mittels der am elenia entwickelten **Simulationsumgebung eSE** und der darin integrierten Modelle für die Erzeugungskomponenten und hinterlegten Last- und Einstrahlungsprofilen wurden die Wirkleistungsverläufe zwischen den Komponenten an insgesamt neun Typtagen bei Eigenverbrauchsoptimierung simuliert und anschließend zu Jahresprofilen zusammengefügt. Darauf aufbauend wurde mittels eines im Rahmen einer Studienarbeit entwickelten Berechnungstools die sich über 20 Jahren ergebenden Kapitalwerte für unterschiedliche PV-Anlagen- und Speicherkonfigurationen berechnet (siehe Abbildung). Der Kapitalwert stellt einen Indikator für die Wirtschaftlichkeit der Gesamtinvestition im Vergleich zu einer herkömmlichen Anlagemöglichkeit dar.



Iterativer Prozess zur Ermittlung eines wirtschaftlichen Optimums für PV-Anlage und Speicher

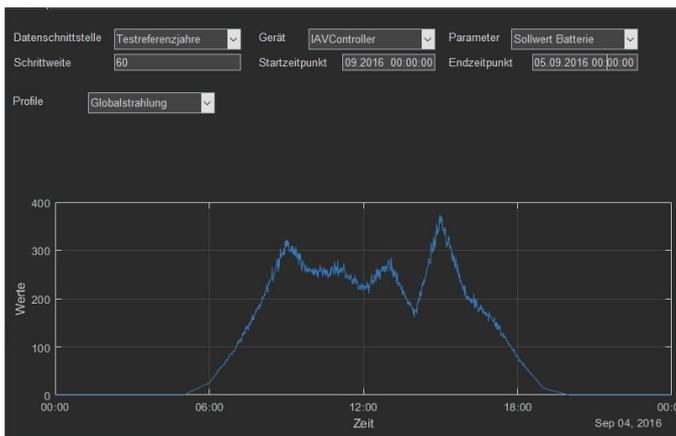


Demonstratoraufbau - Nachbildung eines Prosumer-Haushalts im Energiemanagementlabor

Für den betrachteten Prosumer-Haushalt und unter den angenommenen Randbedingungen konnte ein Optimum von 9,9 kWp für die PV-Anlage (PVA) und 12,5 kWh nutzbare Kapazität für den Batteriespeicher ermittelt werden. Die wirtschaftlich gesehen optimale Kapazität dient im Projekt als Eingangsgröße zur Auslegung eines innovativen 2nd-use-Speichers, welcher in der praktischen Nachbildung des Prosumer-Haushalts auf Laborebene Anwendung findet.

### Praktische Realisierung im Energiemanagementlabor

Für die Demonstration des netzdienlichen Verhaltens des Prosumer-Haushalts in unterschiedlichen Netzsituationen ist in der Schlussphase des Projektes ein Gesamtsystemtest auf Laborebene geplant. Der Labor- bzw. Demonstratoraufbau (siehe Abbildung) umfasst das am elenia entwickelte EMS, einen am IMAB entwickelten modularen Wechselrichter, welcher gegenüber herkömmlichen Wechselrichtern eine höhere Effizienz und mehr Möglichkeiten in der Steuerung von Leistungsflüssen bietet, als auch eine Möglichkeit zum normkonformen Laden eines Elektroautos. Die Messwertaggregation innerhalb des Aufbaus als auch sicherheitsrelevante Funktionen wie das Abschalten einzelner Leistungsmodul bei Überlast o.ä. werden von einem Controllerboard übernommen, welches vom Projektpartner IAV entwickelt wird. Durch die Vorgabe von Einstrahl- und Lastprofilen können unterschiedliche Leistungsflusssituationen gezielt hervorgerufen werden und die Reaktion des EMS (basierend auf der jeweilig gewählten Be-



triebsstrategie) ausgewertet werden. Die zeitlich koordinierte Ansteuerung der Last sowie des PV-Simulators erfolgt über die entwickelte modulare **Laborsteuerung ModSys**.

Zur Durchführung eines ersten Tests wurde ModSys genutzt, das zum derzeitigen Zeitpunkt noch nicht als Prototyp zur Verfügung stehende Controllerboard zu emulieren. Durch die Emulation konnte die Nachrichtenmatrix, welche zum Austausch der aggregierten Messwerte des Controllerboards und der vom EMS errechneten Leistungs-Sollwerte erstellt wurde, implementiert und vorab erfolgreich getestet werden.

### Ausblick: Entwicklung netzdienlicher Betriebsstrategien

Innerhalb der nächsten Monate steht die (Weiter-)Entwicklung und Implementierung netzdienlicher Betriebsstrategien im Fokus. Hierzu zählt die Integration einer Last- und Erzeugungprognose, mittels derer aus Anlagenbetreibersicht Abregelungsverluste minimiert und aus Netzbetreibersicht Einspeise- und Lastspitzen geglättet werden können. Neben der Prognose und der Einspeisung von Wirkleistung soll außerdem analysiert werden, welche Optionen die Verwendung eines modularen Wechselrichters in Bezug auf das Anbieten von Flexibilität sowie das zur Spannungshaltung eingesetzte Blindleistungsmanagement gibt.



### Projektsteckbrief

**Projektname**  
NetProsum2030

**Projektlaufzeit**  
September 2017 – August 2020

### Projektpartner

IMAB – Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen, IAV (Ingenieurgesellschaft Auto und Verkehr), SMA Solar Technology

### Kontakt

Jonathan Ries  
jonathan.ries@tu-bs.de  
+49 531 - 391 9714

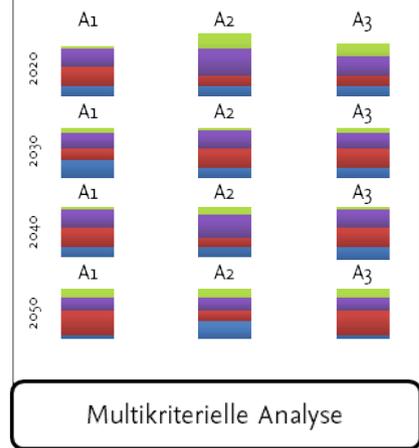
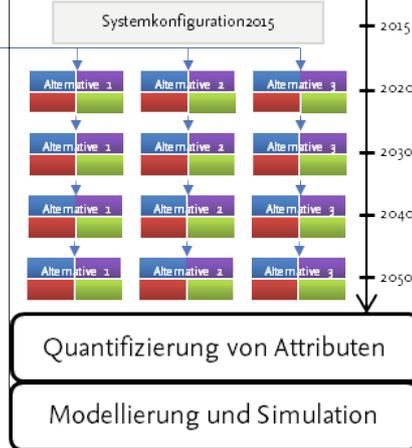
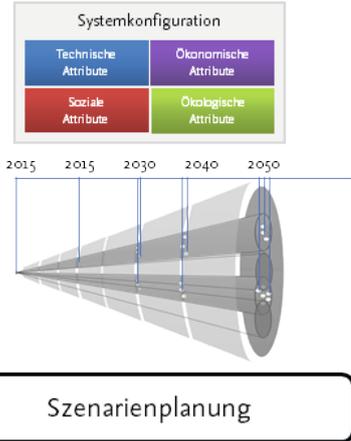


Gefördert durch:  
Bundeministerium für Wirtschaft und Energie  
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

**Qualitative Systembeschreibung**

**Quantitative Systembeschreibung**

**Systembewertung**



# Simulationsumgebung eSE

Simulationsumgebung für elektrische und thermische Anlagen innerhalb vernetzter Systeme

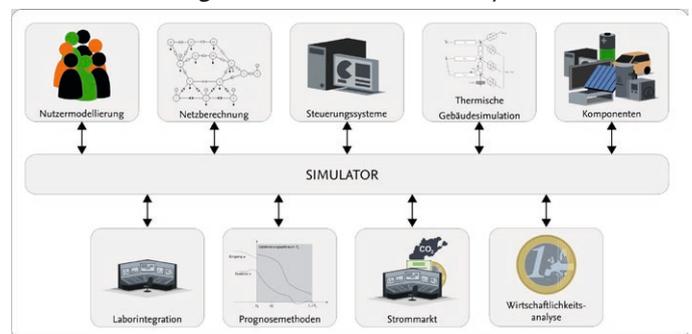
## NEDS - Nachhaltige Energieversorgung Niedersachsen

Das Forschungsprojekt NEDS – Nachhaltige Energieversorgung Niedersachsen setzte sich innerhalb eines interdisziplinären Forschungsteams die Zielsetzung, denkbare Transitionswege hin zu einer auf erneuerbare Energien basierenden Stromversorgung in Niedersachsen bis 2050 zu entwickeln und auf ihre Nachhaltigkeit und Umsetzbarkeit zu untersuchen. Zur Beantwortung der vielfältigen Fragestellung wurde ein spartenübergreifendes Systemmodell für das niedersächsische Stromversorgungssystem im Konsortium entwickelt.

Das elenia untersuchte in den vier Jahren die technischen und wirtschaftlichen Auswirkungen einer ganzheitlichen Netzintegration von vernetzten Gebäuden mit Komponenten, wie zum Beispiel Elektromobilität, Wärmepumpen und elektrische und thermische Speichersysteme in der Niederspannungsebene, sowie die koordinierte und multikriterielle Steuerung über ein agentenbasiertes, verteiltes Optimierungsverfahren. In einem intensiven Austausch mit der Abteilung für Psychologische Methodenlehre und Biopsychologie (IPMB) der TU Braunschweig wurde ein detailliertes Nutzermodell mit einer empirischen Datenbasis entwickelt, welches ermöglicht, dass heterogene Verhalten von verschiedenen Nutzergruppen parametrierbar und wissenschaftlich fundiert zu gestalten. Zusätzlich gelang es, eine Schnittstelle zwischen der im Rahmen des Forschungsprojektes entwickelten Simulationsumgebung eSE und der Co-Simulationsplattform mosaik vom OFFIS zu etablieren. Dadurch ist man in der Lage, komplexe Simulationsszenarien in der Niederspannungsebene und Koordinationsmechanismen zwischen verschiedenen Steuerungsebenen zeitlich hochauflösend zu untersuchen. Insbesondere wurden die Einsatzmöglichkeiten von Flexibilitäten aus Anlagen von Gebäuden für netzdienliche- und marktorientierte Zielsetzungen betrachtet. Als zentrales Ergebnis kann festgehalten werden, dass sich Technologien ohne einen hohen Grad an Nutzerinteraktion für einen sekundären Verwendungszweck in der Netzebene kostengünstig einsetzen lassen.

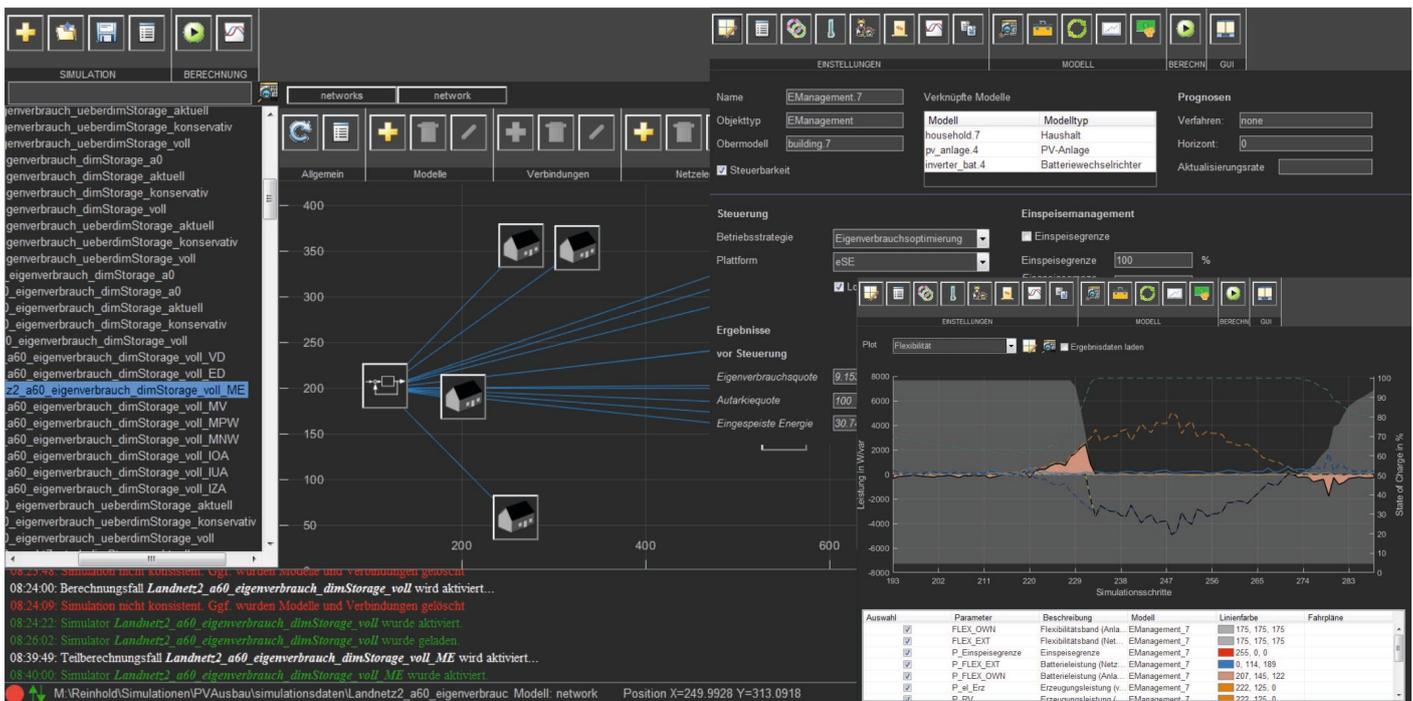
## eSE – elenia Simulation Environment

Für die Untersuchungen und Kopplungen mit anderen Plattformen, wie zum Beispiel mosaik, wurde die modulare Simulationsumgebung eSE – elenia Simulation Environment vom elenia entwickelt. Die primäre Aufgabe ist die energetische Nachbildung von Steady-State-Modellen elektrischer und thermischer Anlagen in unterschiedlichen Systemebenen und



Modulstruktur von eSE

die Verschaltung zu komplexen Systemen. Zusätzlich wurden über die Anforderungen des Projektes hinaus, Schnittstellen zu anderen Modulen, wie zum Beispiel zu einer Netzberechnung basierend auf MATPOWER oder einer thermischen Gebäudesimulation entwickelt. Darauf aufbauend ist man in der Lage Steuerungs- und Koordinationsmechanismen für unterschiedliche Betrachtungsebenen zu entwickeln und zu untersuchen. Als zentrale Einheit zwischen den Modulen fungiert der sogenannte Simulator, welcher den Datenfluss und die Prozessabfolge verwaltet. Zur nutzerfreundlichen Bedienung von eSE wurde eine MATLAB-basierte grafische Oberfläche entwickelt, welche die Methoden und Strukturen der jeweiligen Module und des Simulators verwaltet. Zusätzlich ermöglicht die Oberfläche eine kurze Einarbeitungszeit für Studierende und wissenschaftliche Mitarbeiter, sowie das Erzeugen von hochskalierten Simulationsszenarien mittels zugeschnittener Ansichten. Die Darstellungen von Zeitreihen und das



### Grafische Benutzeroberfläche der elenia Simulation Environment eSE

Bilden von Kennzahlen der berechneten Simulation kann unmittelbar durch ein integriertes Auswertungsmodul durchgeführt werden.

Neben den Arbeiten im Forschungsprojekt wurde die Umgebung in einer Vielzahl von studentischen Arbeiten eingesetzt und weiterentwickelt, sowie in der Dissertation von Herrn Stephan Diekmann mit dem Fokus von skalierbaren Energiemanagementsystemen in Mehrfamilienhäusern für Mieterstromkonzepte erprobt. Ebenfalls wurden die Systemsimulationen im Forschungsprojekt NetProsum2030 mit eSE erfolgreich für ein Prosumer-Haushalt mit einem Multifunktionswechselrichter durchgeführt.

### ModSys-eelabs

Außerhalb des Forschungsprojektes NEDS, wurde das Modul Laborintegration von eSE in einer gemeinsamen Arbeit von Henrik Herr, Christian Reinhold und Jonathan Ries die modulare Steuerungsumgebung ModSys eelabs entwickelt. Es wurde für den Zweck konzipiert, die komplexen und zeitaufwändigen Versuche in der Laborumgebung nahezu zu automatisieren. In einer Master-Slave Architektur in MATLAB kann eine Steuerungsklasse mit den Hardwaregeräten im eelabs kommunizieren werden. Die programmierten Protokollschnittstellen konvertieren die gesendeten Nachrichten in das Protokollformat des Gerätes, wie zum Beispiel MODBUS, UDP oder TCP/IP. Durch die flexible Verknüpfung von Signalen in ModSys können auch abgefragte Messwerte zu anderen Geräten gesendet werden und abgeleitete Größen gebildet werden, um selbstprogrammierte Steuerungssysteme umzusetzen..

Das Ziel besteht darin alle verfügbaren Geräte, wie zum Beispiel Wechselrichter, DC-Quellen und AC-Lasten, in die Umgebung zu integrieren, so dass eine Verwendbarkeit der Geräte ohne eine lange Einarbeitungszeit garantiert werden kann. Neben der Implementierung der Hardwaregeräte wurden Strukturen und Methoden entwickelt die Simulationsmodelle aus eSE unmittelbar in kombinierten Untersuchungen im Labor einzusetzen. Das Konzept und erste Untersuchungen mit ModSys wurden auf dem diesjährigen ETG Kongress in Stutt-

gart-Esslingen präsentiert.

### Zukünftige Arbeiten

Die Simulationsumgebung eSE und die modulare Laborsteuerung ModSys-eelabs erweitern nachhaltig das Werkzeugportfolio im Bereich der Simulations- und Modellierungstechnik am elenia. In den weiteren Jahren wird der Funktionsumfang sukzessive erweitert, um in der Lage zu sein, ein breites Spektrum an Fragestellungen zu untersuchen. Erfreulicherweise können die gemachten Erfahrungen und Entwicklungen in zukünftigen Forschungsprojekten flexess, Energy-4-Agri, Si-NED und Zukunftslabor Digitalisierung Energie eingesetzt werden.



gefördert durch das Niedersächsische Ministerium für Wissenschaft und Kultur im Rahmen des Niedersächsischen Vorab



### Projektsteckbrief

**Projektname**  
NEDS  
Nachhaltige Energieversorgung  
Niedersachsen

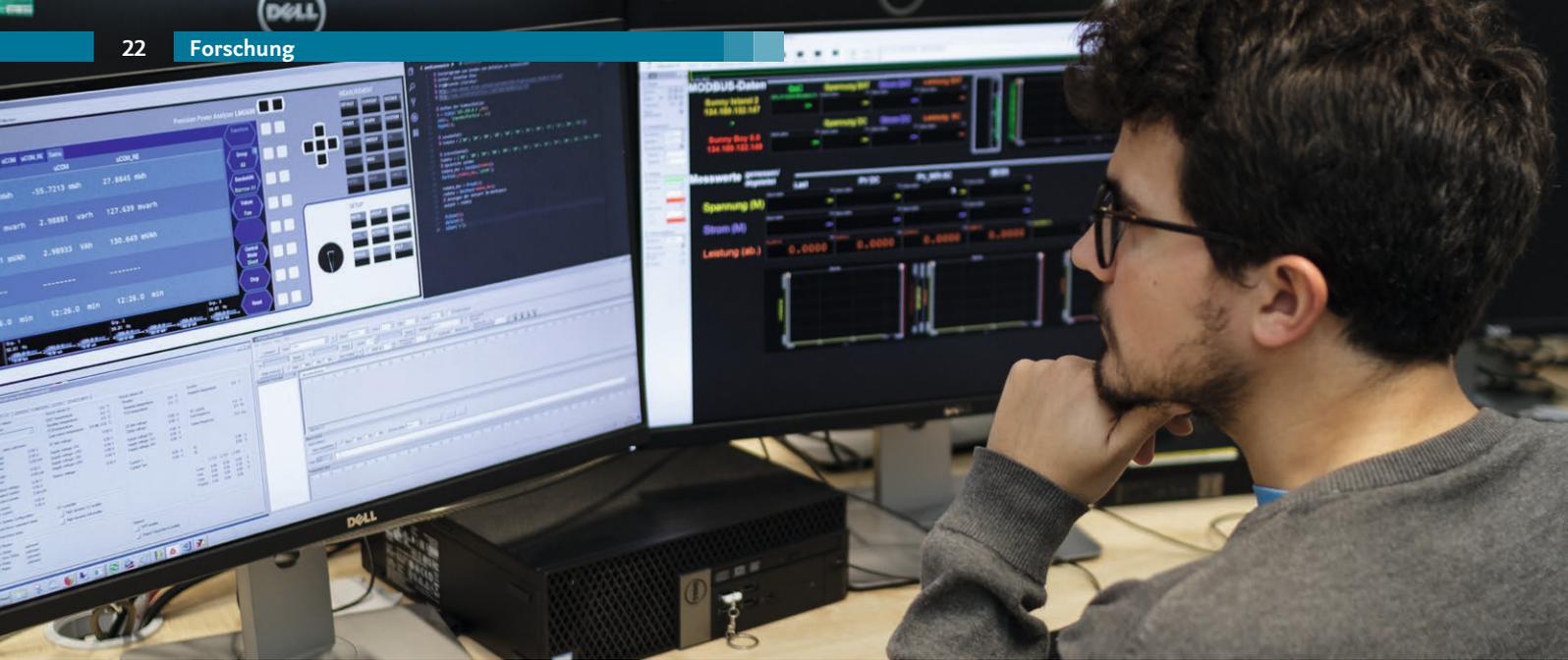


**Projektlaufzeit**  
April 2015 – Juli 2019

**Projektpartner**  
TU Braunschweig, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Universität Duisburg-Essen, Leibniz Universität Hannover, OFFIS e.V.

**Kontakt**  
Christian Reinhold  
c.reinhold@tu-braunschweig.de  
+49 531 - 591 9716

[www.neds-niedersachsen.de](http://www.neds-niedersachsen.de)



# Robuster Netzbetrieb

## Hochverfügbarer Verteilungsnetzbetrieb bei Störung der IKT-Infrastruktur im Smart Grid

Die Verteilungsnetze der Zukunft zeichnen sich durch eine hohe Anzahl von erneuerbaren Energieanlagen und dezentralen Netzteilnehmern wie Elektrofahrzeugen, Speichern und regelbaren Lasten aus. Auch eine Vielzahl neuer Akteure wie beispielsweise Betreiber virtueller Kraftwerke oder auch Smart Meter Gateway Administratoren bilden vielfältige Schnittstellen zu diesem feingranularen Systemaufbau. Damit einher geht eine zunehmende Vernetzung mittels Informations- und Kommunikationstechnik (IKT). Diese ist im Sinne des anvisierten zukünftigen Gesamtkonstruktes Smart Grid und zur Koordination der heterogenen Technologien mit meist volatilem Verhalten sowie einer Vielzahl neuer Marktakteure und Marktprozesse notwendig. Das Verhalten wetterabhängiger Anlagen lässt sich noch einigermaßen gut prognostizieren. Bei komplexen Marktprozessen mit heterogener Akteursvielfalt ist jedoch angesichts der grundlegenden Funktionsprinzipien des aktuellen Energieversorgungssystems umso wichtiger, auf eine vernetzte Sensorik und Aktorik zurückgreifen zu können. Neben dem traditionellen Ziel der Versorgungssicherheit gewinnt der Aspekt der informationstechnischen Sicherheit folglich zunehmend an Bedeutung.

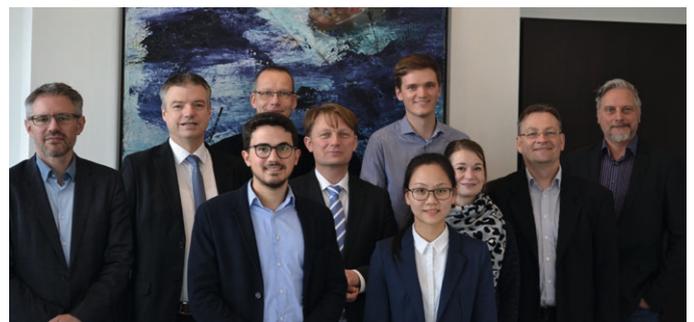
### Das Projekt IKTfree und dessen Beitrag zur Energiewende

Das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderte Projekt IKTfree beschäftigt sich mit dem Beitrag der verteilten Ressourcen im elektrischen Verteilungsnetz, um die Bereitstellung von Maßnahmen, die einen stabilen Betrieb über einen möglichst langen Zeitraum bei einem Ausfall der Kommunikationsinfrastruktur ermöglichen. Angesichts der höheren Anzahl von dezentralen Erzeugungsanlagen und Netzteilnehmern im Verteilungsnetz und der stärkeren Abhängigkeit der Informations- und Kommunikationsinfrastruktur durch die Umsetzung von Smart Metern, spielt diese Thematik eine immer wichtigere Rolle auf der energiepolitischen Ebene. Deshalb untersucht das Institut für Vernetzte Energiesysteme des DLR gemeinsam mit dem Institut für Hochspannungstechnik und Elektrische Energieanla-

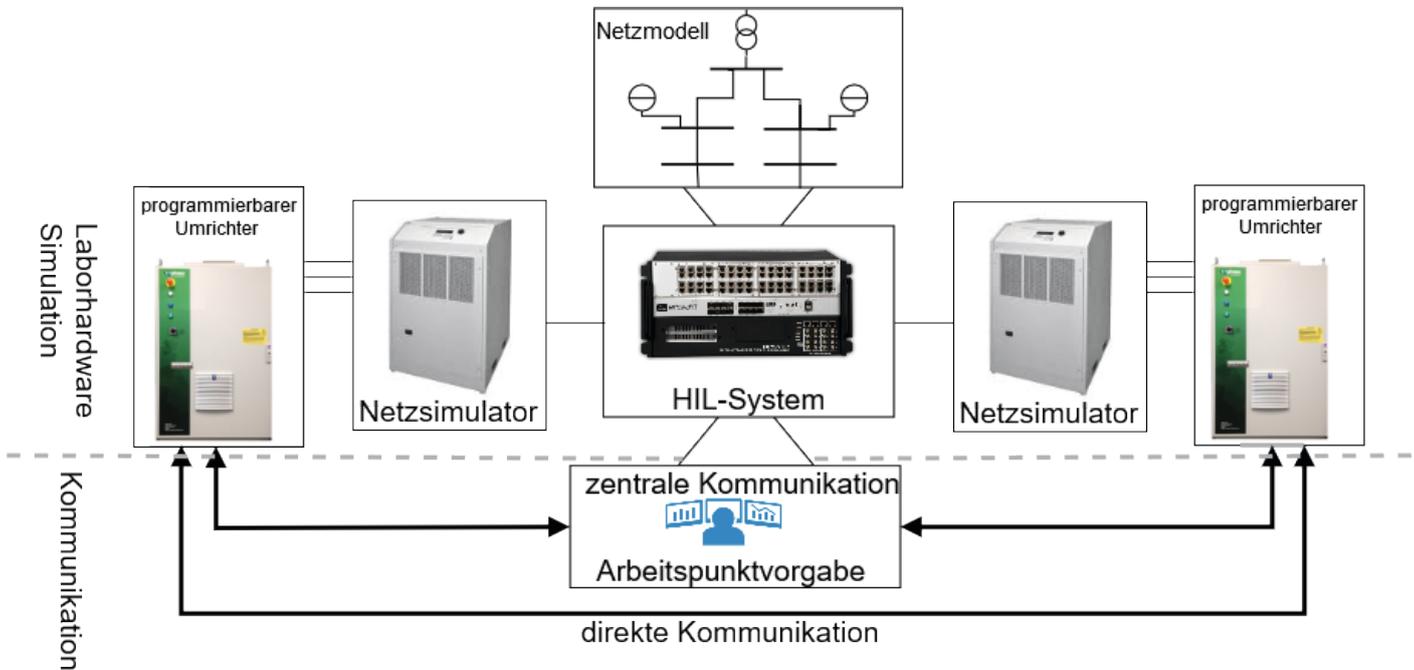
gen (elenia) als Projektpartner das Verhalten von verschiedenen Betriebsmittel bei gestörten IKT-Anbindung und erstellen Handlungsempfehlungen für einen stabilen Netzbetrieb. Darüber hinaus wird das IT-Risiko im Verteilungsnetz analysiert. Bislang wurden die Versorgungssicherheit und IKT-Sicherheit im Smart Grid in der Forschungslandschaft meistens für kritische Infrastruktur und Komponenten mit robuster IKT behandelt. Das vorgestellte Projekt sollte eine Analyse der Komponenten der letzten Meile des Verteilungsnetzes durchführen, um einen Notbetrieb für den Fall eines Wegfalls der IKT zu entwickeln und so zu einer Optimierung des Verteilungsnetzbetriebs beitragen.

### Was ist im Jahr 2019 geschehen?

In den letzten Monaten waren große Aktivitäten in Bezug auf die Organisation und Abstimmung des Projektes zu verzeichnen. Im Rahmen des Kick-Off-Treffens lernten sich die verschiedenen Partner persönlich kennen und tauschten Erfahrungen, Standpunkte und Erwartungen bezüglich der Projektergebnisse aus. Periodisch geplante Arbeitstreffen und Telefonkonferenzen baten die Möglichkeit, die Bearbeitung der verschiedenen Arbeitspakete abzustimmen und die Entwicklung des Projektes zu verfolgen. Verschiedene Netzzustände wurden mittels eines Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) identifiziert und mit Hilfe von Risikoprioritätszahlen



Das Projektteam beim Projekt-Kickoff in Oldenburg



Schematische Darstellung des Laborversuchs

gewichtet und deren Bedrohungspotential beschrieben. Für das Jahr 2019 waren zwei Fortbildungsmaßnahmen vorgesehen: Schulungen für zu verwendende Software und für ein neues Echtzeitsimulations-Laborgerät ermöglichten die Projektbearbeiter, ihre Kenntnisse und Fähigkeiten in diesen Bereichen zu vertiefen und zu erweitern.

Im Rahmen eines Expertenworkshops beim VDE-FNN in Berlin wurde das Projekt und dessen Stand vor FNN-Mitgliedern vorgestellt. Die daraus resultierenden Diskussionen ermöglichten einen Austausch mit den Teilnehmenden und darüber hinaus konnte wertvoller Input für das Projekt mitgenommen werden.

In Bezug auf die Bekanntgabe des Projektes wurde es am 19. Februar 2019 am EFZN-Forschungstag an der TU Braunschweig vorgestellt. Ein weiterer wichtiger Schritt war die Annahme des Posters „Szenarientwicklung zur Untersuchung sicherheitskritischer Zustände in IKT-gestützten Verteilnetzen“, dass auf der kommenden Tagung „Zukünftige Stromnetze 2020“ präsentiert wird. Um eine größere Verbreitung zu erreichen, wurde eine Projektwebsite entworfen, die alle relevanten Daten des Projektes sowie die daraus resultierenden verschiedenen Veröffentlichungen enthält ([www.iktfree.de](http://www.iktfree.de)).

### Was liegt vor uns?

Das Projektteam blickt dem Jahr 2020 gespannt entgegen. Nachdem die relevanten Szenarien, Komponenten und Parameter in den vorherigen Arbeitspaketen identifiziert wurden, plant das Team die ersten Simulationen für die kommenden Monate. Das Interesse an diesen Simulationen liegt daran, die Auswirkungen im Verteilungsnetz wegen eines Fehlereintritts in der IKT-Infrastruktur zu bewerten. Geplant für die nächsten Monate ist auch die Erarbeitung von Maßnahmen zur Fehlervermeidung und Fehlerbehebung, um die Fehlerwirkung zu vermeiden oder abzuschwächen. Mit der Ableitung dieser Maßnahmen in eine Regelung und deren Implementierung in die Simulationsumgebung, ist es möglich, die Wirksamkeit der Maßnahmen zu evaluieren. Anschließend werden die Ergebnisse durch Laborversuche validiert.



### Projektsteckbrief

**Projektname**  
IKTfree

**Projektlaufzeit**  
Oktober 2018 – September 2021

**Projektpartner**  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) – Institut für Vernetzte Energiesysteme e.V., EWE Netz GmbH, VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnologie e.V. Forum Netztechnik/Netzbetrieb (FNN)

**Kontakt**  
Edwin Rebak  
[e.rebak@tu-braunschweig.de](mailto:e.rebak@tu-braunschweig.de)  
+49 531 - 391 7759

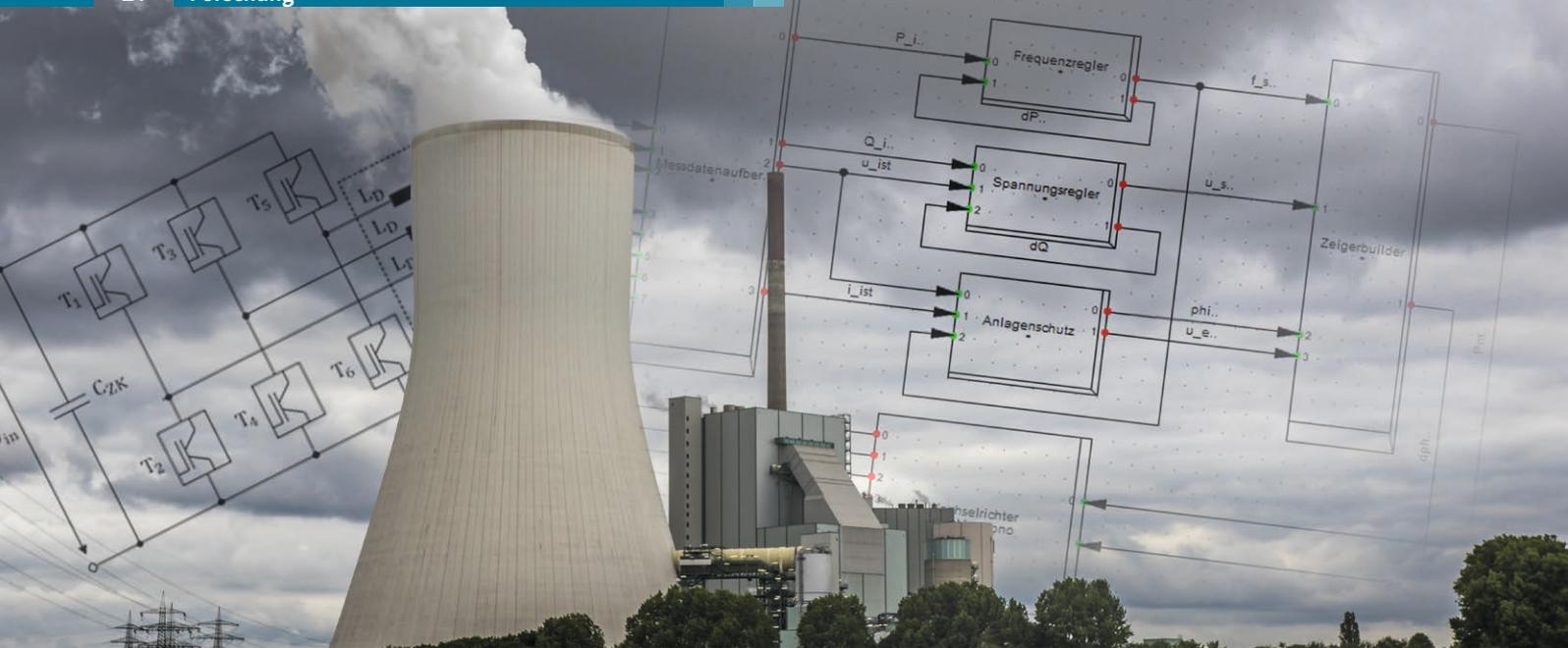
[www.iktfree.de](http://www.iktfree.de)



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



# Netzregelung mit Umrichtern

## Stabiler Netzbetrieb mit 100% erneuerbaren Energien

### Motivation

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 stromrichterbasierte 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 setzt das Projekt Netzregelung 2.0 an. Insbesondere neue Zustände, die in einem auf Synchrongeneratoren basierenden Stromnetz nicht vorhanden waren, werden innerhalb dieses Projektes adressiert. Beispielhaft seien hier die Verringerung der rotierenden Massen oder die Dominanz stromrichterbasierter Erzeugung in Netzabschnitten zu nennen. Störungsszenarien und Systemdienstleistungen, einhergehend mit einem sicheren und stabilen Betrieb der Netze, werden in diesem Forschungsprojekt in den Fokus gerückt.

### Ziele des Vorhabens

Das Gesamtziel des Forschungsvorhabens Netzregelung 2.0 besteht darin, aufzuzeigen, dass das elektrische Verbundsystem in Deutschland mit einem sehr hohen Anteil an Stromrichtern sicher und stabil betrieben werden kann. Hierfür werden konkrete Regelungsverfahren entwickelt und sowohl im Labor als auch im Feld getestet und validiert.

Das heutige elektrische Verbundsystem ist historisch gewachsen und somit auf die Eigenschaften von Synchrongeneratoren ausgerichtet. Stromrichter hingegen bringen andere Charakteristika mit sich, die ebenso gut für die Sicherung der Systemstabilität geeignet sind. Diesbezüglich müssen Anforderungen identifiziert und unabhängig von den jeweiligen Technologien beschrieben werden. Anschließend können Regelungsverfahren für Stromrichter entwickelt werden, welche diese Anforderungen erfüllen. Es wird geprüft, welche Technologien welche Anforderungen erfüllen müssen, um im Gesamtsystem zu jedem Zeitpunkt zu funktionieren.

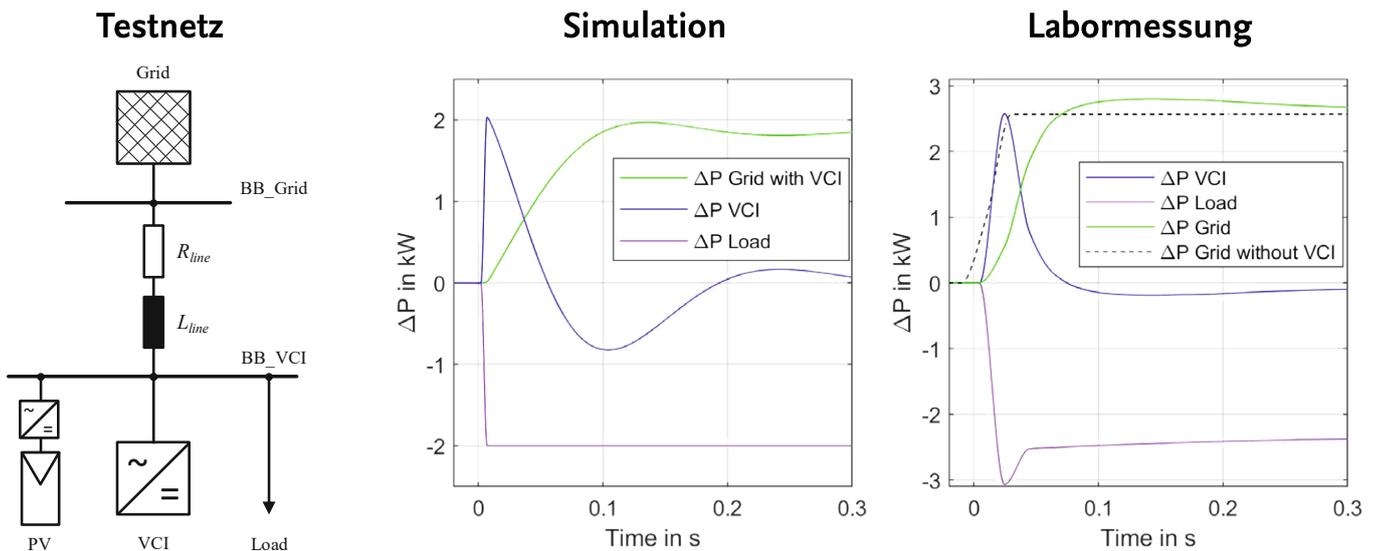
In dem Forschungsvorhaben Netzregelung 2.0 werden nicht nur mittel- und langfristige Szenarien mit einer hohen umrichterbasierter Stromerzeugung betrachtet. Es werden außerdem Übergangspfade von dem heutigen, häufig noch konventionell geprägten System bis hin zu einem nahezu ausschließlich aus Umrichtern versorgten System untersucht.

### Forschung am elenia

Im Rahmen des Verbundvorhabens beschäftigt sich das elenia mit der Integration von spannungseinprägenden Stromrichtern in das Verteilnetz. In diesem Kontext liegt zum einen der Fokus auf die Bereitstellung von Momentanreserve und deren Wirkungsweise auf die überlagerten Netzebenen. Ziel der Untersuchungen ist es, den Beitrag dieser Umrichtersysteme zur Stabilisierung des Versorgungsnetzes im Falle schneller Laständerungen in Netzen mit verringertem Anteil von Einspeisung aus Großkraftwerken zu untersuchen. Ein weiterer Fokus wird auf die Einflüsse spannungseinprägender Umrichtertechnologie auf die Verteilnetze, insbesondere auf lokale Spannungsqualität und Netzschutzmaßnahmen, gelegt.

### Bereitstellung von Momentanreserve aus Batteriespeichern

Momentanreserve bezeichnet die Energie, die verzögerungsfrei kurzzeitige Leistungsungleichgewichte zwischen Erzeugung und Verbrauch ausgleicht. Aktuell wird diese durch die kinetische Energie der rotierenden Generatoren in Großkraftwerken bereitgestellt. Mit zunehmender Verdrängung der konventionellen Erzeugung und damit der Synchrongeneratoren aus dem Strommix nimmt die Menge an verfügbarer Momentanreserve im Stromnetz weiter ab. Dies führt zu starken Schwankungen in der Netzfrequenz, welche die System-



Bereitstellung von Momentanreserve aus Wechselrichtern in der Niederspannungsebene in Simulation und Labor im Netzparallelbetrieb

stabilität gefährden.

Die Bereitstellung von Momentanreserve kann ebenfalls über spannungseinprägende Batteriewechselrichter erfolgen und wurde bereits in verschiedenen Labor- und Inselnetzen erprobt. Mit einer Regelung, die das prinzipielle Verhalten eines Synchrongenerators nachbildet, können diese ebenfalls Momentanreserve für das Verbundnetz bereitstellen. Um die Fähigkeit der flächendeckenden Bereitstellung zu untersuchen, wurden in 2019 verschiedene Netzstudien in Simulationen durchgeführt, um die prinzipielle Machbarkeit auch in verteilten Systemen darzustellen.

Auf der Komponentenebene ist dieses Verfahren jedoch durch die maximal verfügbare Leistung begrenzt. Während ein Wechselrichter in der Regel auf seine Nennleistung begrenzt ist, kann eine Synchronmaschine im Kurzzeitbereich ein vielfaches ihrer Nennleistung bereitstellen. Daher stellt sich die Anforderung an einen spannungseinprägenden Wechselrichter, im Normalbetrieb die notwendige Momentanreserve bereitzustellen und im Überlastfall die Leistung so zu begrenzen, dass noch die maximal erbringbare Momentanreserve erbracht wird und gleichzeitig die Systemgrenzen nicht überschritten werden. Hierfür wurde die Regelung daher um eine Funktion einer Leistungsbegrenzung erweitert, um auch in Fehlersituationen ein stabiles Verhalten am Netz sicherzustellen.

### Integration in das Verteilnetz

Um großflächig in das Verteilnetz integriert werden zu können, muss spannungseinprägende Umrichter-technologie ein Verhalten aufweisen, welches kompatibel zu den bereits bestehenden Anforderungen, Anlagen und Schutz-einrichtungen im Netz ist. Vor diesem Hintergrund wird die Integration von Umrichtern in unterschiedlicher Konstellation in Verteilnetzmodelle simuliert und getestet. Das Zusammenspiel zwischen klassischen Komponenten und verschiedenen Umrichterregelungen, im Betriebs- wie auch im Fehlerfall, steht dann im Fokus der Untersuchungen am elenia. Basierend auf den hierbei gewonnenen Erkenntnissen wird das Verhalten der spannungseinprägenden Regelung optimiert, sodass diese die Funktionsweise des Verteilnetzes, auch in Hinblick auf aktuelle Veränderungen wie eine stärkere Durchdringung von neuen Verbraucherklassen wie bspw. Elektrofahrzeugen, unterstützen. Hierfür eignen sich spannungseinprägende Regelungen besonders, da sie direkt an der Netzspannung am jeweiligen Anschlusspunkt orientiert arbeiten und diese bei Bedarf stützen können. Hierfür wird untersucht, wie der Wechselrichter im Falle von starker Leitungsbelastung, unsymmetrischen Verbrauchern und Erzeugern oder im Falle des Auslösens von Schutz-einrichtungen im Netz agieren sollte, um die Stärken spannungseinprägender Regelung bestmöglich im Sinne des stabilen Netzbetriebes zu nutzen.

### Projektsteckbrief

**Projektname**  
Netzregelung 2.0

**Projektlaufzeit**  
Dezember 2016 – November 2021

**Projektpartner**  
Weitere Forschungsinstitute:  
Fraunhofer IEE, Uni Kassel

**Anlagenhersteller:**  
Siemens, SMA Solar Technology AG

**Übertragungsnetzbetreiber:**  
50Hertz, Amprion, TenneT, Transnet BW

**Verteilnetzbetreiber:**  
EWE Netz, innogy, MITNETZ Strom, Westnetz

**Verbände und Netzwerke:**  
VDE | FNN, DERlab, dena

### Kontakt

Florian Rauscher  
f.rauscher@tu-braunschweig.de

Björn Oliver Winter  
bjoern.winter@tu-braunschweig.de





# Regelleistung mit PV-Anlagen

## Wie PV-Wechselrichter einen Beitrag zur Frequenzstabilität leisten

Die Veränderungen im elektrischen Energieversorgungssystem in Deutschland über die letzten 20 Jahre bringen neben großen Chancen auch neue Herausforderungen mit sich. Wichtigster Aspekt bleibt die Sicherung der Systemstabilität, die auch mit hoher fluktuierender Erzeugung stets gewährleistet sein muss. Diese Aufgabe wird heute im Wesentlichen von konventionellen bzw. steuerbaren Kraftwerken über die Bereitstellung von Systemdienstleistungen übernommen. Zukünftig müssen jedoch auch Windenergieanlagen (WEA) und Photovoltaik-(PV-)Systeme als Teil des aktiven Kraftwerksparks einen Beitrag dazu leisten.

Einen bedeutenden Teil der Systemstabilität stellt die Frequenzstabilität dar. Die Frequenz im deutschen Stromnetz befindet sich im Gleichgewicht bei 50 Hz, solange sich Erzeugung und Verbrauch die Waage halten. Bei Abweichungen wird Regelleistung aktiviert, um Störungen im Netz und Schäden an den Komponenten zu vermeiden. In dem Verbundforschungsvorhaben *PV-Regel* wurde am elenia, gemeinsam mit der SMA Solar Technology AG und der GEWI AG, ein ganzheitliches Konzept zur Regelleistungserbringung mit PV-Systemen ausgearbeitet. Die Ergebnisse des mittlerweile erfolgreich abgeschlossenen Forschungsprojektes werden im Folgenden vorgestellt.

### Herausforderungen für Regelleistung mit Photovoltaik

Die sinnvolle Nutzung von PV zur Erbringung von Regelleistung erfordert nicht nur technische Konzepte und Lösungen, sondern auch die Umgestaltung der Rahmenbedingungen des Regelleistungsmarktes sowie ökonomische Betrachtungen. Als Regelleistungsart wird im Projekt vornehmlich die *manual Frequency Restoration Reserve (mFRR)* betrachtet. Diese wirkt zeitlich nach der *automatic Frequency Restoration Reserve (aFRR)*, die wiederum auf die *Frequency Containment Reserve (FCR)* folgt. Bei der Regelleistungsbereitstellung wird die PV-Anlage zeitweise unterhalb ihrer maximal möglichen Einspeisung betrieben – sei es zur Vorhaltung positiver oder bei der Erbringung negativer Regelreserve. Die Abregelung erfolgt in Relation zu der möglichen Einspeisung, deren Ermittlung unter Einhaltung der geforderten Genauigkeiten eine der größten technischen Herausforderungen darstellt. Dieses Verfahren wird für WEA in einer aktuell laufenden Pilotphase zur Erbringung von mFRR bereits angewendet.

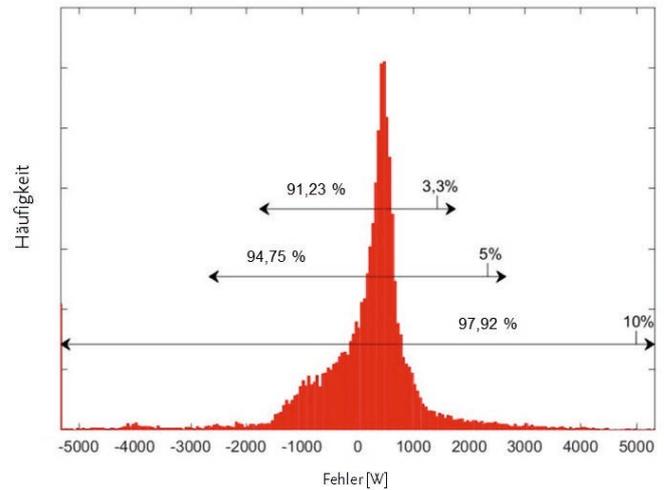
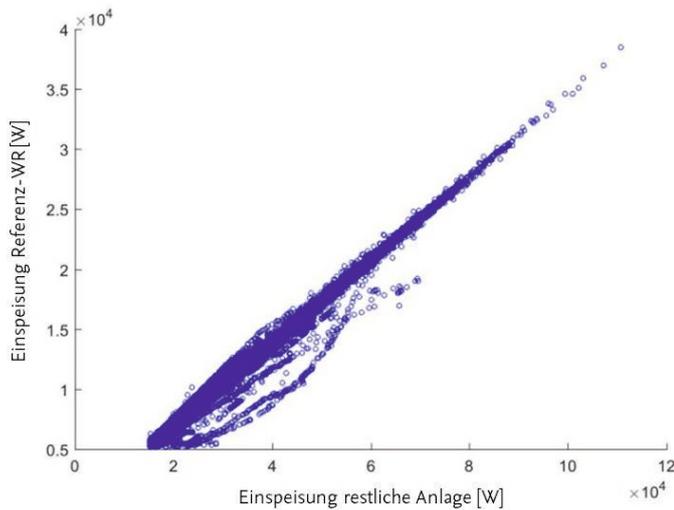
### Passive & aktive Nachweisverfahren

Grundsätzlich können Nachweisverfahren in zwei Kategorien eingeordnet werden – passiv und aktiv. Bei den passiven Nachweisverfahren werden externe Referenzgrößen für die Berechnung der möglichen Einspeisung genutzt, bspw. Messdaten von Einstrahlungssensoren

oder die Einspeiseleistung von nicht abgeregelten Referenzteilanlagen. Bei aktiven Nachweisverfahren hingegen wird die Wirkleistung der PV-Anlage, z. B. mittels einer Kennlinienvariation, fortlaufend angepasst. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde ein regelleistungsfähiger Wechselrichter (Coverfoto) entwickelt, in dem diese Funktionalität integriert ist. Eingehende Untersuchungen mit dieser innovativen Technologie erfolgten in Labor- und Feldtests.

Der Vorteil passiver Verfahren besteht darin, dass sowohl die mögliche als auch die tatsächliche Einspeisung im nicht abgeregelten Betrieb jederzeit verfügbar sind und sich damit die Genauigkeit vergleichsweise einfach bestimmen lässt. Im Gegensatz dazu liegt bei aktiven Verfahren der Wert der möglichen Einspeisung nur im abgeregelten Betrieb vor, sodass ein direkter Vergleich zwischen möglicher und tatsächlicher Einspeisung nicht realisierbar ist. Aus diesem Grund sind Untersuchungen zur Evaluierung der Genauigkeit bei aktiven Verfahren anspruchsvoller. Die Umsetzung selbst stellt wiederum einen Vorteil aktiver Verfahren dar, da der hier genutzte Wechselrichter kein Modell zur Berechnung der möglichen Einspeisung benötigt, sondern die Daten intern bereitstellt.

Im Forschungsprojekt *PV-Regel* wurden sowohl passive als auch aktive Verfahren auf ihre Funktionsweise, Umsetzbarkeit

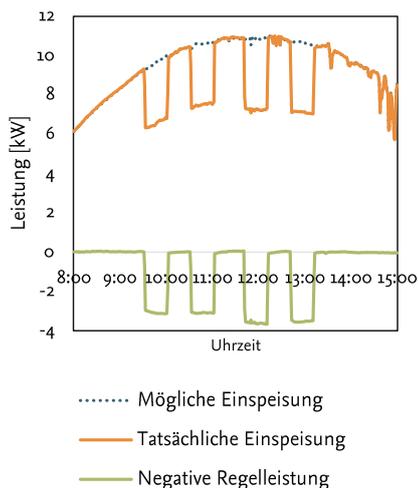


Ergebnisse der Genauigkeitsanalysen der Feldtestanlage unter Verwendung von zwei Referenzwechselrichtern

und Erfüllung der technischen Anforderungen und Genauigkeiten bewertet. Einen geeigneten Rahmen für diese Tests bildet die Präqualifikation (PQ), welche jedes System für die Teilnahme am Regelleistungsmarkt erfolgreich durchlaufen muss.

### Betriebsfahrt

Als Teil der Präqualifikation stellt die Betriebsfahrt einen probeweisen Abruf der Regelreserve dar und dient neben der Prüfung des technischen Nachweises auch der Bestimmung der präqualifizierten Leistung. Folgende Abbildung zeigt die Betriebsfahrt, die mit der instituts-eigenen PV-Anlage (installierte Leistung: 14,3 kWp) durchlaufen wurde. Einer von zwei Wechselrichtern wurde als Referenz zugrunde gelegt.



Betriebsfahrt für negative mFRR mit der PV-Anlage des elenia

Dargestellt sind die tatsächliche und die mögliche Einspeisung der Anlage sowie die abgerufene Regelleistung. In diesem Test wurde im zweiten Abruf eine präqualifizierbare Leistung von 3,5 kW

erzielt. Die präqualifizierbare Leistung bildet die Grundlage für die Genauigkeitsuntersuchungen.

### Bewertung der Genauigkeit des Referenzverfahrens

Die Abbildung oben zeigt die Ergebnisse für Genauigkeitsuntersuchungen an einer der Feldtestanlagen mit einer installierten Leistung von 204 kWp. Zwei der acht Wechselrichter werden als Referenzteilanlage genutzt. Die ermittelte PQ-Leistung für die Analysen beträgt 53,29 kWp.

Oben links wird die Leistung der beiden Referenzwechselrichter der Einspeisuleistung der restlichen Anlage gegenübergestellt. Der lineare Zusammenhang ist hier klar zu erkennen. Oben rechts ist eine Häufigkeitsverteilung der Fehler dargestellt. Darüber lässt sich ermitteln, wie viele Messwerte sich in bestimmten Fehlerintervallen, gemessen an der präqualifizierbaren Leistung, befinden. Die Anforderungen aus der Pilotphase für WEA werden von der PV-Anlage erfüllt.

Details zu dem aktiven Nachweisverfahren können dem Abschlussbericht des Forschungsvorhabens entnommen werden. Die Ergebnisse entsprechen ebenfalls den Anforderungen, womit gezeigt wird, dass die Bereitstellung von Regelleistung mit PV-Anlagen sowohl mit passiven als auch mit aktiven Nachweisverfahren möglich ist.

### Weiterführende Forschung

Die technische Eignung von PV-Anlagen zur Regelleistungsbereitstellung wurde mit verschiedenen Methoden nachgewiesen. Für die Integration in den Markt müssen die Rahmenbedingungen je-

doch noch angepasst werden. Stündliche Produktzeitscheiben und die Anerkennung des Verfahrens mögliche Einspeisung seien hier beispielhaft genannt.

Aus technischer Sicht sind PV-Wechselrichter nicht nur zur Erbringung von mFRR in der Lage, sondern können ihre Leistung aufgrund der Leistungselektronik der Wechselrichter noch deutlich schneller anpassen. Am elenia wurden in diesem Forschungsfeld bereits erfolgreich Untersuchungen zur *fast Frequency Containment Reserve* und zur Momentanreserve durchgeführt. Das Forschungsprojekt [Netzregelung 2.0](#) baut u. a. auf diesen Ideen auf.

### Projektsteckbrief

**Projektname**  
PV-Regel

**Projektlaufzeit**  
August 2014 – Dezember 2018

**Projektpartner**  
SMA Solar Technology AG, GEWI AG

**Kontakt**  
Julia Seidel  
j.seidel@tu-braunschweig.de

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

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



# Spannungsqualität im Netz

## Auswirkungen zukünftiger Netznutzungsfälle der Niederspannung und ihre Betriebsweise auf die Spannungsqualität

Im Sommer 2019 startete ein neues Forschungsprojekt. Das Projekt U-Quality befasst sich mit der Spannungsqualität im Niederspannungsnetz bei zunehmendem Anstieg an Elektrofahrzeugen, Photovoltaikanlagen, Batteriespeichersystemen und Power-to-Heat-Anlagen. Die Spannungsqualität im Verteilungsnetz ist abhängig von den im Netzgebiet angeschlossenen Erzeugern und Verbrauchern. Die aktuellen Veränderungen dieser sogenannten Netznutzungsfälle im Rahmen der Energie-, Mobilitäts- und Wärmewende haben somit einen großen Einfluss auf die Spannungsqualität. Deren Aufrechterhaltung stellt eine der zentralen und aktuellen Aufgaben für Verteilungsnetzbetreiber dar. Genau hier setzt das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie mit ca. 2,34 Millionen Euro geförderte und vom Projektträger Jülich betreute öffentliche Forschungsprojekt U-Quality an. Die Projektpartner werden im Rahmen der Projektlaufzeit bis Mitte 2022 im Bereich der Spannungsqualität forschen und Lösungen erarbeiten, um unter anderem mehr Elektroautos in den Stromnetzen laden zu können.

### Projektkonsortium

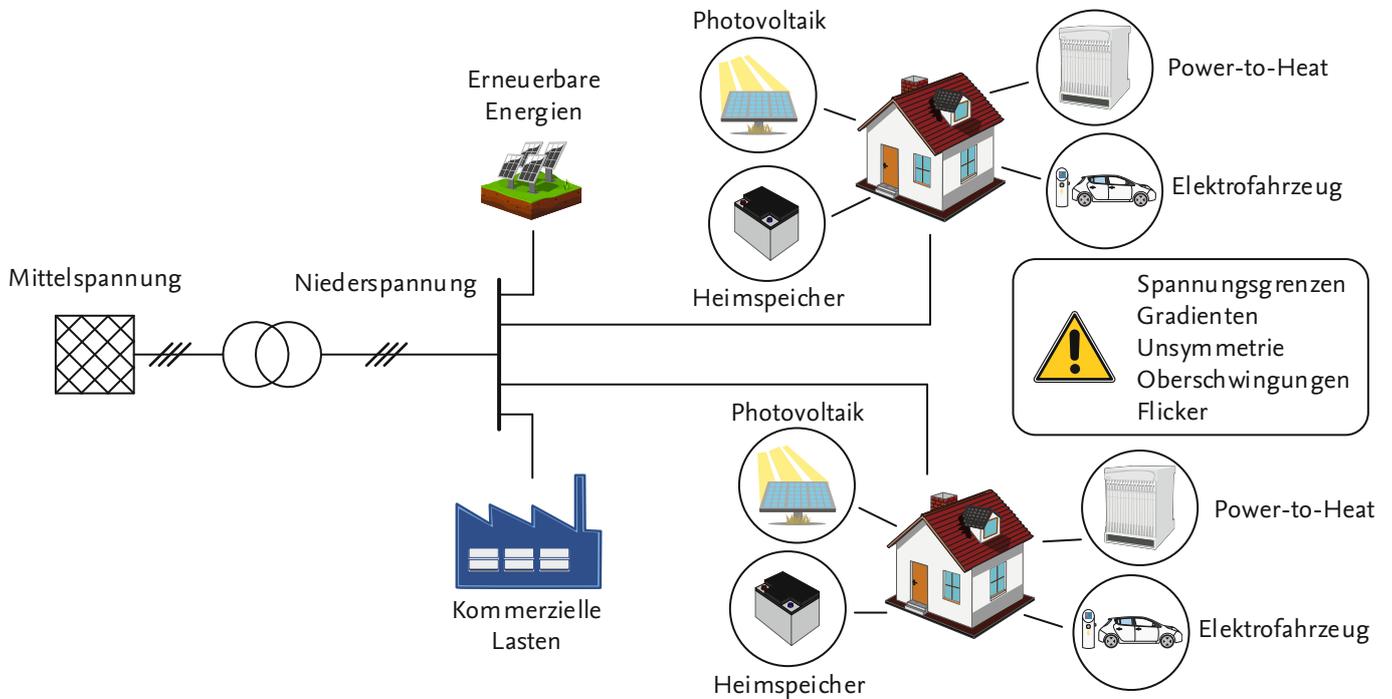
Das Projektkonsortium setzt sich zusammen aus vier Forschungsinstituten sowie sechs Verteilnetzbetreibern und vier Industriepartnern, die den Instituten unter anderem die Möglichkeiten geben, ihre Simulationen unter realen Bedingungen zu testen. Die beteiligten Forschungsinstitute sind TU Braunschweig, RWTH Aachen, TU München und FGH. Die Verteilnetzbetreiber und Industriepartner lauten Bayernwerk, Netze BW, Regionetz, Stromnetz Hamburg, Avacon, BS Netz, Maschinenfabrik Reinhausen, Phoenix Contact, SMA und Ruhstrat Power Technology. Als Konsortialführer veranstaltete das Institut elenia der Technische Universität Braunschweig das Auftakttreffen (Abbildung U-Quality Konsortium beim Kick-off). Das Treffen hat einen gelungenen Einstieg für das Projekt und die anstehende Zusammenarbeit geschaffen. Die beteiligten Partner freuen sich auf die nächsten Jahre intensiver Forschung und Zusammenarbeit.



U-Quality Konsortium beim Kick-off

### Inhalt des Projekts

Im Rahmen des Projektes U-Quality soll untersucht werden, welchen Einfluss der Wandel der Netznutzungsfälle auf die Spannungsqualität in Verteilungsnetzen hat und welche Komponenten, Technologien und Verfahren einen Beitrag zur Sicherstellung derselben leisten können (die Abbildung Darstellung der Untersuchungen in U-Quality veranschaulicht dies). Darüber hinaus werden die Verfahren und Komponenten derart angepasst und weiterentwickelt, dass sie die Spannungsqualität nicht nur hinsichtlich der statischen Spannungshaltung, sondern u. a. auch hinsichtlich Unsymmetrie, Flicker und Oberschwingungen verbessern. Dabei werden sowohl Handlungsempfehlungen für Verteilnetzbetreiber und Hersteller sowie für die zukünftige Überarbeitung von Normen, Anwendungsregeln und Prüfvorschriften erarbeitet. Zudem werden Lösungen untersucht, wie die Auswirkungen auf die Spannungsqualität wirksam, effizient und kostengünstig beherrscht werden können.



Schematische Darstellung der Untersuchungen im Rahmen des Forschungsprojektes *U-Quality*

Es ist ein dreistufiges Vorgehen mit Simulationen, Laborversuchen und Feldtests geplant. Um die Bewertung von realistischen Szenarien zu fördern wird eine initiale Messkampagne zur Erfassung der Ist-Situation stattfinden. Die Mitarbeit innovativer Partner aus Industrie und Netzbetrieb gewährleistet eine hohe Praxisnähe und eine rasche Umsetzung der gewonnenen Erkenntnisse. Durch die Mitarbeit der Projektpartner in verschiedenen Normungsgremien finden die Projektergebnisse direkten Eingang in künftige Normen und Richtlinien. Durch die Mitwirkung hochkarätiger Industriepartner wird ein hoher Praxisbezug sichergestellt. Durch die Firma Ruhstrat wird ein Spannungsqualitätsregler-Prototyp entwickelt, der im Anschluss an das Projekt zu einem marktreifen Produkt weiterentwickelt werden soll und in die Vermarktung gehen wird. Zusätzlich ist geplant, das im Projekt erworbene Wissen in Kooperationen und Beratungstätigkeiten mit Industriepartnern und Verteilungsnetzbetreibern einfließen zu lassen. Auf der wissenschaftlichen Seite fließen die Forschungsergebnisse in Promotionsvorhaben an den drei Hochschulen ein. Zusätzlich werden sie Eingang in die entsprechenden Lehrveranstaltungen, wie Vorlesungen, Laborpraktika und studentische Abschlussarbeiten finden und auf nationalen und internationalen Konferenzen und Tagungen präsentiert und diskutiert. Des Weiteren ist die Entwicklung von fachlich verwandten Anschlussprojekten geplant.

Außerdem bietet die Website [www.u-quality.de](http://www.u-quality.de) Informationen zum Projekt. Hierzu zählen zum Beispiel Veröffentlichungen, die im Rahmen des Projekts entstehen.

#### Arbeitsziele des elenia

Im Rahmen des Projektes verantwortet das elenia die Projektkoordination und inhaltliche Aspekte wie dynamische Simulationen, wirtschaftliche Bewertung und die Durchführung von Feldversuchen. Der Fokus der TU Braunschweig liegt auf den folgenden Arbeitspunkten:

1. Durchführung von Feldmesskampagnen zu Beginn des Projekts, um die Ist-Situation hinsichtlich Spannungsqua-

lität aufzunehmen, und Vermessung von Einzelkomponenten wie PV- und Batterie-Wechselrichter im Labor, um deren Einfluss auf die Spannungsqualität zu ermitteln.

2. Modellierung, Simulation und Bewertung neuer Netznutzungsfälle hinsichtlich Spannungsqualitätsmerkmalen.
3. Implementierung ausgewählter Spannungsqualitäts-Regelverfahren auf verfügbare Betriebsmittel der vorhandenen Labore und Analyse der Umsetzbarkeit und der Wirksamkeit aller Verfahren.
4. Validierung der Simulationen und Laborversuche aus den Punkten 2 und 3 in Demonstrations-Feldversuchen.



#### Projektsteckbrief

**Projektname**  
U-Quality



**Projektlaufzeit**  
September 2019 – August 2022

**Projektpartner**  
RWTH Aachen – IFHT, FGH e.V.,  
TU München – Energieversorgungsnetze,  
Ruhstrat Power Technology GmbH

**Kontakt**  
M. Sc. Cornelius Biedermann  
[cornelius.biedermann@tu-braunschweig.de](mailto:cornelius.biedermann@tu-braunschweig.de)  
+49 531 391-7788

[www.u-quality.de](http://www.u-quality.de)

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



# Sektorkopplung in Haushalten

## Der Beitrag von Nur-Strom-Haushalten zum erfolgreichen Gelingen der Energiewende

Spätestens seit der weltweiten „Fridays for Future“-Bewegung ist der Klimaschutz in aller Munde. In den letzten Wochen haben sich die Vorschläge für Klimaschutzmaßnahmen seitens der Politik nahezu überschlagen. Um 2030 nicht abermals die Klimaschutzziele zu verfehlen, wie dies für 2020 schon jetzt absehbar ist, wurde ein ganzer Blumenstrauß von sektorenübergreifenden Maßnahmen innerhalb des vielfach kritisierten Entwurfs des Klimaschutzgesetzes verankert, u.a. die Ticketbesteuerung im Flugverkehr, die Steuerentlastung von Bahnfahrten, die steuerliche Abschreibung für die energetische Altbausanierung, die Abwrackprämie für Ölheizungen, den ab 2021 stark umstrittenen CO<sub>2</sub>-Einstiegspreis mit 10 Euro pro Tonne CO<sub>2</sub>, die Ausweitung des Emissionshandels, um nur einige der mehr als 60 vorgeschlagenen Maßnahmen zu benennen. Bei all den Klimaschutzdiskussionen spielt die Bedeutung der Sektorkopplung, also die Verzahnung des Strom-, Wärme- und Mobilitätssektors miteinander, eine überaus wichtige Rolle. Um die Begrenzung der globalen Erwärmung auf 1,5°C zu erreichen, ist eine klimaneutrale Deckung des Energieverbrauchs in den drei besagten Sektoren in Form von erneuerbaren Energien zwingend erforderlich. Neben der Dekarbonisierung des Energiesystems sprechen insbesondere die Verringerung der Abhängigkeit von fossilen Energieträgerimporten, die Erhöhung der verfügbaren Flexibilität und wirtschaftliche Anreize für die zunehmende Elektrifizierung aller drei Sektoren.

### Nur-Strom-Haushalte und deren Auswirkung auf die Netze

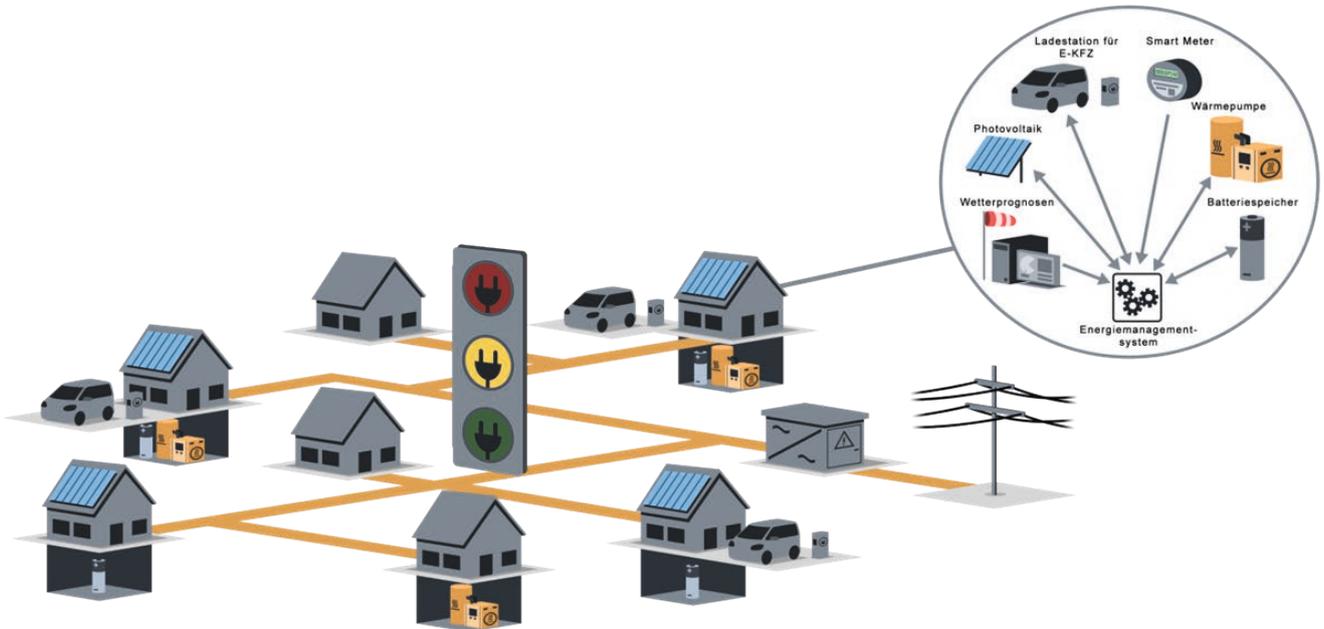
Auf der Haushaltsebene führt dieser Trend potenziell zu einer steigenden Zahl von Photovoltaikanlagen, Batteriespeichersystemen, Wärmepumpen und Elektrofahrzeugen. Diese sogenannten Nur-Strom-Haushalte verwenden als einzigen Energieträger Strom. Gleichzeitig führt die zunehmende Elektrifizierung zu Herausforderungen für die Niederspannungsnetze. Bereits seit einigen Jahren nimmt die Häufigkeit von Netzengpässen sowohl im Verteilungs- als auch im Übertragungsnetz zu. Das verursacht hohe Kosten für netzstabilisie-

rende Maßnahmen wie das Einspeisemanagement und das Redispatch. Als Lösungsansatz wird der Netzausbau auf allen Spannungsebenen vorangetrieben, der jedoch teuer ist, viel Zeit benötigt und auf große Akzeptanzprobleme stößt. Eine Alternative bietet die Aktivierung von Flexibilitäten im Verteilungsnetz.

### Flexibilitäten nutzen: Köpfchen statt Kupfer

Das Ziel ist eine aus volkswirtschaftlicher Sicht möglichst kosteneffiziente Umsetzung der Energiewende, indem die bereits vorhandenen Ressourcen in Form von flexiblen Verbrauchern (Wärmepumpen, Elektrofahrzeugen) und Batteriespeichern genutzt werden. So kann mithilfe einer bedarfsgerechten Zu- oder Abschaltung von Flexibilitäten ein lokaler Ausgleich von Erzeugung und Verbrauch hergestellt werden und ein kostenintensiver Netzausbau auf ein Minimum gehalten werden.

Bei den Untersuchungen stehen das aktuelle Jahr 2019 als auch das Zieljahr 2030 im Fokus. Anhand von ausgewerteten Studien bezüglich prognostizierter Technologieentwicklungspfade von Photovoltaikanlagen, Batteriespeichern, Wärmepumpen und Elektrofahrzeugen können die Durchdringen der besagten Komponenten szenariospezifisch (pessimistische, realistische und optimistische Entwicklung) abgeschätzt werden. So ist es möglich, deren netztechnische Auswirkungen in unterschiedlichen Strukturklassen, angefangen von ländlichen Kreisen mit hoher Erzeugung aus erneuerbaren Energien bis zu laststarken städtischen Gebieten, zu bestimmen. Untersucht werden sowohl die Stand-Alone-Betriebsweise, bei der die Anlagenkomponenten nicht miteinander kommunizieren, der eigenverbrauchsoptimierte als auch der netzdienliche Betrieb. Die unterschiedlichen Betriebsweisen werden hierbei aus Anlagen- als auch aus Netzbetreibersicht mit den jeweils stakeholder-spezifisch relevanten Bewertungskriterien analysiert. Hierbei erfolgt ein Wirksamkeitsvergleich ausgewählter netzoptimierender Maßnahmen. Bei den netzoptimierenden Maßnahmen wird zwischen Blindleistungs- und Wirkleis-



Versuch zur Untersuchung der dynamischen Regelabweichungen für ein Batteriespeichersystem

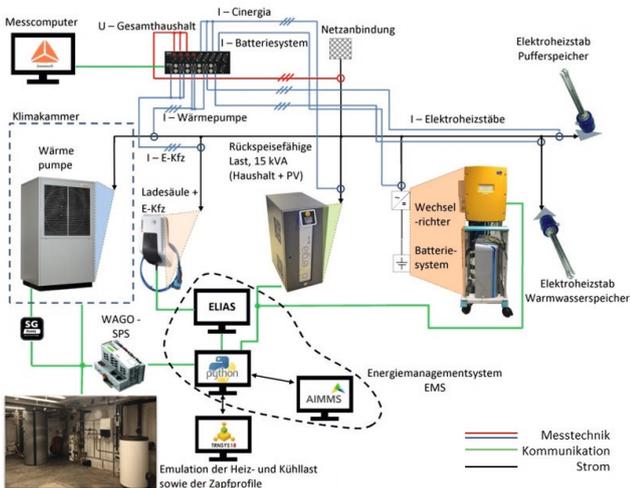
tungsmanagement- (Q(U), P(U)) Einspeisemanagement- und konventionellen Netzausbaumaßnahmen unterschieden. Das generelle Vorgehen fasst die obige Abbildung zusammen.

**Nur-Strom-Haushalt-Teststand**

Zusätzlich zu den Simulationen erfolgen Laborversuche im Nur-Strom-Haushalt-Teststand der *elenia-energy-labs* zur Validierung der verschiedenen Betriebsstrategien. Zu den Komponenten des Teststands zählen neben einer rückspeisefähigen Last zur Emulation definierter Haushaltslast- bzw. PV-Erzeugungsgänge ein Batteriespeicher inklusive Wechselrichter zur Abbildung eines PV-Batteriespeichers, ein Elektrofahrzeug als elektrischer Verbraucher inklusive Ladesäule, eine Luft-Wasser-Wärmepumpe sowie die Elektroheizstäbe des Heiz- und des Trinkwarmwasserspeichers, eine Klimakammer zur Simulation einer definierten Außenluft für die Wärmepumpe und die Wärmesenke (Heizlast- und Trinkwarmwasser-Zapfprofile) inklusive der Kopplung mit TRNSYS zur thermischen Simulation von Heizkreisläufen in Gebäuden. Die Komponenten werden über ein institutsintern entwickeltes Energiemanagementsystem gesteuert.

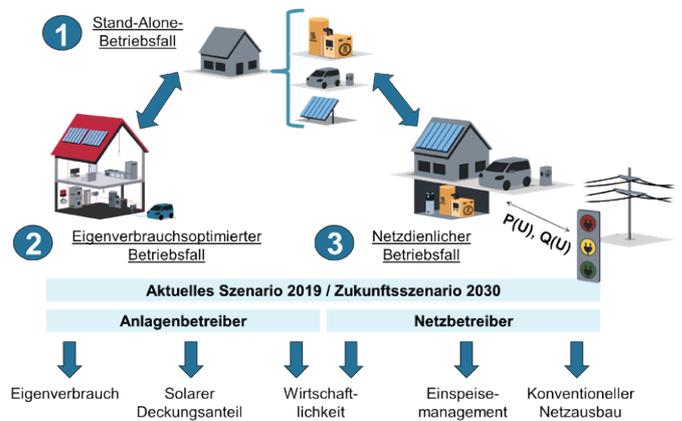
**Abgaben- und Umlagensystem**

Darüber hinaus stehen auch das Abgaben- und Umlagen-



Nur-Strom-Haushalt-Teststand

system im Fokus. Zum einen geht es um ein Wirtschaftlichkeitsproblem von beispielsweise Wärmepumpen gegenüber konventionellen Beheizungsstrukturen, das insbesondere im Bestand aktuell zu einer verschwindend geringen Durchdringung von Wärmepumpen führt. Der Einfluss der aktuell diskutierten CO<sub>2</sub>-Bepreisung für eine CO<sub>2</sub>-verursachergerechtere Energieträgerbepreisung wird ebenfalls untersucht. Zudem wird auch das heutige Regulierungssystem für Netzbetreiber beleuchtet: aktuell begünstigt es Investitionen in



Wirksamkeitsvergleich unterschiedlich betriebener Nur-Strom-Haushalte

einen Netzausbau, anstelle diesen mithilfe von Intelligenz und Digitalisierung zu vermeiden. Die Entwicklung eines monetären Anreizsystems für die bedarfsgerechte Zu- oder Abschaltung von flexiblen Lasten und Batteriespeichern, das eine Win-Win-Situation für Anlagen- und Netzbetreiber darstellt, runden die diesbezüglichen Forschungsarbeiten ab. Somit erfolgen die Untersuchungen zu den Auswirkungen einer sektorenübergreifenden Elektrifizierung auf Haushalts- und auf Niederspannungsnetzebene ganzheitlich unter technischen, wirtschaftlichen, ökologischen und regulatorischen Gesichtspunkten.



**Kontakt**

Stefanie Čelan  
s.celan@tu-braunschweig.de  
+49 531 - 391 9727



# Blindleistungsmanagement

## im Verteilungs- und Übertragungsnetz unter Verwendung innovativer Blindleistungsquellen

Der durch die Energiewende bedingte Transformationsprozess des Energieversorgungssystems hat grundlegenden Einfluss auf die bestehenden Konzepte zur Wahrung der Netz- und System-sicherheit. Dies betrifft auch die konventionellen Verfahren zur Spannungshaltung und das damit verbundene Blindleistungsmanagement (BM) in Übertragungs- (ÜN) und Verteilungsnetzen (VN). Einerseits erfolgt durch die Energiewende eine sukzessive Abschaltung von Blindleistungsquellen in Form von Synchrongeneratoren. Andererseits wird mit dem Zubau von umrichtergekoppelten erneuerbaren Energieanlagen (EEA) ein theoretisches Blindleistungspotenzial im VN geschaffen.

Der Zubau der fluktuierenden EEA hat jedoch ebenso zur Folge, dass Übertragungsstrecken sowie Auslastungen von Betriebsmittel zunehmen, die Blindleistungsbedarfe damit steigen und kurzzeitigen Schwankungen unterworfen sind. Erschwerend kommt hinzu, dass Blindleistung eine lokale Größe ist und eine Übertragung über längere Distanzen wirtschaftlich nicht umsetzbar ist. Diese Sachverhalte führen dazu, dass auf das BM fundamentale Änderungen in Bezug auf betriebliche sowie planerische Aspekte zukommen. In Zukunft muss der residuale Blindleistungsbedarf im ÜN gedeckt werden. Eine Option stellen verlässliche und dynamische Blindleistungsquellen aus dem VN dar.

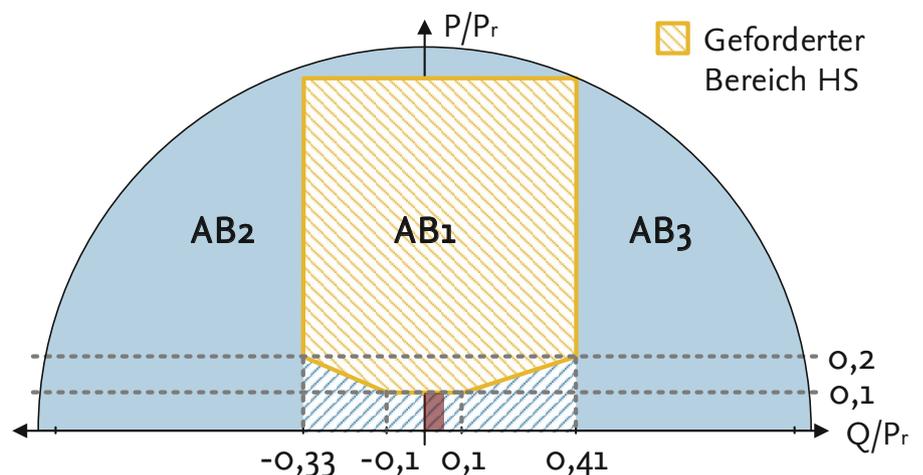
Daraus abgeleitete Forschungsfragen wurden am elenia im Forschungsprojekt PV-Wind-Symbiose bereits teilweise beantwortet. Das aktuell laufende Anschlussprojekt Q-Integral wird weitere Forschungsergebnisse mit dem Fokus auf einem spannungsebenen- und netzbetreiberübergreifenden BM liefern.

### PV-Wind-Symbiose

Im Projekt PV-Wind-Symbiose wurden verschiedene grundlegende Untersuchungen in Bezug auf das BM durchgeführt. Im Zentrum stand die Fragestellung, wie PV- (PVA) und Windenergieanlagen (WEA) effizient Blindleistung einspeisen können, welche technischen Auswirkungen dies auf einen Netzabschnitt eines realen Hochspannungsnetzes (HS-Netz) hat und ob

die Einbindung der Quellen in ein aktives BM wirtschaftlich konkurrenzfähig zu konventionellen Lösungen ist. Zur Realisierung wurden am elenia zentrale, aktive Blindleistungsregelalgorithmen mit Zielfunktionen (z. B.  $Q = 0 \parallel U_t = U_n$ ) entwickelt, die innerhalb verschiedener Simulationsvarianten in einem Netzmodell des realen HS-Netzes getestet und ausgewertet wurden.

Die Simulationen haben gezeigt, dass EEA bereits heute einen entscheidenden Beitrag leisten können aktiv Blindleistungsbedarfe zu decken. Grundsätzlich können dabei die umrichtergekoppelten PVA und WEA im geforderten Arbeitsbereich und darüber hinaus Blindleistung bereitstellen – s. nachstehende Abbildung AB2 und AB3. Insbesondere Voll-



Arbeitsbereiche EEA in der Hochspannungsebene



umrichtersysteme sind theoretisch dazu fähig, die Blindleistung auch im STATCOM-Betrieb schnell, kontinuierlich und variable bis zur Bemessungsscheinleistung bereitzustellen.

Bei den im Modellnetz installierten Wechselrichtermodellen für PVA und WEA wäre in Teilen eine Anpassung der Software ausreichend gewesen, um die simulierte Funktion eines Vollumrichtersystems zu erhalten. Bei weiteren Modellen kann eine Umrüstung der Hardware durchaus notwendig sein, was mit einem entsprechend höheren Investitionsaufwand einhergeht. Dies ist im Einzelfall bei den jeweiligen Herstellern zu erfragen.

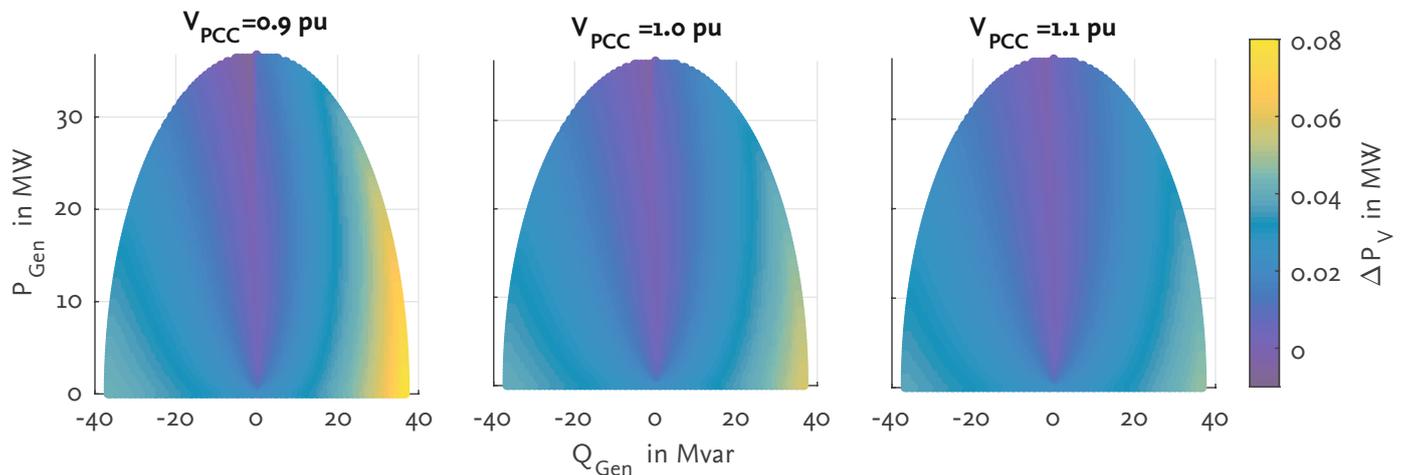
Die Auswertung weiterer Simulationen hat zudem gezeigt, dass in der Regel der theoretisch sehr große Arbeitsbereich praktisch nicht vollständig genutzt werden kann. Ursache hierfür sind die in den Parks zu deckenden Eigenbedarfe, die den Arbeitsbereich beschränken. Um dennoch eine hohe Verfügbarkeit der Blindleistungsbereitstellung der EEA

in einem Netzabschnitt sicherzustellen, kann diese nach den gegenwärtig gültigen Anschlussregeln durch das Pooling von Anlagen deutlich erhöht werden. In Abhängigkeit der vorhandenen EEA mit STATCOM-Funktion erhöht sich zusätzlich die Verfügbarkeit durch die Möglichkeit der kontinuierlichen Blindleistungsbereitstellung.

In diesem Kontext wurden im Projekt auch die durch die Blindleistungsbereitstellung in den Anlagen auftretenden Verluste analysiert und bewertet. Hierfür wurde ein detailliertes Simulationsmodell eines Pilotparks bestehend aus WEA und PVA erstellt und die Verluste über den gesamten Arbeitsbereich ermittelt. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Verluste sich in einer nicht unwesentlichen Abhängigkeit vom aktuellen Arbeitsbereich der Anlagen und von den Spannungsverhältnissen im bzw. am Park befinden - vgl. Abb. unten. Eine vereinfachte Berechnung der Verluste über z. B. feste Verlustfaktoren kann aufgrund der Ungenauigkeiten zu fehlerhaften Schlussfolgerungen bei den Betriebskos-

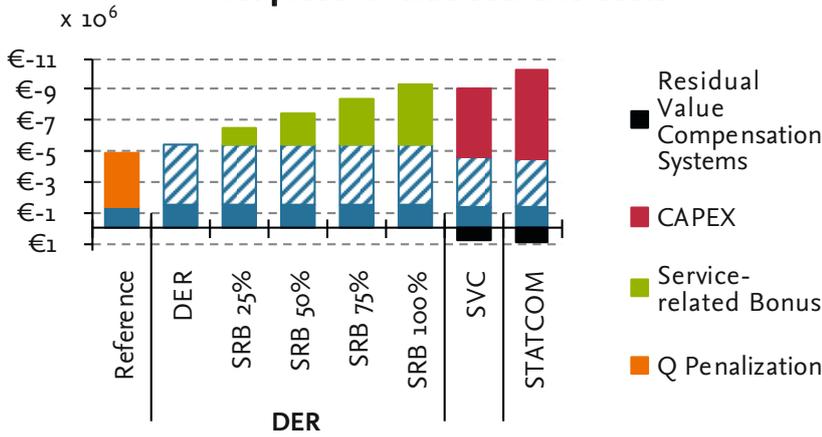
ten kommen. Dies wiederum erschwert wirtschaftliche sowie volkswirtschaftliche Untersuchungen, da die Verluste individuell von Park zu Park variieren können und eine genaue Modellierung der Parks aufgrund fehlender Informationen nicht immer möglich ist.

Aufbauend auf den Analysen der Verluste wurden wirtschaftliche Untersuchungen durchgeführt. Dafür wurden die Investitionen und der Einsatz von Blindleistungskompensationsanlagen (BKA) mit bereits installierten EEA zur Bereitstellung von Blindleistung verglichen. In diesen Untersuchungen hat sich gezeigt, dass EEA eine konkurrenzfähige Ergänzung zu BKA darstellen und in Teilen eine Ertüchtigung der Wechselrichter die bessere Investitionsentscheidung sein kann. Die obenstehende Abbildung zeigt die Ergebnisse der Kostenkalkulation innerhalb der Kapitalwert-Szenarien. Es ist deutlich zu erkennen, dass die EEA von ihren nicht vorhandenen oder nur geringen Kapitalkosten (CAPEX) profitieren. Durch eine Integration der EEA in das BM der Netzbetreiber können somit In-



Spezifische Verluste durch die Blindleistungsbereitstellung einer beispielhaften EEA für verschiedene Spannungen

### Net present Value Scenario Costs



Investition in verschiedene Blindleistungsbereitstellungsoptionen

vestitionskosten eingespart werden und damit Kosten, die volkswirtschaftlich zu tragen wären. Gegenwärtig besteht bei den Netzbetreibern für diesen Fall jedoch keine ausreichende Anreizwirkung. Die aktuelle Anreizregulierungsverordnung (AregV) sieht vor, dass v. a. CAPEX verzinst werden, Betriebskosten (OPEX) erhalten hingegen keine Verzinsung. Da die Kosten für die Bereitstellung der Blindleistung in der Kostenkalkulation der AregV den beeinflussbaren Betriebskosten zugeordnet werden, erhält somit die Investition in eine Kompensationsanlage den Vorzug.

Neben der fehlenden Anreizwirkung für Netzbetreiber existiert in Deutschland kein transparentes Vergütungssystem, das Anreize zur Bereitstellung von Blindleistung durch Anlagenbetreiber fördert, wie z. B. der Service-Related Bonus aus der zuvor beschriebenen Wirtschaftlichkeitsuntersuchung. Dazu wurden im Projekt verschiedene Inhalte der aktuellen Diskussion analysiert, die sich mit dem Thema der Beschaffung und Ver-

gütung von Blindleistung beschäftigen. Aus den Inhalten konnten grundlegende Merkmale erarbeitet werden, die bei einer Vergütung zu berücksichtigen sind. Dieser Rahmen wurde mit den Inhalten der in Deutschland festgelegten Mindestanforderungen der technischen Anschlussregeln (TAR) zusammengeführt. Daraus sind vereinfachte Vergütungsmodellansätze für die Bereitstellung von Blindleistung entstanden.

Die Arbeiten innerhalb des Projektes haben gezeigt, dass EEA eine Alternative oder Ergänzung zur Errichtung von BKA darstellen und deren Einsatz technische, wirtschaftliche sowie volkswirtschaftliche Vorteile mit sich bringen kann. Neben dem bilanziellen Ausgleich von Blindleistungsbedarfen erfüllen BKA weitere Funktionen zur Wahrung der System-

stabilität, die vom Netzbetreiber ebenfalls zu berücksichtigen sind. Inwieweit EEA diese Funktionen erfüllen können, wurde im Rahmen des Projektes nicht untersucht.

#### Q-Integral

Insbesondere HS-Netze haben im zukünftigen BM eine besondere Bedeutung. Zum einen entstehen in den Höchstspannungsnetzen die größten Blindleistungsbedarfe, zum anderen lassen sich EEA auf der HS-Ebene besonders effizient zur Blindleistungsbereitstellung und damit zur Unterstützung vor- und nachgelagerter Netzebenen nutzen.

Im Projekt Q-Integral steht die Schnittstelle zwischen VN und ÜN im Fokus der Untersuchungen – s. untenstehende Abbildung. In Zusammenarbeit mit den Netzbetreibern 50Hertz sowie den drei unterlagerten Verteilungsnetzbetreibern E.DIS, TEN und WEMAG wird ein großer Teil des 50Hertz-Netzes und der unterlagerten 110-kV-Netze sowie einzelne Mittelspannungsnetze in einem Netzmodell abgebildet – siehe Abbildung nachfolgende Seite. Mit dem Netzmodell werden Ansätze für ein netzbetreiber- und spannungsebenenübergreifendes BM entwickelt. Eine Darstellung dieses BM-Konzeptes findet sich in der untenstehenden Abbildung.

Hierfür wird das am elenia entwickelte aktive BM an die neuen Anforderungen angepasst und um weitere Module wie z.

#### Projektsteckbrief

**Projektname**  
PV-Wind-Symbiose

**Projektlaufzeit**  
Oktober 2015 – Juni 2019

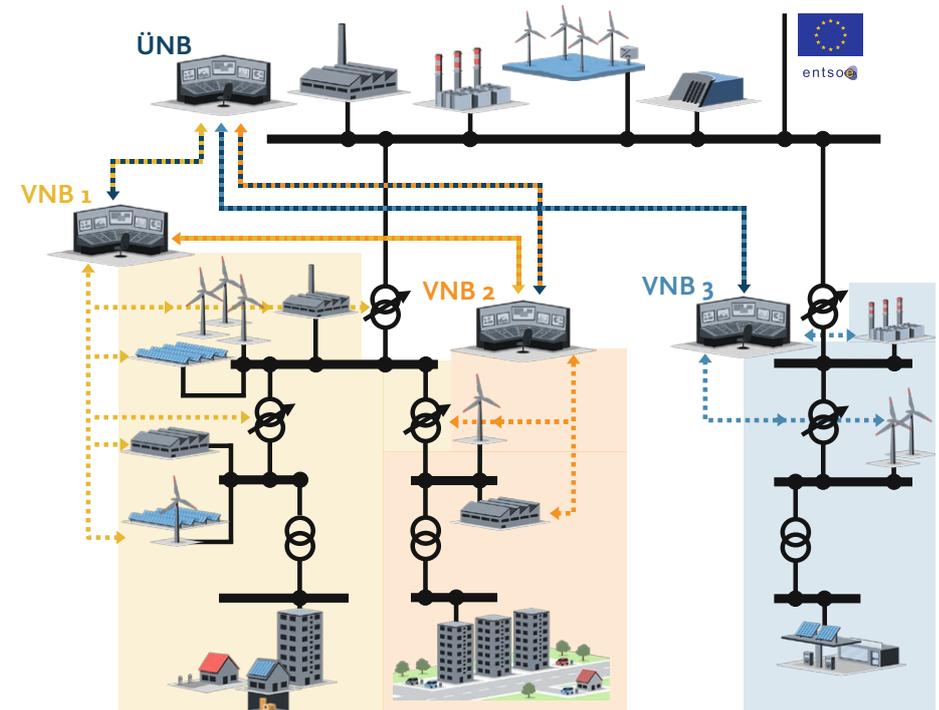
**Projektpartner**  
Fraunhofer ISE, SMA Solar Technology, ENERCON, MITNETZ STROM

**Kontakt**  
Hartmudt Köppe, M.Sc.  
h.koeppe@tu-bs.de

Merten Schuster, M.Sc.  
m.schuster@tu-bs.de



Gefördert durch:  
 Bundesministerium für Wirtschaft und Energie  
 aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages



←••••• Datenfluss (P,Q, Setpoints etc.)

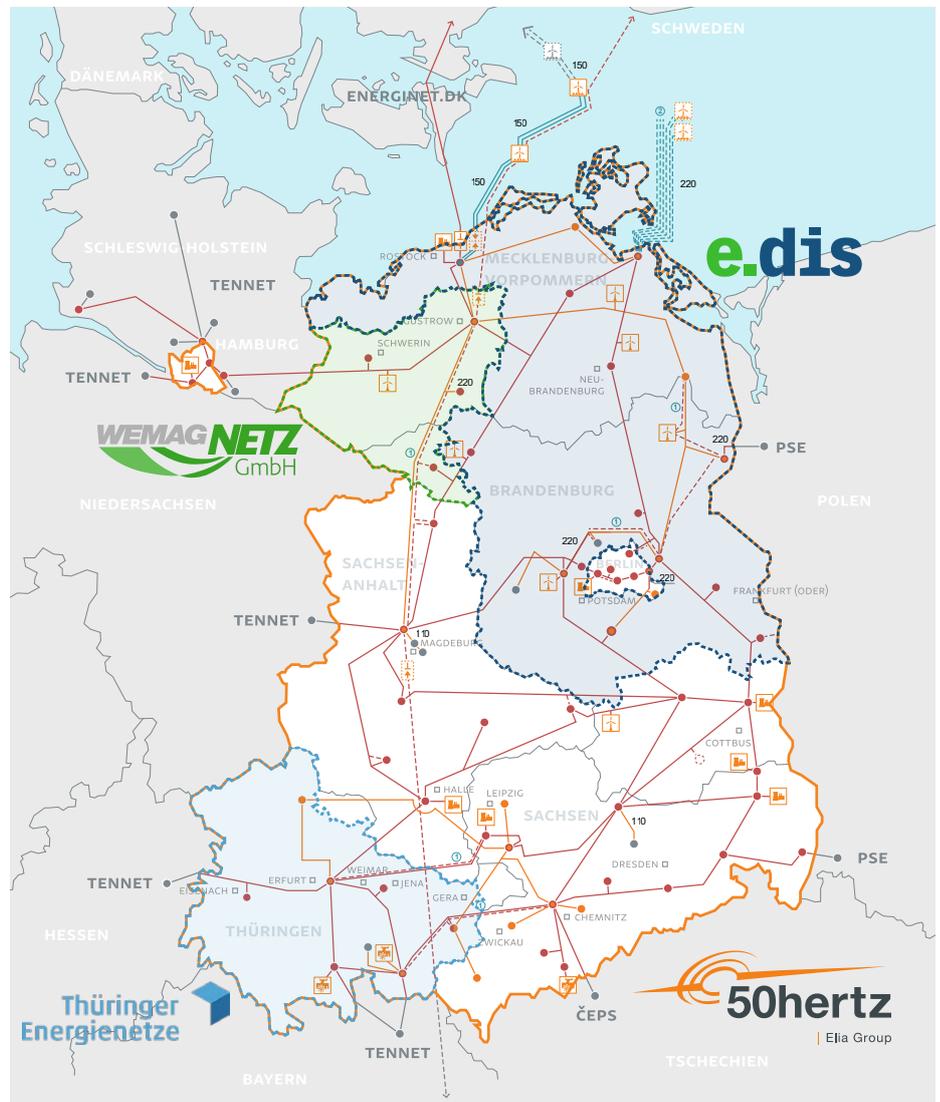
Netzbetreiber- und spannungsebenenübergreifendes BM

B. eine Blindleistungsprognose ergänzt. Das Ziel anschließender technischer und wirtschaftlicher Untersuchungen ist Handlungsempfehlungen in Bezug auf betriebliche sowie planerische Aspekte eines zukünftigen BM zu formulieren. Im Hinblick darauf werden die Auswirkungen verschiedener Blindleistungsregelstrategien auf die Netzebenen untersucht und mögliche Effizienzgewinne und Synergieeffekte des ganzheitlichen Ansatzes aufgezeigt. Durch die umfassende technische und wirtschaftliche Analyse verschiedener Blindleistungsquellen sollen Schlüsse auf einen volkswirtschaftlichen Mehrwert gezogen werden. Praktische Unterstützung bei der Analyse der Wirtschaftlichkeit von EEA erhält das elenia durch den Anlagenbetreiber und -projektor BayWa r.e. Wenn erneuerbare Energiequellen zukünftig einen erheblichen Beitrag zur Systemstabilität durch die Blindleistungsbereitstellung leisten, muss sichergestellt werden, dass die Verfügbarkeit zu jedem Zeitpunkt gegeben ist. Innerhalb des Projektes werden dafür am elenia Prognoseverfahren für die Blindleistungsbedarfe erarbeitet und Ansätze entworfen, die bei einem Kommunikationsausfall einen zuverlässigen Netzbetrieb sicherstellen.

Neben den Arbeitspaketen am elenia werden am Fraunhofer ISE die Auswirkungen der vermehrten Blindleistungsbereitstellung auf die Schutzsysteme analysiert. Unterstützt wird das Fraunhofer dabei durch die SIEMENS AG und SCADA International. Darüber hinaus wird das Fraunhofer Dynamiken verschiedener Blindleistungsquellen und deren Auswirkungen auf die Netzstabilität untersuchen.

Von der OTH Regensburg wird das BM aus netzplanerischer Sicht bearbeitet. Dazu wird analysiert, wie bereits im Netzplanungsprozess Blindleistungsbedarfe eingespart werden können. Zusammen mit dem KBR Kompensationsanlagenbau soll ein Prototyp für die Einbindung industrieller Kompensationsanlagen in das BM entwickelt werden.

Derzeit wird in Zusammenarbeit mit den geförderten sowie assoziierten Partnern das gemeinsame Netzmodell erarbeitet. Aufbauend darauf werden Netz- und Simulationsszenarien auf Grundlage veröffentlichter Netzentwicklungsplänen mit den Annahmen der beteiligten Netzbetreiber entworfen. Parallel laufen erste Arbeiten zum akti-



Netzbetreiber- und spannungsebenenübergreifendes Netzmodell [50Hertz 2017]

ven BM des elenias. Für die Weiterentwicklung und Anpassung der Regelalgorithmen wird die Interoperabilität des zu entwerfenden BM an den relevanten Schnittstellen des BM untersucht. Dies erfolgt unter Berücksichtigung der integralen Wirkung des BM innerhalb des Netzes. Der dahinterstehende Mo-

dellierungsprozess verfolgt das Ziel ein konsistentes Verständnis zur Interaktion verschiedener Berührungspunkte des BM zu erhalten. Aus dem Ergebnis lässt sich der Handlungsspielraum des BM definieren.



## Projektsteckbrief

### Projektname

Q-Integral – Aktives BM mit dynamischen Blindleistungsquellen an der Schnittstelle Verteilnetz und Übertragungsnetz

### Projektlaufzeit

April 2019 – März 2022

### Projektpartner

Fraunhofer ISE, OTH Regensburg, KBR Kompensationsanlagenbau, 50Hertz, BayWa r.e., E.DIS, SIEMENS, TEN, WEMAG

### Kontakt

Hartmudt Köppe, M.Sc. - h.koeppe@tu-bs.de  
Merten Schuster, M.Sc. - m.schuster@tu-bs.de

# Q-TEGRAL

Gefördert durch:



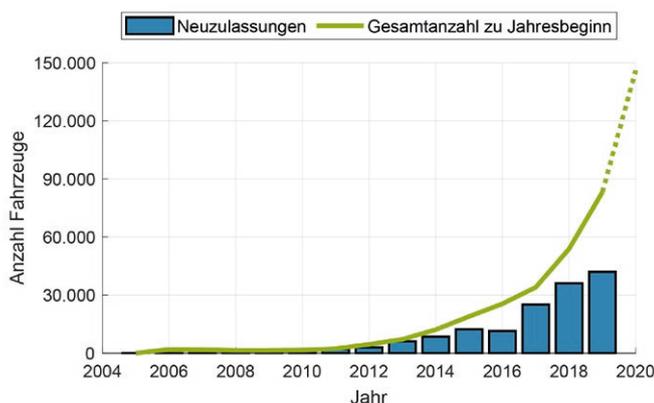
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



# Netzintegration Elektromobilität

## Technische Lösungsansätze zur Kapazitätserhöhung von Niederspannungsnetzen für Elektrofahrzeuge

Bereits 2009 wurden mit dem Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität durch die Bundesregierung die Ziele formuliert, die Forschung, die Entwicklung, die Marktvorbereitung und die Markteinführung von batterieelektrisch betriebenen Fahrzeugen in Deutschland voranzubringen. Das Erreichen des ursprünglichen Ziels von einer Millionen Elektrofahrzeuge wurde aufgrund der aktuellen Entwicklung von 2020 auf das Jahr 2022 verschoben und je nach Szenario wird sich die Anzahl der Elektrofahrzeuge auf 4,2 bis 7 Millionen bis 2030 erhöhen. Die aktuellen Entwicklungen zeigen für Deutschland auch eindeutig einen exponentiellen Anstieg der Fahrzeugzahlen.



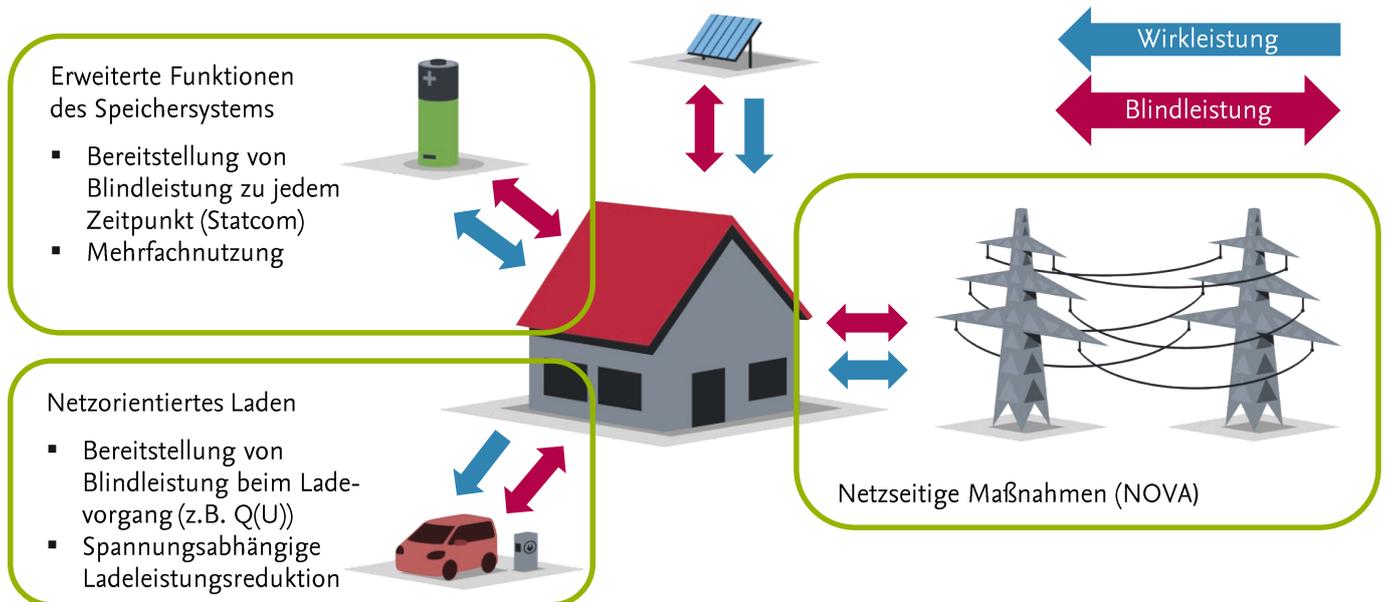
Entwicklung rein-elektrischer Fahrzeuge in Deutschland (Stand August 2019)

Ein großer Anteil der Ladevorgänge wird im privaten Bereich zu Hause stattfinden. Gute Voraussetzungen bieten vorstädtische Wohngebiete aufgrund deren Struktur und insbesondere aufgrund von eigenen Garagen und Carports. Die maximale Ladeleistung liegt in diesen Fällen bei 11 bis 22 kW. In Abhängigkeit von sozialen und demographischen Faktoren können Elektromobilitäts-Hotspots mit einer hohen Durchdringung an Elektrofahrzeugen in bestehenden Niederspannungsnet-

zen entstehen. Diese Netze waren jedoch ursprünglich nicht für diese Komponenten ausgelegt. Trotzdem muss ein sicherer Netzbetrieb gewährleistet werden. Grundsätzlich bieten Netze eine gewisse Kapazität für die Integration von Elektrofahrzeugen. In Abhängigkeit der tatsächlichen Netzstrukturen sind bereits gewissen Durchdringungen an Elektrofahrzeugen bei typischen Fahr- und Ladeverhalten möglich, bevor Spannungsbandverletzungen oder Überlastungen von Betriebsmitteln auftreten. Die großen Herausforderungen stellen dabei Tage dar, an denen von hohen Fahrleistungen und relativ zeitgleichen Ladenvorgängen ausgegangen werden kann, wie z. B. Sonntage mit schönem Wetter im Frühling/Sommer oder die Weihnachtsfeiertage. Aus diesem Grund sind geeignete Maßnahmen notwendig, sodass selbst in solchen Situationen der sichere Netzbetrieb gewährleistet wird und die entsprechenden Grenzen eingehalten werden. Diese Maßnahmen werden auf drei unterschiedliche Ebenen mit individuellen Funktionsmöglichkeiten unterteilt: Fahrzeug, Haushalt und Netz.

### Netzorientiertes Laden

Beim netzorientierten Laden liegt der Fokus auf dem Elektrofahrzeug bzw. der Ladeinheit und deren Verhalten beim Ladevorgang. Der gewöhnliche Ladevorgang ist durch einen Bereich mit konstanter Ladeleistung und einen zweiten mit abnehmender Ladeleistung ab einem SOC von 80 % charakterisiert. Das netzorientierte Laden umfasst die Blindleistungsbereitstellung und eine Ladeleistungsreduktion. In der Norm VDE AR-N 4100 wird bereits die Blindleistungsbereitstellung mit einer Nennleistung über 12 kVA für induktive Ladesysteme und für DC-Laden festgelegt. Insbesondere eine bedarfsgerechte Blindleistungsbereitstellung beim Q(U)-Verfahren sorgt als spannungsstabilisierende Maßnahme für eine Erhöhung der Aufnahmekapazität von Niederspannungsnetzen. Eine zusätzliche spannungsabhängige Ladeleistungsreduktion kann diese Kapazität zusätzlich erhöhen. Zur Vermeidung einer möglichen Diskriminierung wird eine Mindestladeleistung definiert.



Übersicht technischer Lösungsansätze

### Erweiterte Funktionalität von PV-Speichersystemen

Die Einspeisespitze einer PV-Anlage und der gewöhnlich Ladezeitraum eines Elektrofahrzeuges liegen zeitlich auseinander. Mithilfe eines Speichers können diese Vorgänge jedoch gekoppelt werden. Die Einspeisespitze der PV-Anlage in der Mittagszeit wird durch das Einspeichern reduziert und in den Abendstunden kann die Ladung des Elektrofahrzeuges (teilweise) aus dem Speicher erfolgen. Durch diesen Betrieb kann die Belastung des Netzes reduziert werden.

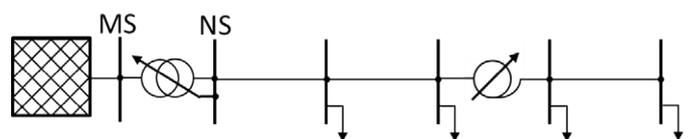
Problematisch sind jedoch die Wintermonate aufgrund der kürzeren Tage und schlechten Bedingungen und allgemein Tage mit schlechtem Wetter. In diesen Zeiträumen wird der Speicher wenig bis gar nicht genutzt. Für diese Zeiträume ist eine erweiterte Funktionalität notwendig. Diese umfasst zum einen den STATCOM-Betrieb, wodurch immer eine Blindleistungsbereitstellung und somit sogar ein Phasenschieberbetrieb möglich wird. Zum anderen ist das Laden des Speichers aus dem Netz ein wichtiger Ansatz für die beschriebenen Zeiträume. Aus wirtschaftlichen Gründen wird dieser Ansatz bislang nicht genutzt, weshalb entsprechende Anreize notwendig sind. Beide Funktionalitäten erhöhen die Aufnahmekapazität von Niederspannungsnetzen, weil auf der einen Seite die Spannung durch Blindleistung stabilisiert und auf der anderen Seite durch die Energie im Speicher das Netz entlastet werden kann.

### Netzseitige Maßnahmen

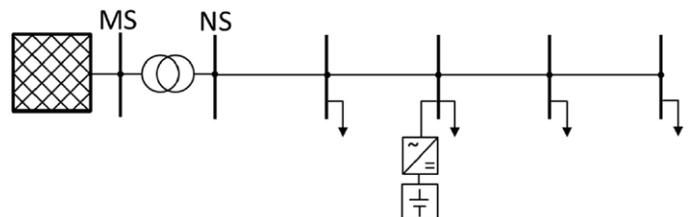
Der dritte Ansatz umfasst Maßnahmen im Netz. Mithilfe von transformatorischen Komponenten können die nutzbaren Bereiche des Spannungsbandes erhöht werden. Diese umfassen den regelbaren Ortsnetztransformator (rONT) und den Strangregler.

Der Netzspeicher hat identische Funktionen wie der vorgestellte PV-Speicher. Durch Blindleistungsbereitstellung kann er spannungstabilisierend wirken und zum anderen entlastet er das Netz durch die Bereitstellung von Wirkleistung. Die dritte mögliche Maßnahme ist die Verstärkungsleitung oder der Ausbau mit dem Ziel einer Senkung der Netzimpedanz und somit einer Erhöhung der Aufnahmekapazität.

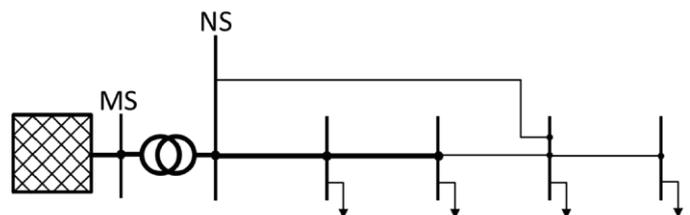
### rONT oder Strangregler



### Netzspeicher



### Verstärkungsleitung oder Ausbau



Überblick netzseitiger Maßnahmen



### Kontakt

Jonas Wussow  
 j.wussow@tu-braunschweig.de  
 +49 531 - 391 7707



# lautlos&einsatzbereit

Entwicklung eines Leitfadens zur integrierten Planung und Steuerung von Flotten-, Energie- und Ladeinfrastruktur zur Erreichung eines ökologischen und ökonomischen Betriebs von Fahrzeugflotten unter Extrembedingungen bei der Polizei Niedersachsen

Im Rahmen des auf drei Jahre angelegten Forschungsprojektes **lautlos&einsatzbereit** entwickelt die Niedersächsische Polizei gemeinsam mit dem Niedersächsischen Forschungszentrum für Fahrzeugtechnik (NFF) einen Leitfaden zur integrierten Planung und Steuerung von Flotten-, Lade- und Energieinfrastruktur. Ziel ist die Steigerung von Elektromobilität auch bei Fahrzeugflotten, die Extrembedingungen ausgesetzt sind, wie z.B. Polizeifahrzeugen.

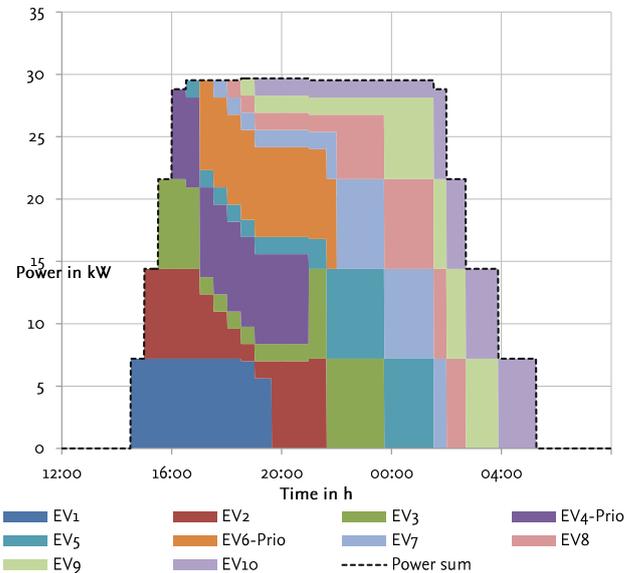
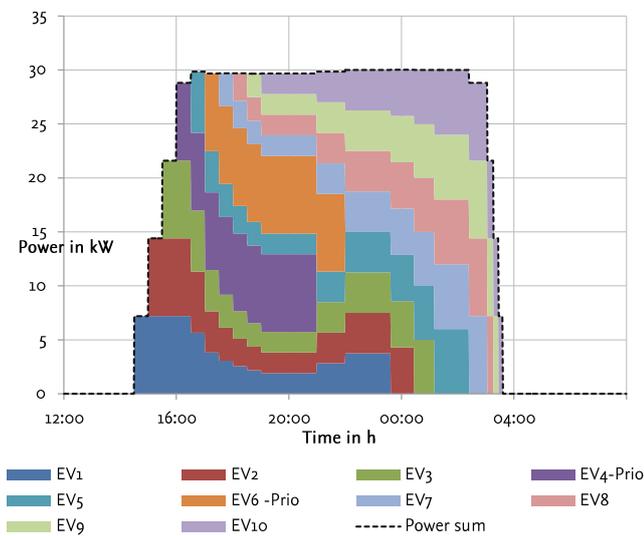
Polizeiflotten zeichnen sich durch eine Vielzahl verschiedener Fahrzeugtypen, eine hohe Fahrzeuganzahl und eine große Sichtbarkeit ihrer Fahrzeuge aus. Aufgrund der Vorbildfunktion der Polizei in der Gesellschaft ist ein nachhaltiger und umweltfreundlicher Betrieb dieser Flotten durch den Einsatz neuer Antriebstechnologien von besonderer Relevanz. Deshalb nimmt die Polizei eine Vorreiterrolle ein und integriert batterieelektrische (BEV) und Plug-In-Hybrid Fahrzeuge (PHEV) in ihre Flotten. Die Nutzung von BEV und PHEV geht im Vergleich zu konventionell angetriebenen Fahrzeugen mit langen Ladezeiten, begrenzten Reichweiten und einer daraus resultierenden begrenzten Verfügbarkeit der Fahrzeuge einher. Für den Betrieb der Fahrzeuge wird darüber hinaus eine Energie- und Ladeinfrastruktur benötigt. Mit dem geplanten, kombinierten Einsatz von BEV und PHEV im Einsatz- und Streifendienst steht die Polizei vor der Herausforderung einen kontinuierlichen Einsatz bei einer 24/7-Verfügbarkeit der Fahrzeuge zu gewährleisten. Dadurch entstehen eine Vielzahl von Abhängigkeiten zwischen der Flotten-, Energie- und Ladeinfrastruktur und die Planungs- und Steuerungskomplexität erhöht sich um ein Vielfaches.

Im Projekt **lautlos&einsatzbereit** werden 50 BEV und PHEV im Polizeidienst Niedersachsen für die Einsatzbereiche des Streifendienstes, des Kriminalermittlungsdienstes und für Verwaltungsfahrten in Betrieb genommen und erprobt. Im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitforschung werden die Mobilitäts- und Ladebedarfe der verschiedenen Anwendungsbereiche erhoben. Darauf aufbauend wird ein integriertes

System für die Flottenplanung und -steuerung sowie das Lademanagement entwickelt, das den besonderen Anforderungen des Polizeieinsatzes gerecht wird. Die Herausforderung des neuen Planungs- und Managementsystems besteht darin, die – vor allem im Einsatz- und Streifendienst – extremen Anforderungen, wie nicht planbare Einsatzzeiten und -umfänge sowie die Notwendigkeit einer nahezu 24/7-Verfügbarkeit zu erfüllen.

Im Ergebnis des Projekts entsteht ein Leitfaden für die integrierte Planung sowie den ökologischen und ökonomischen Betrieb von Fahrzeugflotten unter extremen Einsatzbedingungen. Dieser kann die Entscheidungsträger bei der Planung, der Beschaffung und dem Betrieb von E-Fahrzeug-Flotten vor allem unter extremen Einsatzbedingungen unterstützen (z. B. weitere Polizeiflotten, aber auch Feuerwehr oder Rettungsdienste).

Innerhalb des Arbeitspaketes zur Lade- und Energieinfrastruktur wird an deren Planung sowie an deren Steuerung geforscht. Die Herausforderung bei dem entwickelten Lademanagement liegt bei der nicht planbaren Flotte. Die unsicheren Einsatzzeiten der Polizei führen dazu, dass keine zuverlässige Planung erfolgen kann. Eine weitere Betrachtung fällt auf den begrenzten Netzanschluss eines Standortes. Muss dieser ausgebaut werden ist dies mit hohen Kosten verbunden. Da die Polizeidienststellen immer nur über begrenzte Mittel verfügen, kann dieser Punkt ein Hemmnis bei der Anschaffung von Elektrofahrzeugen darstellen. Ebenso bringt ein ausgereiftes Lade- und Energiemanagementsystem Kosten mit sich. Die Aufnahme einzelner Energieflüsse, Prognose von Fahrten und die Aufnahme des Ladezustands ist mit zusätzlichen Ausgaben und Aufwand verbunden, die die Standorte sich häufig nicht leisten können. Daher ist eine einfache und effektive Umsetzung eines Lademanagements, mit dem Kosten im Netzanschluss eingespart werden können und welches einfach in der Umsetzung ist, entwickelt worden. Für einen



Simulationsergebnisse der Ladealgorithmen Equal (links) und First Come First Serve (rechts) mit zwei Prioritätsfahrzeugen eines statischen Lademanagements (Pronobis, O., Kurrat, M.: Assessment of Static Charging Management Methods, ETG Kongress, Esslingen am Neckar, 8.- 9. Mai 2019)

solchen Anwendungsfall wurden Ladealgorithmen des statischen Lademanagements untersucht. In obiger Abbildung ist der Ladeverlauf der beiden Algorithmen Equal und First Come First Serve (FCFS) dargestellt. Die Ladealgorithmen lassen sich standortspezifisch in einer Simulation mit Benutzeroberfläche vergleichen. Somit lässt sich z. B. erkennen, ob ein Ausbau des Netzanschlusses notwendig ist.

Eine Stufe über dem statischen Lademanagement steht das dynamische Lademanagement, welches sich ändernde Echtzeitdaten erhält. Zu diesen Daten gehören z. B. die PV-Einspeisung, die Gebäudelast und der Strompreis. Mit diesen Eingangsparametern lassen sich die Ladevorgänge nicht nur funktional, sondern auch ökologisch und ökonomisch ausrichten. Eine komplexere Ebene erreicht das System sobald Prognosen zum Ladezustand und zur Ankunfts- bzw. Abfahrtszeit mit einfließen. Innerhalb der Forschungsarbeit wurden dafür mit dem Maschinellen Lernen und der Monte-Carlo-Simulation zwei Methoden analysiert und verglichen. Welche Eingangsdatenmenge das beste Resultat erzeugt, wird zum aktuellen Zeitpunkt untersucht.



Bundesweiter Workshop im November 2018

Zum Ende des Projektes wurden viele Daten zu den Ladevorgängen und den Fahrten aufgezeichnet. Die Auswertung dieser Daten erfolgt in dem Abschlussbericht. Die daraus zu ziehenden Schlüsse und Handlungsempfehlungen werden in dem Leitfaden, der das Ergebnis des Projektes darstellt, ge-

sammelt. Innerhalb des Leitfadens finden ebenso die Fragestellungen und Anmerkungen aller Bundesländer und anderer Länder (z.B. Luxemburg, Dänemark) Gehör, die innerhalb eines bundesweiten Workshops Ende vergangenen Jahres gesammelt wurden.



## Projektsteckbrief

**Projektname**  
lautlos&einsatzbereit



**Projektlaufzeit**  
September 2016 – März 2020

**Projektpartner**  
Niedersächsisches Ministerium für Inneres und Sport, Landespolizeipräsidium (Konsortialführer)

- Polizeidirektion Braunschweig
- Zentrale Polizeidirektion Niedersachsen
- Niedersächsisches Forschungszentrum Fahrzeugtechnik (NFF)
- Institut für Automobilwirtschaft und Industrielle Produktion, TU BS
- Institut für Fahrzeugtechnik, TU BS
- Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik, TU BS

**Kontakt**  
Olga Pronobis  
o.Pronobis@tu-braunschweig.de  
+49 531 - 391 7702

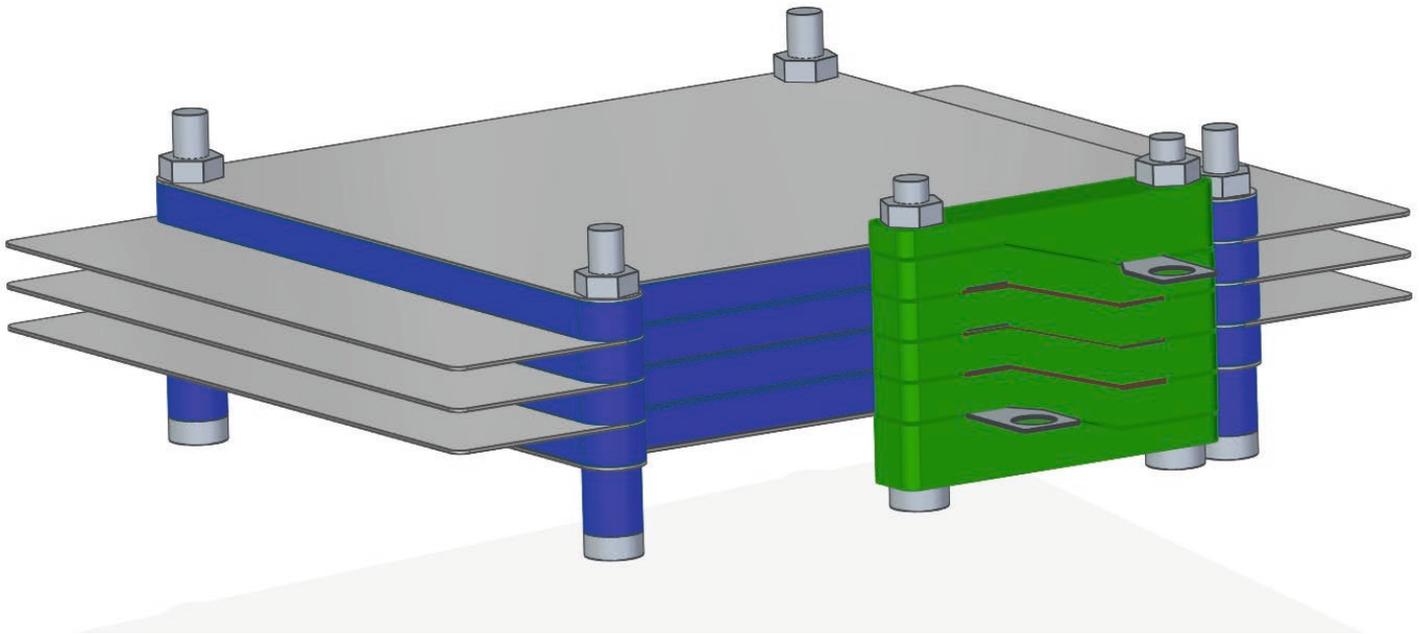
[www.tu-bs.de/forschung/zentren/nff/lautlos](http://www.tu-bs.de/forschung/zentren/nff/lautlos)

 [@Projekt\\_lautlos](https://twitter.com/Projekt_lautlos)

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



# Second Life Speichersysteme

## HV-Fahrzeugbatterien als stationäre Speicherlösung für Prosumer-Haushalte

Durch die aufkommende Elektromobilität werden speziell für Automotive-Anwendungen entwickelte und optimierte Li-Ionen-Batteriespeichersysteme in extrem hohen Stückzahlen gefertigt. Dadurch wird eine so hohe Kostendegression bei diesen Speichersystemen erreicht, wie sie bei Batterien für stationäre Anwendungen (USV, Netzsystemdienstleistungen, energiewirtschaftliche Betriebsarten, Ausgleich volatiler Stromnachfrage und -erzeugung aus EE usw.) alleine nie möglich gewesen wäre. Diese Kostendegression und die technologische Qualitätsverbesserung (wie Wirkungsgrad, Zuverlässigkeit, Lebensdauer) eröffnen nun vollkommen neue Perspektiven für stationäre Speichersysteme sowohl im Hinblick auf Wirtschaftlichkeit als auch für technische Funktionalitäten. Da die Anforderungen an Batteriespeicher im Antriebsstrang von E-Fahrzeugen wesentlich höher sind, können stationäre Speichersysteme darüber hinaus auch als 2nd-Life-Speicher bestehend aus Fahrzeugbatterien aufgebaut werden. Voraussetzung dafür ist eine wirtschaftlich effiziente Aufbereitung der Batterien für den stationären 2nd-Life-Einsatz, zu der insbesondere die Zustandsbestimmung und Charakterisierung dieser Module gehören. Anschließend kann die Konfiguration des Batteriespeichers erfolgen, welcher mittels eines optimierten Batteriemanagementsystems überwacht und hinsichtlich seiner Betriebsweise geregelt wird.

### Konfiguration von 2nd-Life Speichersystemen

Um den stationären Speicher zu konfigurieren, wird der Bedarf eines Haushaltes mit 4 MWh elektrischen Energiebedarfs zugrunde gelegt. Dazu wird der Speicher mit einer benötigten Leistung von 20 kW und einem Nennenergieinhalt von 12,5 kWh dimensioniert. Die Bestimmung der Entladeschlussspannung erfolgt anhand von Vorgaben zur Schonung der peripheren Leistungselektronik sowie zum Erreichen eines guten Wirkungsgrades selbiger. Der Wert wurde zu 300 V definiert.

Als 1st-Use HV-Batterien dienen Batteriemodule mit einer

Nennspannung von je 14,8 V sowie einer Nennkapazität von 75 Ah. Gemäß der Annahme, dass noch mindestens 80 % der ursprünglichen Kapazität nutzbar sind (Gesundheitszustand, engl. „State of Health“ (SoH)) und entsprechend einer batteriechonenden Betriebsstrategie (u.a. Begrenzung des Lade-/Entladehub) die genutzte Kapazität 90 % der noch vorhandenen Kapazität beträgt, wird von einer nutzbaren Kapazität von 70 % ausgegangen. Entsprechend der Modul-Nennwerten ergibt sich für das Speichersystem die Konfiguration wie in der Tabelle dargestellt.

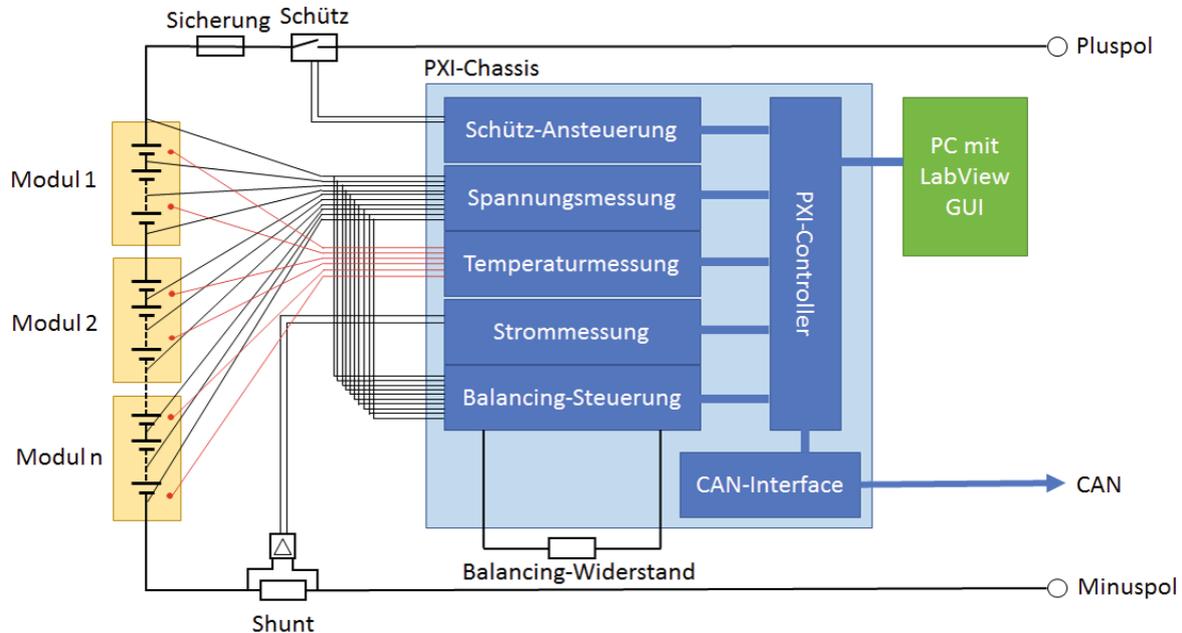
Speicher-System	Soll	Ist	Moduldaten	
$E_{\text{Speicher}}$	12,5 kWh	20 kWh	$E_N$	1086 Wh
$U_{\text{Speicher}}$	320 V	370 V	$U_N$	14,8 V
$C_{\text{Speicher}}$	33,8 Ah	54 Ah	$C_N$	75 Ah
System-Konfig.	100s3p		$C_{\text{Nutz}}$	54,0 Ah

Konfiguration eines 2nd-Life-Speichers

Bei dieser Berechnung liegen 25 in Reihe geschaltete Module zugrunde, wobei jedes Modul eine Verschaltung von 4s3p aufweist. Somit ergibt sich eine Systemkonfiguration von 100s3p. experimentelle Validierung der getroffenen Annahmen steht noch aus.

### Zustandsbestimmung der Batteriemodule

Aussagekräftige, verlässliche Methoden zur Zustandsbestimmung von Batteriemodulen gibt es derzeit noch nicht. Daher macht die Entwicklung dieser den Kern der Forschungsarbeit aus. In Anlehnung an die Untersuchung von Batteriezellen



### Das BMS als Überwachungs- und Steuerungsinstrument

werden die Prüfverfahren zur Kapazitäts- und Innenwiderstandsmessung sowie die elektrochemische Impedanzspektroskopie (EIS) auf die Prüfung von Modulen übertragen. Die bisherigen Untersuchungen zeigen, dass die EIS auf Batteriemodule anwendbar ist. Die tatsächliche Aussagekraft der Messergebnisse wird noch bestimmt und damit auch, ob die EIS eine geeignete Prüfmethode für Batteriemodule ist. Erste Ergebnisse deuten darauf hin, dass insbesondere der Kennwert „SoH 80 %“ nicht das ausschlaggebende Kriterium für die Beurteilung des Alterungszustands ist, sondern vor allem die Entwicklung des Innenwiderstandes über der Anzahl der durchlaufenen Vollzyklen. Die Untersuchungen werden dieser Hypothese entsprechend fortgesetzt.

### Überwachung per Batteriemanagementsystem

Zur Überwachung und Regelung des aufzubauenden Speichers ist die Entwicklung und der Aufbau eines universellen Batteriemanagementsystems (BMS) nötig, welches frei programmierbar ist und stets den sicheren Betrieb des Batteriesystems gewährleistet. Die Umsetzung dieses BMS erfolgt auf Basis eines PXI-Systems, die Programmierung erfolgt mittels LabVIEW. Vorteile dessen sind unter anderem:

- Realisierbarkeit sehr hoher Datenraten und geringe Latenzen
- PXI-Module sind für diverse Messaufgaben und I/O-Schnittstellen erhältlich
- Einbindung über Embedded-Controller für stand-alone-Lösungen oder Remote-Controller für Steuerung über PC/Laptop

Dieses BMS ermöglicht die Eingabe von sowohl Modulen als auch einzelner Zellen und liefert über eine hinterlegte Datenbank den Verlauf der SoC-Kurve (SoC: Ladezustand, engl. State of Charge). Darüber hinaus können Modul- bzw. Zellparameter und die Zellchemie angegeben werden. Es werden Temperatursensoren zur Temperaturüberwachung eingebunden. Eine graphische Darstellung aller Spannungen und Temperaturen ist möglich. Zudem hat das BMS Zugriff auf das Hauptschütz, um im drohenden Fehlerfall den Stromfluss unterbrechen zu können.

Des Weiteren ist ein passives Balancing der Zellen implementiert. Das passive Balancing bewirkt eine gezielte Entladung einzelner Zellen oder Module, welche einen höheren SoC aufweisen. Ziel dabei ist es, alle Zellen bzw. Module auf den gleichen SoC zu bringen, um im weiteren Betrieb eine gleichmäßige Ladung oder Entladung zu ermöglichen. Die Erweiterung auf die Möglichkeit zum aktiven Balancing der Module ist ein Ziel bis zum Projektabschluss. Das aktive Balancing ist ein Ladungsausgleich, bei dem die überschüssige Ladung einzelner Zellen bzw. Module zunächst zwischengespeichert und im nächsten Schritt genutzt wird, um den SoC weniger geladener Zellen oder Module anzugleichen.



### Projektsteckbrief

**Projektname**  
NetProsum2030

**Projektlaufzeit**  
September 2017 – August 2020

**Projektpartner**  
Institut für Elektrische Maschinen,  
Antriebe und Bahnen (IMAB),  
IAV GmbH,  
SMA Solar Technology AG

**Kontakt**  
Julia Brockschmidt  
j.brockschmidt@tu-braunschweig.de  
+49 5321 - 391 9732

Jonathan Ries  
j.ries@tu-braunschweig.de



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



# Optimierte Zellformierung

## Beschleunigung und energetische Optimierung der Zellformierung

Die Formierung sowie die anschließende Reifung gehören zu den wichtigsten Prozessschritten in der Produktion von Lithium-Ionen-Zellen. Während der Formierung entsteht durch die ersten Ladezyklen die Grenzschicht zwischen Elektrolyt und Aktivmaterial (Solid Electrolyte Interphase, kurz: SEI), deren Beschaffenheit einen wesentlichen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit und das Alterungsverhalten der Zellen hat. Im Anschluss an die Formierung werden die Zellen über mehrere Tage hinweg gereift, um die Zelleigenschaften durch die Umsetzung restlicher Nebenprodukte sowie die weitere Verteilung des Elektrolyts zu stabilisieren. Während dieser Prozessschritte geht von den Zellen ein hohes Gefährdungspotential aus, da aufgrund der chemischen Reaktionen innerhalb der Zellen die Bildung explosionsfähiger Gase begünstigt wird. Sowohl die Formierung als auch die Reifung stellen derzeit zeitaufwändige und energieineffiziente Prozessschritte dar, die aufgrund der Vielzahl an Lagerplätzen sehr kostenintensiv sind. Je nach Wahl der Prozessparameter haben die Zellen Durchlaufzeiten von mehreren Tagen bis Wochen in der Formierung und Reifung. Die dabei umgesetzten Energiemengen tragen einen signifikanten Anteil zu den Kosten des Zellherstellungsprozesses bei. Trotz der hohen Bedeutung innerhalb der Zellproduktion und dem zeitintensiven Anteil am Produktionsprozess ist das bisherige Wissen über die Vorgänge während der Formierung und Reifung sowie dem Einfluss von Prozessparametern auf die Produktqualität sehr begrenzt.

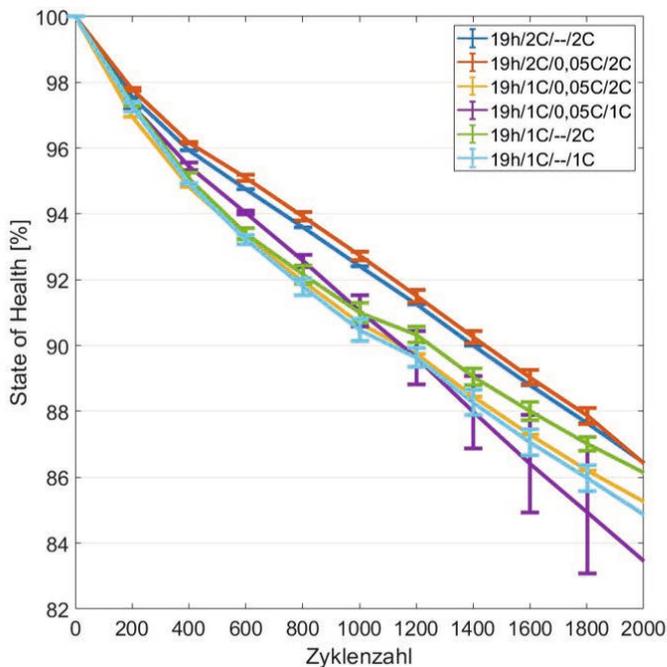
Das Projekt OptiZellForm hat das Ziel, die Formierung zeitlich deutlich schneller und energieeffizienter gestalten zu können. Dabei steht die Erlangung von Erkenntnissen und Wechselwirkungen während der Formierung und Reifung bezogen auf die Zelleigenschaften im Fokus. Zudem erhöht das verbesserte Verständnis die Sicherheit in der Produktion, da das Zellverhalten in Grenzbereichen vorhersehbarer wird und frühzeitiger erkannt werden kann.

### Referenzformierprozedur

Zur Untersuchung der elektro-chemischen Einflussparameter wurde eine Referenzformierprozedur entwickelt. Diese wurde auf Basis der standortspezifischen Formierprozeduren der Projektpartner festgelegt. Voruntersuchungen haben gezeigt, dass ein einziger Lade- und Entladezyklus zur Formierung der am Münster Electrochemical Energy Technology (MEET) gefertigten Pouchzellen (ca. 5 Ah) ausreicht, um diese ohne Qualitätseinbußen herzustellen. Durch den Verzicht von mehreren Formierungszyklen kann die Produktionszeit und der Energieverbrauch deutlich verringert werden. Die Referenzformierprozedur beinhaltet eine definierte Zeitspanne zur Elektrolytbenetzung (Wetting) bevor die Zellen elektrisch geladen werden. Anschließend wird mit einem konstanten Strom (constant current, CC) bis zu einer Ladeschlussspannung von 4,2 V geladen. Darauf folgt eine Konstantspannungsladung (constant voltage, CV) bis der Strom kleiner als 0,05 C ist. Zuletzt wird die Zelle mit einem konstanten Strom (CC) auf 3 V entladen.

Schritt	Schrittart	Modus	Limit
#0	Wetting	-	$t = X_1 \text{ h}$
#1	Ladung	$X_2 \text{ C (CC)}$	$U = 4,2 \text{ V}$
#2	Ladung	$U = 4,2 \text{ V (CV)}$	$I < 0,05 \text{ C}$
#3	Entladung	$X_3 \text{ C (CC)}$	$U = 3,0 \text{ V}$

Referenzformierprozedur



Zyklisierung verschiedener Formierungsprozeduren

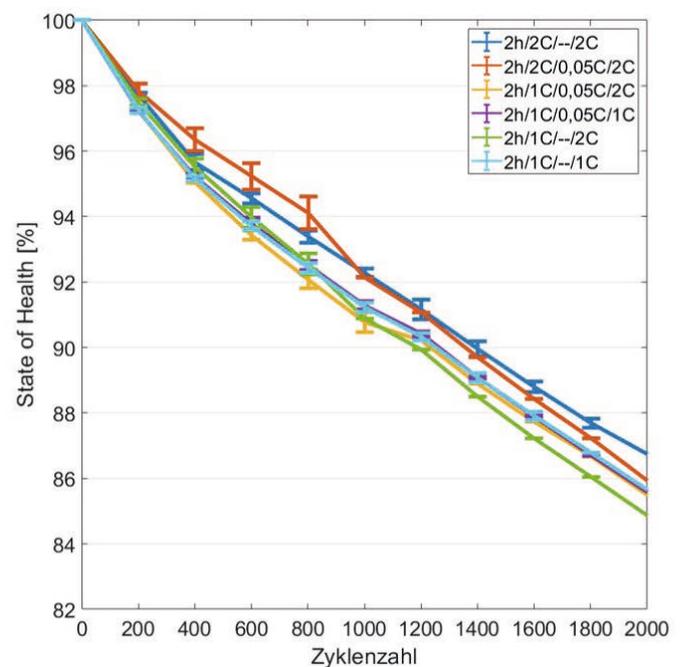
### Parameterstudie

Um den Einfluss einzelner Parameter innerhalb der Referenzformierprozedur zu ermitteln wurde eine Parameterstudie durchgeführt. Dazu wurden die vier ausgewählten Parameter: Wettingzeit, Ladestromstärke, CV-Ladeschritt und Entladestromstärke variiert. Pro Parameter wurden zwei Varianten untersucht. Die Wettingzeit wurde auf 19 h und 2 h sowie die jeweiligen Lade- und Entladestromstärke jeweils auf 1 C und 2 C festgelegt. Außerdem wurde der CV-Ladeschritt jeweils analog zur Referenzformierprozedur integriert bzw. ausgelassen. Innerhalb der Parameterstudie wurden insgesamt zwölf verschiedene Formierprozedurvarianten untersucht (siehe Abbildung).

Auffällig ist, dass während der Zyklisierung keine signifikanten Unterschiede zwischen der Wettingzeit von 19 h bzw. 2 h erkennbar sind, da der Elektrolyt nach 2 h anscheinend bereits vollständig ausgebreitet ist. Zudem wird deutlich, dass der zeitintensive CV-Ladeschritt ebenfalls keinen Einfluss auf das Alterungsverhalten besitzt. Jedoch zeigen die verschiedenen SOH-Verläufe, dass die Formierprotokolle mit höheren Ladeströmen von 2 C (rot und blau) eine leicht bessere Zyklens stabilität aufweisen als die Formierprotokolle mit geringeren Stromraten. Die vergleichsweise hohe Stromrate von 2 C bei einem einzigen Entlade- und Ladeschritt ohne CV-Ladung führt somit nicht nur zu den kürzesten Prozesszeiten, sondern auch zur vergleichsweise besten Zyklens stabilität innerhalb des ausgewählten Versuchsplans.

### Entwicklung optimierter Ladeprofile

Im weiteren Projektverlauf wurden Formierungen mit einem Ladestrom von 3 C durchgeführt, welche allerdings nicht erfolgreich waren. Aufgrund von Lithium-Plating haben sich während der Formierung interne Kurzschlüsse gebildet, welche zur Selbstentladung der Zellen geführt haben. Durch Post-Mortem-Analysen konnte ebenfalls bei den Formierungen mit 2 C-Ladestrom Lithium Plating festgestellt werden. Das Lithium-Plating konnte jedoch durch eine bessere SEI-Beschaffenheit bei höheren Ladeströme bezogen auf die Zellperformance kompensiert werden. Zur Vermeidung von Lithium-Plating wurde ein Simulationsmodell entwickelt, wodurch ein opti-



miertes Schnellladeprofil abgeleitet werden kann. Dieses Modell erzeugt ein Stromprofil, welches das Potential der Anode im positiven Bereich nahe bei 0 V fixiert, um Lithium-Plating aufgrund von negativer Potentiale an der Anode zu vermeiden. Charakteristisch für dieses Stromprofil ist eine hohe Stromrate bei geringen Ladezuständen, welche sich sukzessive hin zu größeren Ladezuständen verringert. Die so formierten Zellen weisen eine bis zu 5 % höhere Entladekapazität als die Zellen aus der Parameterstudie auf. Im weiteren Projektverlauf wird die Zyklens stabilität der Zellen untersucht, um Rückschlüsse auf die SEI-Schicht zu erhalten. Außerdem wird das Simulationsmodell weiterentwickelt.



### Projektsteckbrief

**Projektname**  
OptiZellForm

OptiZellForm

**Projektlaufzeit**  
Juli 2016 – Januar 2020

**Projektpartner**  
MEET (WWU Münster),  
PEM (RWTH Aachen)

**Kontakt**  
Robin Drees  
r.drees@tu-bs.de  
+49 531 391 9730

[www.prozell-cluster.de](http://www.prozell-cluster.de)

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



# Wissensbasierte Batteriezellproduktion

## Data-Mining als Basis cyber-physischer Systeme in der Li-Ionen-Batterieproduktion

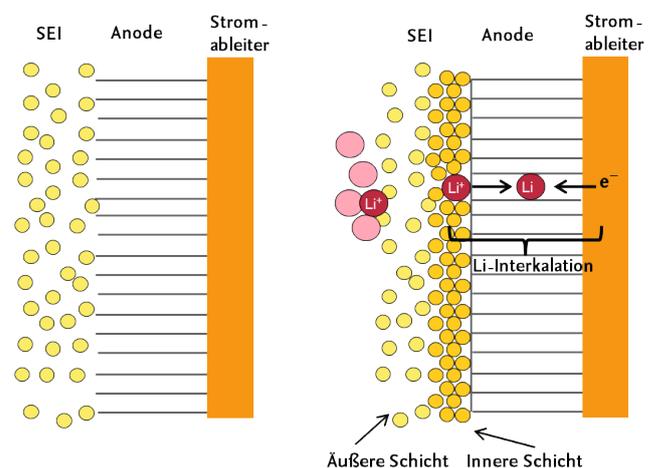
Mit dem Projektvorhaben DaLion4.0 kam die direkte Fortsetzung des Leuchtturmprojekts DaLion der Battery LabFactory Braunschweig. Mit dem erfolgreichen Projektabschluss DaLions Ende 2018 ergaben sich weitere spannende Fragestellungen, welche es in der zweiten Förderphase zu erforschen gilt. Eine wettbewerbsfähige Batteriezellfertigung steht weiterhin im Fokus des Projektvorhabens DaLion4.0, da sie für den Erfolg der Elektromobilität und dem Wirtschaftsstandort Deutschland von höchster Wichtigkeit ist. Die Batteriezellfertigung ist ein komplexes Produktionssystem charakterisiert durch spezialisierte Produktionsprozesse, zugehöriger Peripherie und einer aufwendigen technischen Gebäudeausrüstung (TGA) zur Gewährleistung definierter Umgebungsbedingungen sowie vielfältigen wechselwirkenden Einflussparametern. Die produzierten Batteriezellen müssen neben den Zielgrößen in der Produktion (Kosten, Zeit, Umwelt) auch Zielkriterien in den Produkteigenschaften genügen. Dazu zählen zum Beispiel definierte Energie- und Leistungsdichten, Lebensdauer und Sicherheit. Durch die Komplexität des Produktionssystems und die unterschiedlichen Reifegrade der eingesetzten Technologien sind die wechselseitigen Beziehungen aus Prozessparametern und den resultierenden Produkteigenschaften derzeit nur in Teilbereichen bekannt. Diese Lücke gilt es mit dem Projektvorhaben zu schließen.

Ein Schlüsselprozess zur gezielten Einstellung von Batterieeigenschaften ist die Formierung. Entlang der gesamten Produktionskette ist dieser Prozessschritt gleichzeitig aber auch der zeit- und kostenintensivste. Der Forschungsschwerpunkt am elenia liegt in der Untersuchung des Formierprozesses, um ein detailliertes Prozessverständnis aufzubauen und damit eine Optimierung dieses Produktionsschrittes zu erzielen. Langfristiges Ziel ist, ein modellbasiertes Konzept zur Identifikation zellspezifischer, optimaler Formierprozeduren zu entwickeln und implementieren, welches schließlich auf neue Zelltypen (Hochenergie- und Hochleistungszellen) und andere Zellchemien reagiert. Um die Wechselwirkungen

der Variationen in den Formierprozeduren auf die Zellperformance ohne eine zeitaufwendige Zyklisierung zu evaluieren, wird auf bereits am Institut entwickelte Qualitätstest aufgebaut (Vgl. Abb. rechte Seite).

### Formierung als Flaschenhals in der Produktion

Die Formierung, welche das erstmalige Laden- und Entladen der Zellen beschreibt, bezeichnet den finalen Prozessschritt in der Batteriezellproduktion. Durch die sich während der initialen ersten Zyklen ausbildenden Oberflächenschichten auf den Elektroden werden neben den Zelleigenschaften wie der maximalen Kapazität auch das Langzeitverhalten der Zelle (Zyklusfestigkeit und Sicherheit) maßgeblich bestimmt. Die untere Abbildung zeigt die Bildung der sogenannten *Solid Electrolyte Interphase* (SEI), welche auf der Anode aus Zerstellungsprodukten des Elektrolyten unter irreversiblen Verbrauch von Lithium entsteht. Die SEI ist für eine zuverlässige Funktionsweise der Batterie unerlässlich. Zum einen verhindert sie weitere Zersetzungsreaktionen des Elektrolyten, da keine Elektroden durch die SEI wandern. Außerdem wird die Elektrode vor



SEI-Bildung während der Formierung

Zyklus	Prozessschritt	Modus	C-Rate	Variation
1	Laden	CC-CV	C/10	C/3, 1C
	Entladen	CC		
2	Laden	CC-CV	C/2	C/3, 2C
	Entladen	CC		
3	Laden/	CC-CV	C/10	C/10
	Entladen	CC-CV		
4	Entladeimpuls		1C, 1s	
5	Reifelagerung (8 Tage)		-	
6	Entladeimpuls		1 C, 1 s	

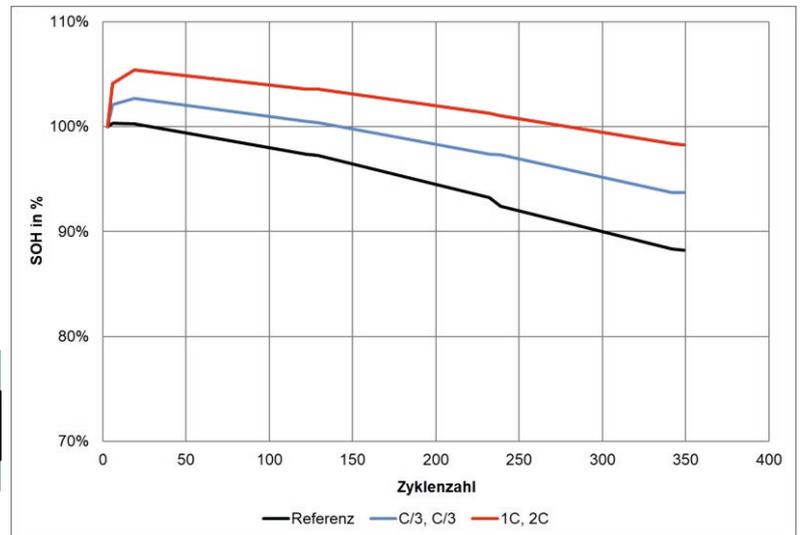
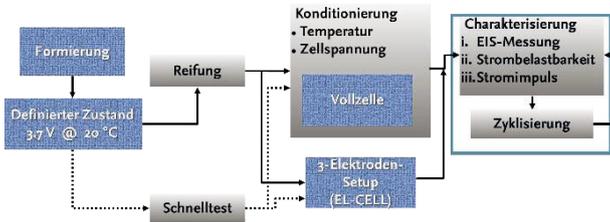


Tabelle zur Übersicht der Variationen hinsichtlich der Lade- und Entladeströme (oben links).

Langzeitperformance der unterschiedlich durchgeführten Formierungen (rechts). Vergleich der konventionellen Bewertung der Zellen und der zukünftigen Evaluierung durch einen am Institut entwickelten Qualitätstest (unten links).

weiteren negativen Einflüssen (z.B. der Exfoliation), die eine vorzeitige Alterung bedingen, geschützt. Zum anderen wächst jedoch die SEI in den folgenden Zyklen kontinuierlich weiter, wodurch Lithium-Ionen sowohl aus dem Kathodenaktivmaterial als auch aus dem Leitsalz irreversibel verbraucht werden. Das hat einen Kapazitätsverlust und einen erhöhten Innenwiderstand des Elektrolyten zur Folge. Damit stellt die SEI eine zusätzliche Barriere beim Interkalieren der Lithium-Ionen in das Aktivmaterial der Anode dar.

Ein kurzfristiges Ziel ist es eine möglichst zeit- und energie-sparende Formierprozedur für die Referenzzellen (NMC 622 I Graphit) zu entwickeln, welche eine vergleichbare Zellqualität wie die produzierten Zellen aus DaLion (NMC 111 I Graphit) aufweisen. Dazu werden sowohl Vollzellen als auch EL-Cells (3-Elektroden-Setup) betrachtet. Da nicht alle Einflussfaktoren adressiert werden können, wird sich zunächst auf unterschiedliche Lade- und Entladeströme fokussiert. Die Zyklenanzahl sowie die Umgebungsbedingungen wie Druck und Temperatur werden erst im weiteren Projektverlauf betrachtet. Als Referenzformierung wird die Standardprozedur der BLB genutzt. Diese besteht aus zwei Formierzyklen sowie einer anschließenden Charakterisierung der Zellen bestehend aus Kapazitätstest, Innenwiderstandstest und Bestimmung der Selbstentladung mittels einer 8-tägigen Reifelagerung. Die Tabelle in der obigen Abbildung zeigt die bisher durchgeführten Variationen in der Formierung sowie die Referenz. Die Graphik zeigt die den Variationen zugehörigen Verläufe des State of Health, kurz SOH, (@ C/10) der Batteriezellen über die Zyklenanzahl. Bereits nach 350 Zyklen wird die vergleichsweise bessere Performance der Zellen mit höheren C-Raten in der Formierung deutlich. Die Zellen mit der 1 C, 2 C Formierung weisen einen SOH von ca. 98 % auf, wohingegen die Referenzzellen nur noch einen SOH von ca. 88 % besitzt. Gleichzeitig reduziert sich die Prozesszeit dabei um das 7-fache. Auffällig ist das Ansteigen der maximalen Kapazität und somit des SOH bei den C-Raten-Variationen nach den ersten 20 Zyklen, welches einer Konditionierung der Zellen entspricht. Zur Verifizierung dieses Trends werden die Zellen noch weitere 500 Zyklen gealtert.

Das Laden der Zellen mit hohen C-Raten kann das Entstehen

von Lithium-Plating begünstigen, welches ein großes Sicherheitsrisiko mit sich bringt. Um das auszuschließen, sind Post-Mortem Untersuchungen zur methodische Untersuchungen der SEI-Struktur und Zusammensetzung mittels Raman-Spektroskopie und Rasterelektronenmikroskopie geplant. Die Ergebnisse wurden schließlich Ende diesen Jahres im Rahmen eines Projekttreffens sowie auf der BLB-eigenen Konferenz (International Battery Production Conference, IBPC) präsentiert.

Um das Ziel der Reduzierung der Gesamtzeit des Produktionsschrittes zu erreichen, wird neben der Formierung auch die Reifung betrachtet. Dazu wird die Reifung auf seine Anwendbarkeit als Selbstentladetest hin untersucht und ein Schnelltest als mögliches Surrogat implementiert (Vgl. Schema in der obigen Abbildung).



## Projektsteckbrief

**Projektname**  
DaLion 4.0



**Projektlaufzeit**  
Januar 2019 – Dezember 2021

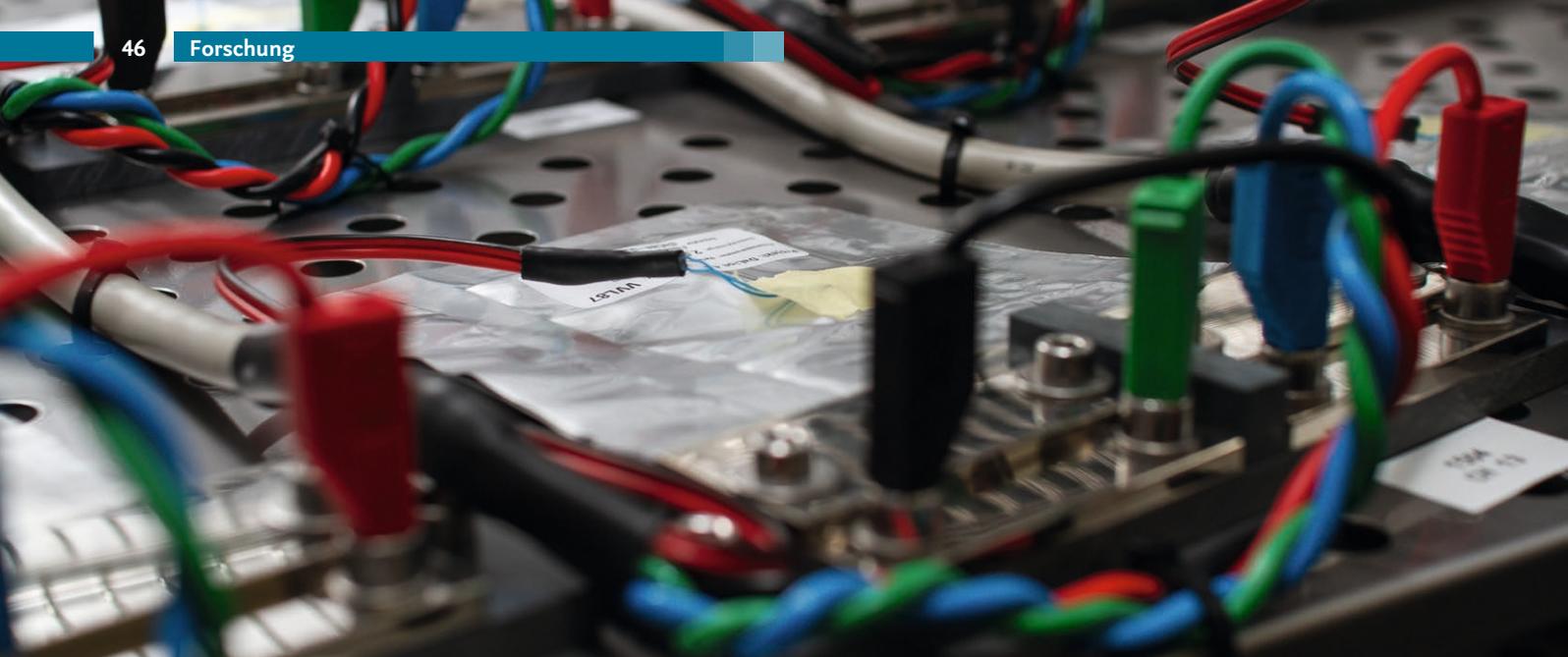
**Projektpartner**  
TU-BS  
(iPAT, IWF CH/KD, ifs, InES, IÖNC, elenia)  
FMP, Cooperion, ISRA, Manz, Bredex, GPS  
+ div. assoz. Partner

**Kontakt**  
Louisa Hoffmann  
louisa.hoffmann@tu-bs.de  
+49 531 - 391 7742

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



# Qualitätsanalyse in der Zellproduktion

## Bewertung der Qualität von Lithium-Ionen Batteriezellen anhand von Kenngrößen der Formierung

Lithium-Ionen Batterien sind für die Elektromobilität und für die stationäre Speicherung von erzeugtem Strom aus erneuerbaren Energien derzeit von zentraler Bedeutung. Noch ist unklar, welche Batterietechnologie sich langfristig durchsetzen wird, doch seit vielen Jahren sind Batterien auf Basis von Lithium-Ionen-Materialsystemen unbestrittene Marktführer.

Diese Stellung verdanken die Lithium-Ionen Batterien den vielen positiven Eigenschaften, die sie im Vergleich zu anderen Batterietechnologien aufweisen. Dazu zählen insbesondere eine hohe Energiedichte (90 – 250 Wh/kg) und eine lange Lebensdauer (1.000 – 5.000 Vollzyklen), ebenso wie ein hoher Zyklenwirkungsgrad (>98 %) und eine geringe Selbstentladung (<3 %/Monat). Diese Eigenschaften bestimmen letzten Endes die Leistungsfähigkeit der einzelnen Zellen in der jeweiligen Anwendung und leisten einen entscheidenden Beitrag zur Erfüllung der Anforderungen im jeweiligen Einsatzbereich.

Neben den vielen positiven Eigenschaften, bremsen unter anderem die hohen Investitionskosten die Marktdurchdringung. Die Kosten sind in den letzten Jahren deutlich gesunken (2008: >1000 €/kWh, 2019: 150-250 €/kWh). Trotzdem macht die Batterie bei einem Elektroauto nach wie vor einen großen Anteil in der Wertschöpfungskette aus.

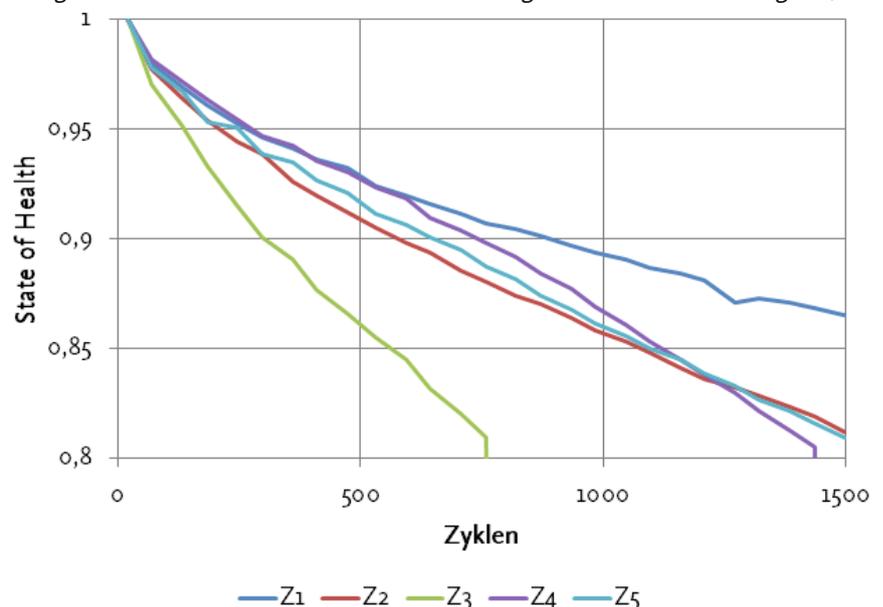
Aufgrund der hohen Kosten und des

entscheidenden Einflusses der jeweiligen Zelleigenschaften auf die Erfüllung der Anforderungen ist die genaue Kenntnis der Qualität der einzelnen Zellen von maßgeblicher Bedeutung. Zum einen ermöglicht die Kenntnis der Qualität Prognosen über die Belastbarkeit und die Lebensdauer der Zellen. Zum anderen wird für den Batteriemodulbau die Qualität der Zellen benötigt, um diese entsprechend ihrer Güte zu klassifizieren und zusammenzustellen. Zellen mit möglichst gleicher Qualität sollten zu einem Batteriemodul verschaltet werden, um ein möglichst gleiches Verhalten der Zellen in Bezug auf ihre Leistungsfähigkeit zu gewährleisten.

### Herausforderungen

Die zu erwartenden Zelleigenschaften werden zunächst durch die gewählten Materialien vorherbestimmt. Doch auch die Gestaltung der einzelnen Prozessschritte in der Produktion beeinflusst die Ausprägung der Zelleigenschaften. Da zusätzlich die Einstellparameter der Geräte in jedem Prozessschritt einer gewissen Streuung unterliegen und weitere Faktoren (u.a. Umgebungsbedingungen, Produktionsmitarbeiter) Einfluss auf die Zwischenprodukte nehmen, ergibt sich auch für die Zelleigenschaften eine Streuung und damit eine Schwankung der Qualität.

Eine große Herausforderung ist, dass



Vergleich der SOH-Verläufe von fünf gleichen Zellen

sich die Qualitätsunterschiede der Zellen oft erst durch eine unterschiedlich schnell voranschreitende Alterung während der Zyklisierung zeigen. In der vorherigen Abbildung sind die Verläufe des State of Health (SOH) für fünf Zellen, die aus gleichem Material (Kathode: NMC, Anode: Graphit) und mittels gleicher Prozessschritte in der Battery LabFactory Braunschweig (BLB) gefertigt wurden, dargestellt. Deutlich zu sehen ist, dass die grüne Zelle (Z<sub>3</sub>) bereits zu Beginn den Verlauf mit dem größten Gefälle aufweist. Anders verhält es sich mit der lila Zelle (Z<sub>4</sub>), welche bis knapp 600 Zyklen ein ähnliches Verhalten wie Z<sub>1</sub> (dunkelblau) zeigt. Danach schreitet die Alterung verstärkt voran, sodass diese Zelle noch vor Z<sub>2</sub> (rot) und Z<sub>5</sub> (hellblau), deren Alterung gleichbleibend im Mittelfeld verläuft, ihr Lebensende erreicht.

### Ausgangslage

Das Ziel aktueller Untersuchungen der Forschergruppe Batterietechnik am elenia ist daher zu Beginn des Lebenszyklus der Zellen Kenngrößen zu identifizieren mittels derer eine frühzeitige und verlässliche Einschätzung der Qualität ermöglicht werden soll.

Dazu wird in der Praxis in der Regel im Anschluss an die Produktion zur Charakterisierung der Zellen ein End-of-Line Test durchgeführt. Je nach Qualitätsansprüchen an die Zellen und der eingesetzten Messmethoden kann dieser unterschiedlich umfangreich gestaltet werden und dauert einige Stunden bis einige Tage. Da es sich um einen zusätzlichen Prozessschritt handelt, der viel Zeit in Anspruch nimmt und daher wiederum mit hohen Kosten verbunden ist, ist das Ziel dieser Untersuchungen die Qualität anhand der während der Formierung aufgenommenen Messdaten zu bestimmen.

Die Formierung gehört mit der Reifelagerung zu den letzten Prozessschritten in der Zellproduktion. Während dieses Schritts werden die bis dahin vollständig ungeladenen Zellen zum ersten Mal geladene und entladen. Aufgrund chemischer Reaktionen zwischen Bestandteilen des Elektrolyten und der Graphit-Elektrode bildet sich während dieser Zyklen eine Deckschicht aus, die sogenannte Solid Electrolyte Interphase (SEI), welche für die zuverlässige Funktionsweise der Zellen unerlässlich ist. Im Anschluss an die Formierung werden die Zellen bei einer definierten Temperatur gelagert. Während dieser Reifelagerung erfolgt die Elektrolytfeinverteilung. Mangelhafte

Zellen machen sich während dieses Prozessschritts durch eine erhöhte Selbstentladung bemerkbar.

Im Rahmen des Projektes DaLion – Data-Mining in der Produktion von Lithium-Ionen Batteriezellen (Vorgängerprojekt von DaLion 4.0) wurden über 150 Zellen mit einer theoretischen Kapazität von 9 Ah, die in der BLB gefertigt wurden, mit der gleichen Prozedur formiert und anschließend zyklisiert. Während 78 Zellen in 7 Chargen mit jeweils gleichen Produktionsparametern als Referenz hergestellt wurden, unterscheiden sich die restlichen Zellen durch Variationen in den Prozessschritten der Kalandrierung, des Laserschneidens und des Z-Faltens. Damit steht eine große Datengrundlage zur Untersuchung der feststellbaren Qualitätsunterschiede während der Formierung und Reifung zur Verfügung. Eine Übersicht der eingesetzten Formier- und Reifeprozedur findet sich in der nebenstehenden Tabelle. Neben den beiden Formierzyklen und der Reifung beinhaltet die Prozedur auch einen Kapazitätstests sowie zwei Entladepulse, die zur Bestimmung des Innenwiderstands genutzt werden. Während der Formierung und Reifung befanden sich die Zellen durchgehend in einer Temperaturprüfkammer bei einer konstanten Temperatur von 20 °C. Alle Zyklen wurden im Spannungsbereich 2,9 V - 4,2 V durchlaufen.

### Ausblick

Die Daten aus der Formierung und Reifung werden derzeit durch die Ableitung von Kennzahlen und der Verwendung verschiedener Auswertemethoden hinsichtlich ihrer Aussagekraft in Bezug auf die Qualität untersucht.

Bei den Kennzahlen geben u.a. der coulomb'sche Wirkungsgrad und die Hysteresenspannung der einzelnen Zyklen einen Hinweis auf Verlustprozesse innerhalb der Zellen. So sind Zellen mit niedrigen Wirkungsgraden und hohen Hysteresenspannungen in der Regel qualitativ schlechter als Zellen mit hohen Wirkungsgraden und niedrigeren Hysteresenspannungen. Ebenso ermöglicht der energetische Wirkungsgrad in Verbindung mit dem Innenwiderstand eine Beurteilung der Zellen hinsichtlich der energetischen Effizienz und der damit verbundenen Wärmeentwicklung der Zellen. Trotzdem geben die Kennzahlen, welche sich direkt aus den Messdaten bestimmen lassen, nur einen ersten Hinweis auf die Qualität der Zellen und dienen vor allen Dingen zur Identifika-

Testschritt	C-Rate	Erläuterung
Laden/Entladen	C/10	1. Zyklus Formierung
Laden/Entladen	C/2	2. Zyklus Formierung
Laden/Entladen	C/10	Kapazitätstest
Laden/Entladen	1 C	Einstellen SOC 50 %
Entladepuls	1 C für 1 s	Innenwiderstand
Reifung		8 Tage
Entladepuls	1 C für 1 s	Innenwiderstand

### Formier- und Reifeprozedur

tion von Ausreißern. Für die ausschließliche Bewertung der Qualität sind diese Kenngrößen jedoch nur eingeschränkt geeignet.

Als vielversprechenderer Ansatz wird daher zurzeit die differentielle Spannungs- und Kapazitätsanalyse erprobt. Bei diesen Auswertemethoden werden die Steigungen der Spannungs- und Kapazitätsverläufe von Zyklen mit niedrigen Stromstärken (C/10 oder kleiner) in Relation gesetzt. Es ergeben sich charakteristische Verläufe, deren lokale Minima bzw. Maxima Rückschlüsse auf Bereiche, in denen Phasengleichgewichte vorliegen, und Bereiche, in denen Phasenübergänge stattfinden, ermöglichen. Diese Methoden werden zur Analyse von Vorgängen in Vollzellen eingesetzt, wenn keine Referenzelektrode zur Verfügung steht.

### Projektsteckbrief



#### Projektname

DaLion 4.0

#### Projektlaufzeit

Januar 2019 – Dezember 2021

#### Projektpartner

TU-BS (iPAT, IWF CH/KD, ifs, InES, IÖNC, elenia), FMP, Cooperion, ISRA, Manz, Brexex, GPS + div. assoz. Partner

#### Kontakt

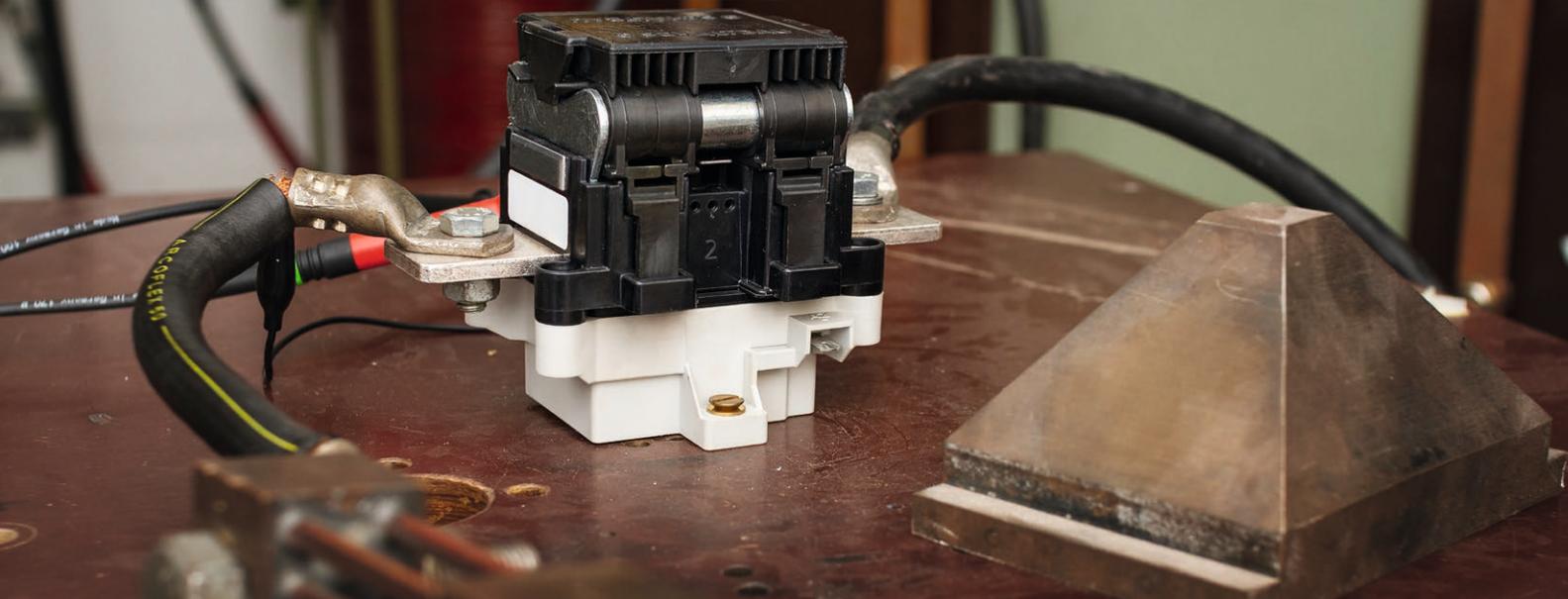
Kerstin Ryll  
k.ryll@tu-bs.de

Louisa Hoffmann  
louisa.hoffmann@tu-bs.de

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



# Smart Modular Switchgear II

## Aufbau und Erprobung von DC-Netzen und DC-Schaltgeräten für Spannungen bis 3 kV

### Einleitung

Neben der DC-Übertragung (HGÜ) ergeben sich derzeit und verstärkt in der Zukunft 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 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.

### Einordnung in die Institutsforschung

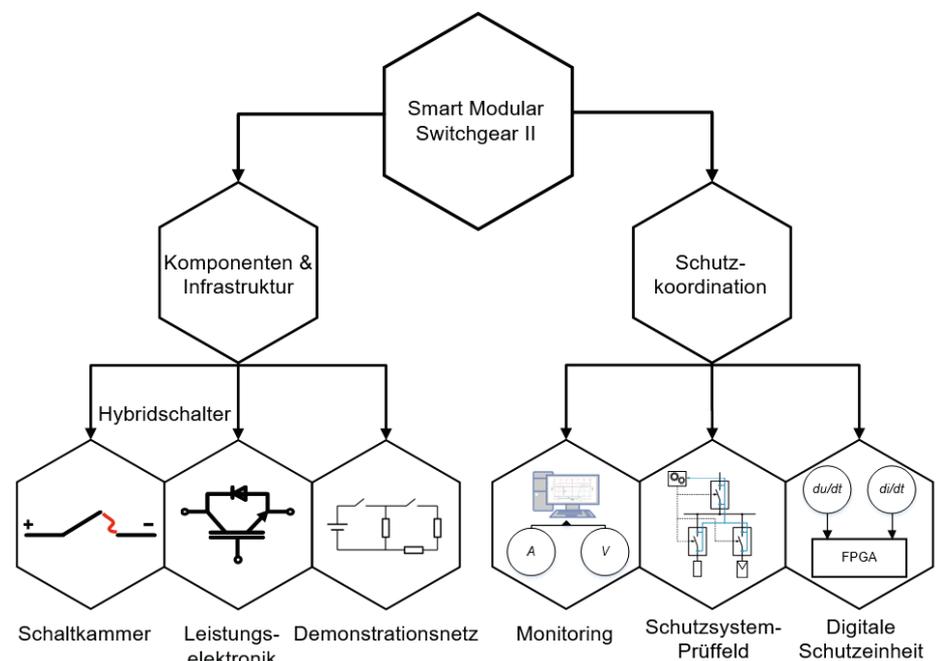
Das Projekt SMS-II baut auf das Vorgängerprojekt SMS-I auf. Im Rahmen von SMS-I wurden die ersten Grundlagen für die automatisierte Fehlererkennung gelegt. Die verwendete Spannung betrug 24 V. Zum Abschluss des Projektes wurde die Anpassung der Schutztechnik auf 380 V begonnen. An dieser Stelle knüpft das Folgeprojekt SMS-II an. Die vorliegenden Erkenntnisse über die Schutztechnik sollen von 380V auf 1000V und 3000V

angepasst werden. Des Weiteren vereint SMS-II die Schutztechnik mit zwei weiteren Kernkompetenzen des elenia, der Schaltgerätetechnik und den Energieübertragungsnetzen. Im gesamten Projektverbund werden von anderen Instituten die EMV, die Leistungselektronik und der Überspannungsschutz untersucht.

Im weiteren Verlauf wird auf die Projektschwerpunkte Schutztechnik, Demonstrationsnetz und Schaltgerätetechnik eingegangen.

### Schutztechnik

Bereits im Vorgängerprojekt SMS I wurde ein modulares Schutzkonzept zur Lokalisierung, Klassifizierung und selektiven Abschaltung von Fehlern in DC-Netzen mit einer Nennspannung von bis zu 380 V entwickelt. Das Konzept beruht auf der permanenten Überwachung des Systemzustandes mittels Spannungs- und Stromsensoren, welche an jedem im Netz verwendeten Schaltgerät installiert werden. Die Daten der Sensoren werden in einer zentralen Schutzeinheit zusammengeführt und dort über ein



Projektübersicht SMS II

FPGA weitere, abgeleitete Größen aus den Messwerten berechnet, die der Entscheidungsfindung des Schutzalgorithmus dienen.

Für das Projekt SMS II wird dieses Schutzkonzept grundlegend weiterentwickelt, sodass es für 1 kV- bzw. im späteren Verlauf auch 3 kV-Netze genutzt werden kann. Dazu gehören neben der Optimierung des verwendeten LabVIEW-Algorithmus auch noch die Erweiterung des Programmcodes, sodass die Systemüberwachung auf mehrere Schutzeinheiten verteilt werden kann und dadurch gegebenenfalls größere und räumlich weiter verteilte Netze überwacht werden können. Um diesen Vorgang zu vereinfachen wird im ersten Projektjahr ein Prüfstand aufgebaut, welcher auf 24 V basiert und an dem schnell und einfach verschiedenste Netztopologien durch Konfigurationen an einer Klemmleiste erzeugt werden können. Zudem werden hier als Schaltgeräte MOSFETs zum Einsatz kommen, was aufgrund der geringen Schaltzeiten eine genauere zeitliche Analyse der relevanten Abläufe ermöglicht.

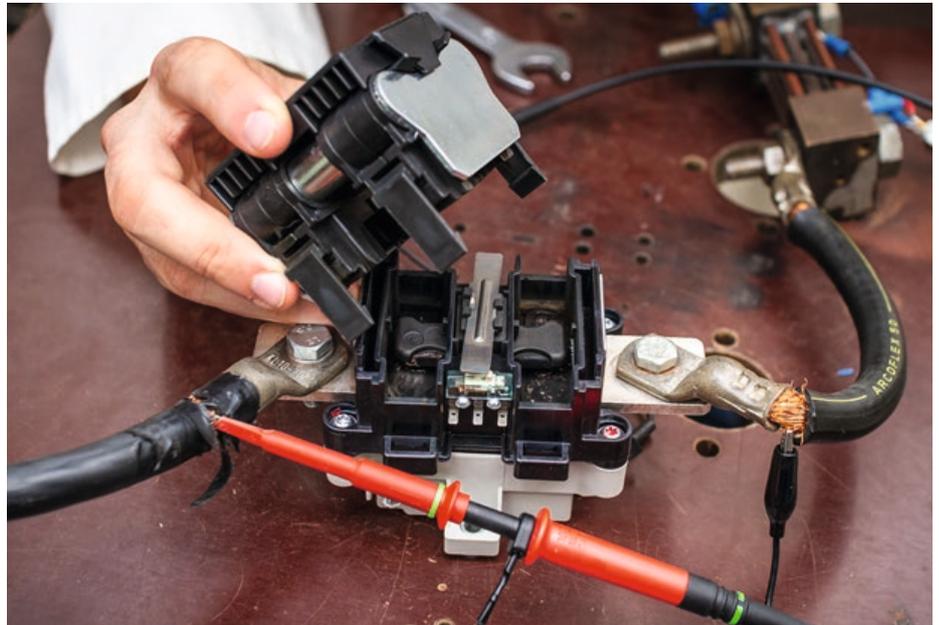
### Demonstrationsnetz

Ein Teilziel des Projektes SMS-II ist es mit dem Demonstrationsnetz die anfangs genannten DC-Netzstrukturen nachzubilden. Im ersten Projektjahr sind hierzu die Planungsaufgaben abgeschlossen worden. Aktuell befindet sich das Demonstrationsnetz bis 1 kV in der Aufbauphase. Die 3D-Zeichnungen sind abgeschlossen und die Materialbestellungen stehen kurz vor der Auslösung. In der nachfolgenden Tabelle sind die Kenndaten des Demonstrationsnetzes angegeben.

Kenndaten Demonstrationsnetz

Parameter	Wert
Spannungsebenen	380V, 1000 V, 3000 V
Leistung	40 kW
Netztopologie	Variabel
Schaltgerätetyp	Hybrid
Lastfluss	Bidirektional
Lasten	Ohmsch, induktiv, kapazitiv, elektronisch
Verbindung zu anderen Netzeinheiten	möglich

Die Netzkomponenten sind fest im Prüfaufbau installiert. Die Netzstruktur kann durch variable Steckverbindungen angepasst werden. Die Netzgröße kann in



Ausschaltuntersuchungen von DC-Schaltgeräten

der Zukunft mit geringem Aufwand erweitert werden. Das Demonstrationsnetz kann mit einem anderen Netz über einer Querkopplung verbunden werden. Eine Besonderheit des Netzes ist die elektronische Last. Diese kann über eine Software frei parametrisiert werden und sowohl als Last oder auch als Quelle betrieben werden.

Am Ende des Jahres ist der mechanische Aufbau abgeschlossen worden. Im neuen Jahr beginnt die elektrische Inbetriebnahme. Für Studenten die eine Hiwi-Anstellung oder eine Abschlussarbeit mit einem ausgeprägten Laboranteil suchen sind viele interessante Aufgabenstellungen vorhanden.

### Schaltgeräte

Aufbauend auf vorherigen Untersuchungen werden im Projekt SMS-II Hybridschalter verwendet. Die Schutzeinheit erfordert für die sichere Unterbrechung des Strompfades Schaltgeräte, welche eine schnelle und nahezu konstante Löszeit aufweisen. In diesem Jahr wurde bereits ein Hybridschalter bis 1000 V untersucht. Es wurden die Messung des Durchgangswiderstandes, der Antriebsverzugszeiten und des Ausschaltverhaltens durchgeführt. Eine besondere Herausforderung stellt die Anforderung der Schutzeinheit an die kurzen Auslösezeiten da. Angestrebt werden Zeiten, die deutlich unter 10 ms liegen. Die gemessenen Zeiten liegen im Bereich 10 ms. Im nächsten Jahr werden Optimierungen und weitere Messungen durchgeführt.

Zukünftig wird ein Hybridschalter für die 3 kV-Ebene entwickelt werden. Hier-

zu sind noch sämtliche Bauteile auszuwählen. Für die Bestimmung der Anforderungen wird auf die Ergebnisse der Untersuchungen des 1 kV-Netzes zurückgegriffen. Bei der Entwicklung sind viele bekannte oder noch auftretende Fragestellungen zu beantworten. Diese können gerne im Rahmen von studentischen Arbeiten behandelt werden.

### Zusammenfassung

Die einzelnen Projektbestandteile Schutztechnik, Demonstrationsnetz und Schaltgeräte wurden im ersten Projektjahr noch separat betrachtet. Im folgenden Jahr werden die Bereiche schrittweise zusammengeführt. Es werden viele interessante Ergebnisse erwartet, welche sich durch die Interaktion der Bauteile einstellen werden.

### Projektsteckbrief



#### Projektname

Smart Modular Switchgear-II (SMS II)

#### Projektlaufzeit

Januar 2019 – Dezember 2022

#### Projektpartner

Institut für EMV, IMAB, E-T-A, PTB

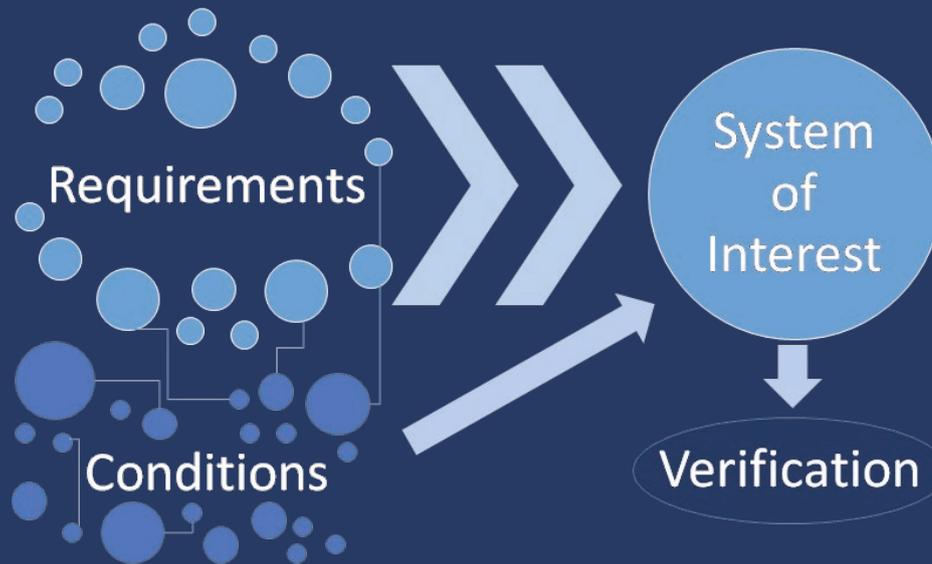
#### Assoziierte Projektpartner

Phoenix Contact, Siemens

#### Kontakt

Frederik Anspach  
f.anspach@tu-braunschweig.de

Lars Claassen  
l.claassen@tu-braunschweig.de



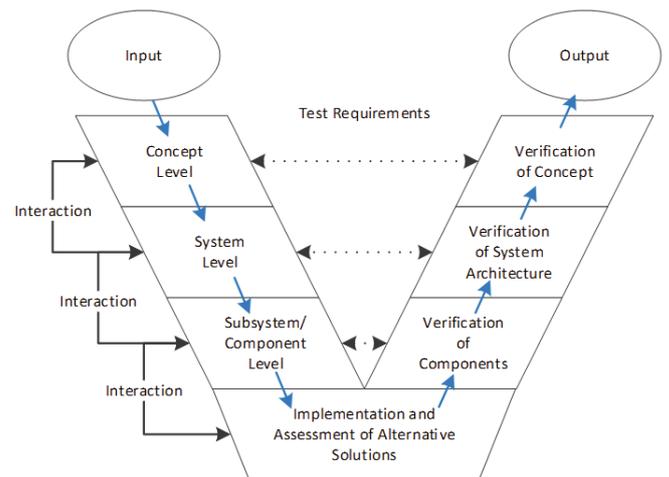
# Systems Engineering

## Entwicklung von HGÜ Netzanschlusskonzepten unter Anwendung des Systems Engineerings

Immer mehr Offshore Windparks werden weit entfernt von der Küste gebaut. Dort sind größere Flächen verfügbar und der Wind weht sowohl stärker als auch konstanter im Vergleich zu küstennahen Regionen. Insbesondere in der deutschen Nordsee ergeben sich durch das Naturschutzgebiet „Wattenmeer“ zusätzliche Herausforderungen. Um große Energiemengen über weite Entfernungen zu übertragen, wird statt der Hochspannungs-Drehstrom Übertragung (HDÜ) oft die Hochspannungsgleichstrom Übertragung (HGÜ) eingesetzt. Neben wirtschaftlichen Aspekten ermöglicht die HGÜ Technologie auch die Regelbarkeit des Windpark AC-Netzes mit Hilfe von sogenannten Voltage Source Converter (VSC). Zusätzlich zum Netzanschluss von Offshore Windparks wird HGÜ auch für die Verbindung unterschiedlicher Länder oder asynchroner Netze genutzt. Hierbei kann auch der Line Commutated Converter (LCC) verwendet werden. Außerdem gibt es bereits erste Projekte, in denen der Eigenbedarf von Öl- und Gasplattformen mit einer HGÜ Verbindung gedeckt werden soll.

Obwohl die Umrichter sehr teuer sind, bietet die HGÜ Technologie viele Vorteile. Aus diesem Grund wurden in den letzten Jahren viele HGÜ Verbindungen in Betrieb genommen. Durch HGÜ Verbindungen können nicht nur die Hochspannungsnetze stabilisiert werden, sondern das gesamte elektrische Netz und damit auch die Versorgungssicherheit, z.B. in Microgrids verbessert werden. Die Methodik des Systems Engineerings (SE) ermöglicht die systematische Entwicklung von Energieübertragungssystemen. Diese Methodik wird im nachfolgenden Abschnitt „Definition des Systems Engineering“ ausführlicher beschrieben. Um die Zuverlässigkeit zu erhöhen und Kosten langfristig zu senken, werden beim Systems Engineering Konzepte auf unterschiedlichen Detailebenen untersucht (siehe S. 1).

Um innovative Netztopologien zu entwickeln, ist es wichtig alle Anforderungen an ein solches System zu identifizieren und frühzeitig zu definieren. Die Überprüfung der technischen An-



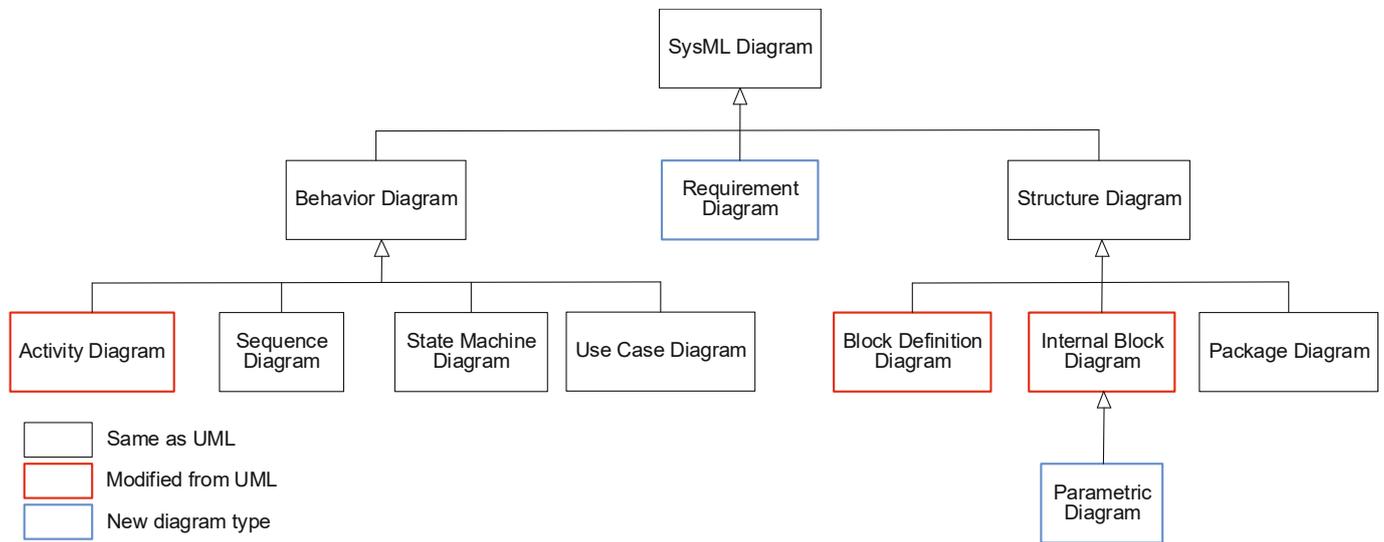
V-Model des Systems Engineerings

forderungen wird dann mit Hilfe von Simulationen überprüft.

### Definition des Systems Engineering

Das SE ist ein Ansatz zur ganzheitlichen Entwicklung und Definition von komplexen Systemen. Das Ziel ist dabei die Anforderungen aller beteiligter Stakeholder zu erfüllen. Außerdem ist die interdisziplinäre Zusammenarbeit verschiedener Fachgruppen in allen Phasen eines Systemlebenszyklus von hoher Relevanz. Eine erhöhte Komplexität von Systemen und fortlaufende Veränderungen sorgen für ein steigendes Risiko bei der Entwicklung neuer Systeme. Die Reduzierung dieses Risikos ist einer der Hauptaufgaben des SE. Eine rekursive und iterative Vorgehensweise mit einem ständigen Abgleich der Anforderungen mit dem Stand im Entwicklungsprozess spielt dabei eine wichtige Rolle.

Die Ursprünge des SE, wie es zuvor beschrieben wurde, entstanden Anfang bis Mitte des 20. Jahrhunderts. Die fortschreitende Automatisierung von technischen Systemen, insbesondere im Militärbereich, führten u.a. zu einer Erhöhung der



### SysML diagram taxonomy

Komplexität und des Risikos von Fehlern bei der Entwicklung. Ein fachgebietsübergreifender gemeinsamer Entwicklungsprozess wurde immer wichtiger. Die nachfolgende, bis heute andauernde, Digitalisierung und Vernetzung erhöhten die Komplexität weiter und stärkten somit die Bedeutung des Systemdenkens wie es im SE beschrieben wird für die Entwicklung neuer und die Weiterentwicklung bestehender Systeme. Diese Bedeutung spiegelt sich auch darin wieder, dass SE heute in vielen verschiedenen Anwendungsgebieten auf unterschiedliche Art und Weise praktiziert wird. Neben den traditionell wichtigen Bereichen der Luft- und Raumfahrt und der Rüstungsindustrie, findet SE auch Anwendung in Bereichen wie der Unterhaltungselektronik, im Automobilsektor, im Bereich der Informationstechnik, dem öffentlichen Sektor und auch im Energiesektor.

### Nutzungsmöglichkeiten von SysML

Eine vor allem im Model based Systems Engineering (MBSE) verwendete Sprache ist SysML. Diese hat wie andere Sprachen auch, grammatikalische Regeln und Vokabeln. SysML ist ein Teil der unified modeling language (UML) und hilft Systemingenieuren bei der Kommunikation über ein Systemdesign. UML bildet auch die Grundlage für einige Diagrammart. Andere, wie das Anforderungsdiagramm, sind neue Arten, die nur SysML zugeordnet sind. Die oben dargestellte Abbildung basiert auf dem Object Management Group (OMG) SysML Standard und gibt einen Überblick der unterschiedlichen Diagrammart.

### Systems Engineering Prozesse

Innerhalb einer jeden Phase eines System Lebenszyklus Modells (SLM) können verschiedene Prozesse und Aktivitäten durchgeführt und angewendet werden, um von definierten Inputs zu definierten Outputs der Phase zu gelangen. Die internationale Norm ISO/IEC/IEEE 15288:2015 unterteilt 30 mögliche Prozesse in 4 Kategorien:

- Technische Prozesse
- Technische Management-Prozesse
- Übereinstimmungsprozesse
- Organisatorische, projektunterstützende Prozesse

Die 14 technischen Prozesse in der Norm dienen der Definition und Analyse von Anforderungen und, auf Basis dessen, der Entwicklung von Systemen, Produkten und Dienstleistungen.

In den späteren Phasen des Lebenszyklus dienen Sie der technischen Umsetzung der Produktion, der Sicherstellung einer technisch korrekten Leistungserbringung bis hin zur Unterstützung bei der Entsorgung bzw. Stilllegung des Systems. Jeder Prozess ist dabei definiert durch bestimmte Inputs, Aktivitäten und Outputs. Darüber hinaus müssen bestimmte Rahmenbedingungen (Controls) bei der Durchführung von Prozessen berücksichtigt werden und es gelten Voraussetzungen, die für die Umsetzung von Prozessen erfüllt sein müssen (Enablers).

Inputs können z.B. Daten und Materialien, also Outputs, eines vorangestellten Prozesses sein. Die Inputs können aber auch von externen Quellen stammen. Beispiele hierfür sind Informationen zu Anforderungen, Messdaten, Testberichte, Materialien, die für die Erstellung des Outputs benötigt werden oder auch Teile von Dienstleistungen.

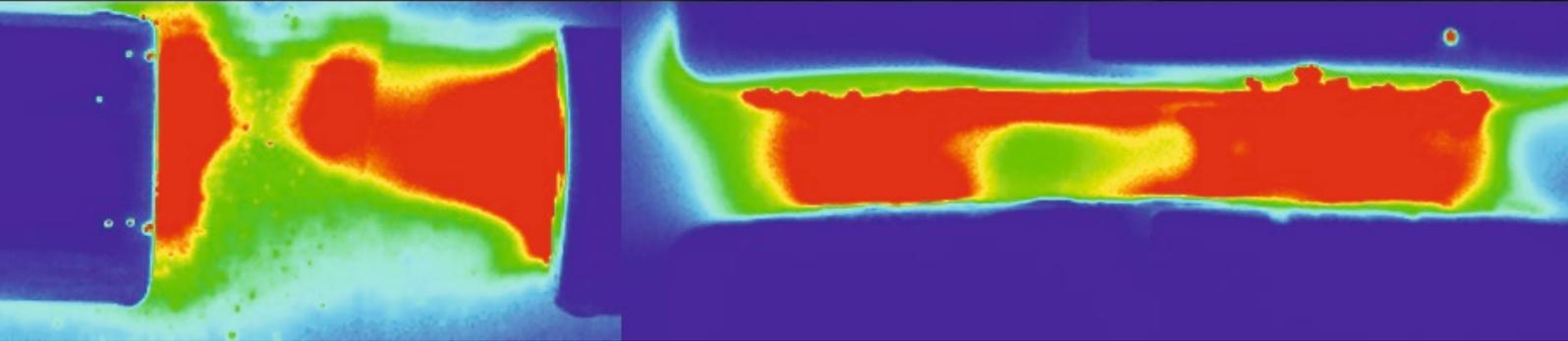
Outputs können ebenso Inputs eines nachfolgenden Prozesses sein, weshalb die Beschreibung, mit der der Inputs gleichgesetzt werden kann. Outputs können jedoch entweder direkt in einen weiteren Prozess übergehen oder auch einen Prozess mehrfach durchlaufen. Controls stellen den Rahmen für die Prozessausführung dar. Dieser kann z.B. rechtlich durch Gesetze und Verträge definiert sein.

### Kontakt

Melanie Hoffmann  
melanie.hoffmann@tu-braunschweig.de

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





# Bewegung von Vakuumbögen

## Bestimmung der lokalen Stromdichte in Vakuumschaltgeräten mit Hochgeschwindigkeitskamera und Hall-Sensoren

Die Energiewende verändert die Schaltaufgaben in den Verteilnetzen der Mittel- und Hochspannungsebene. Dezentrale Erzeuger, kapazitive und induktive Blindleistungsbereitstellung, Speicher und Lasten müssen zukünftig automatisiert zu- und abgeschaltet werden. Die Zunahme von erforderlichem Schaltvermögen, Automatisierung und dadurch Schalthäufigkeit erfordern einen verstärkten Einsatz von Leistungsschaltern. Für diese neuen Aufgaben ist das Vakuumschaltprinzip hervorragend geeignet. Die Entwicklungsziele sind daher auf die Verbesserung der Schaltperformance bei hoher Lebensdauer und kompakter Bauweise ausgerichtet, dies auch vor dem Hintergrund der Ersatzbestrebungen von SF<sub>6</sub>-Schaltern in der Hochspannungsebene wegen des hohen Treibhausgaspotentials von SF<sub>6</sub>. Damit wird das Schaltverhalten im Vakuum für höhere Spannungen und damit bei größeren Schaltstrecken zum aktuellen Untersuchungsgegenstand.

Schaltgeräte müssen Stromkreise einschalten, Betriebs- und Fehlerströme führen und ausschalten können. Beim Einschalten entstehen Vorzündlichtbögen, insbesondere bei kapazitiven Lasten, die zur Kontaktterrosion beitragen. Beim Ausschalten entsteht während der Kontaktöffnung ein leitfähiges Metalldampf-Plasma zwischen den Kontaktstücken, das den Strom bis zum nächsten Strom-Nulldurchgang weiter leitet. Im Strom-Nulldurchgang verliert das Plasma seine Leitfähigkeit, und die Metalldampf-Dichte nimmt durch Diffusion und Anlagerung ab. Die wiederkehrende Spannung zwischen den nun getrennten Stromkreisen darf zu keiner neuen Ionisierung des restlichen Metalldampf-Plasmas in der geöffneten Schaltstrecke führen. Damit ist der Ausschaltvorgang erfolgreich abgeschlossen und eine galvanische Trennung hergestellt.

### Optische Strahlungsmessungen an Metalldampf-Plasmen im Vakuum

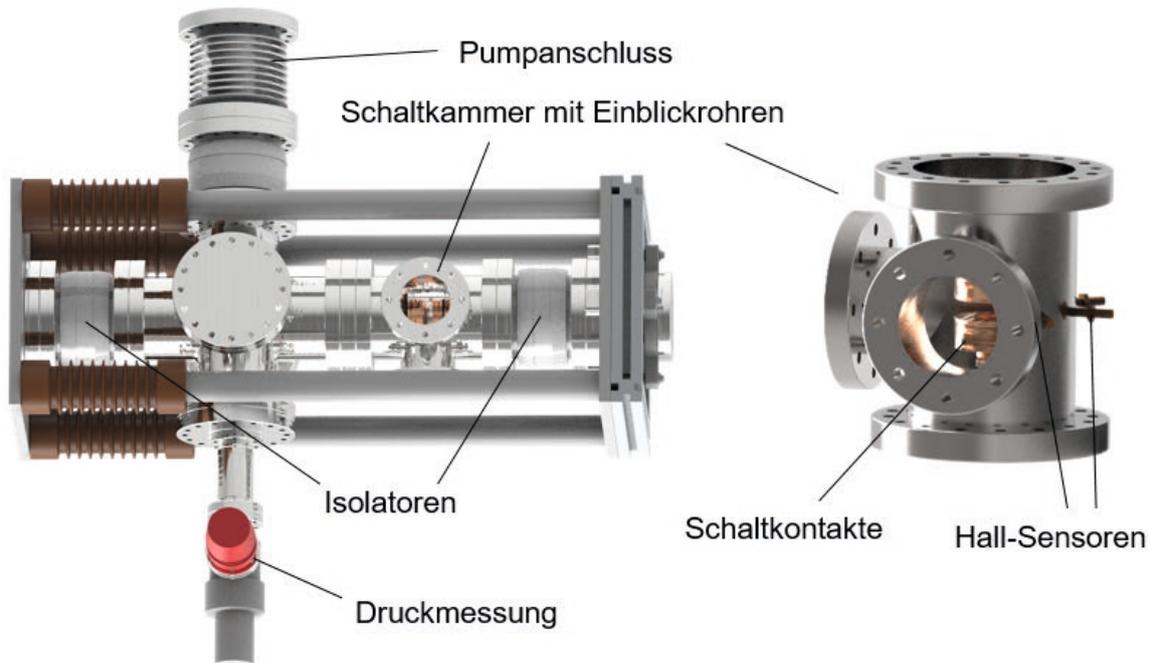
Hochspannungs-Vakuum-Versuchsgefäße aus Edelstahl mit Schaugläsern und Keramik-Isolatoren ermöglichen die Beobachtung des Metalldampf-Plasmas und der Brennflecke

auf den Kontaktstücken während des Schaltvorgangs. Dabei ist der Rezipient auf einen Druck von weniger als  $10^{-4}$  Pa zu evakuieren. Das Versuchsgefäß unterscheidet sich jedoch von einer kommerziellen Vakuumschaltkammer mit einem Kondensationsschirm. So steht dem Metalldampf-Plasma im Versuchsgefäß ein größeres Volumen zur Verfügung. Außerdem muss der Kondensationsschirm entfallen, damit die Schaltstrecke von außen einsehbar ist.

Durch die Schaugläser nehmen moderne Hochgeschwindigkeits-Kamerasysteme die Vorgänge mit einer Bildwiederholrate auf von bis zu 0,5 Mfps (million frames per second). Die hohen Bildraten sind erforderlich, da sich die Ionen aus dem Metalldampf-Plasma mit Geschwindigkeiten von einigen km/s (bzw. mm/μs) bewegen. Der kontrahierte Lichtbogen selbst bewegt sich mit mehreren 100 m/s über die Kontaktoberfläche hinweg. Darüber hinaus erfolgen spontane Wechsel der Lichtbogenposition innerhalb von einigen 10 μs, d.h. der Stromfluss kommutiert zu einem neuen Punkt auf der Kontaktoberfläche. Die Beobachtung der Lichtbogen-Laufbewegungen oder der Sprünge über die Kontaktoberfläche ( $\varnothing \approx 100$  mm) hinweg bedarf einer entsprechenden Pixel-Auflösung. Die Mindestanforderungen an die Sensoren liegen nach eigenen Erfahrungen bei einer Auflösung von 500 x 120 Pixel im Hochgeschwindigkeits-Bereich, um eine Auflösung von 0,4 mm pro Pixel zu gewährleisten. Bezogen auf die Lichtbogenbeobachtung während der Kontaktöffnung und einen Hub (Kontaktspalt) von 10 mm ist eine höhere Auflösung wünschenswert. Die gleichzeitige Erfassung der intensiv strahlenden Brennflecke und der schwach leuchtenden aber leitfähigen Bereiche des Metalldampf-Plasmas erfordert eine hohe Pixeltiefe der Sensoren.

### Forschungsvorhaben

Das Hauptziel ist, die Stromverteilung im Kontaktschaltspalt als auch die Stromdichte-Verteilungen in der Plasmasäule aus den magnetischen Flussdichte-Profilen in Zusammenarbeit



Konstruktion eines Versuchsschalters zur kombinierten optischen und magnetischen Messung

mit der TU Darmstadt und den optischen Strahlungsintensitäts-Profilen zu ermitteln. Das bedeutet die Kopplung und Weiterentwicklung von magnetischer und optischer Messmethode. Die gleichzeitige Messung von Magnetfeld und optischer Strahlung ermöglicht somit die Klärung der Frage, wo genau der Strom fließt, im Kern oder auf der Hülle der Plasmasäule. Aus den Strahlungsmessungen sind Aussagen über Ladungsträgerdichten und Elektronenbeweglichkeiten in der äußeren Hülle möglich, da sich die Strahlung innerhalb der Plasmasäule diffus wie in einem Nebel ausbreitet (optisch dichtes Plasma). Das Magnetfeld ergibt sich jedoch aus dem gesamten Stromfluss. Durch Vergleich mit der verteilten Magnetfeldmessung kann auf die Stromdichteverteilung in der Plasmasäule zurückgeschlossen werden. Dazu sind die Erstellung eines gemeinsamen Versuchsaufbaus, die jeweilige Weiterentwicklung der Messmethoden und die Anpassung der Auswertemethoden erforderlich, um die Kombination beider Methoden zu ermöglichen. Erst danach können die gewünschten Informationen zu der Metaldampfentstehung, den Wanderungsbewegungen der Fußpunkte auch in realen, kommerziellen Vakuumschaltkammern und die Ankopplung der Plasmasäule (Lichtbogen-Fußpunkte) ermittelt werden.

#### Forschungsstand

Zum aktuellen Zeitpunkt befindet sich die modifizierte Schaltkammer zur Anwendung magnetischer und optische Messmethoden im Aufbau. Die Konstruktion ist in der Abbildung zu sehen. Der Aufbau bietet den machbaren Kompromiss aus Beobachtungsmöglichkeit und Entfernung der Hall-Sensoren zur Magnetfeldmessung. Erste Vergleichsmessungen und zugehörige Simulation werden im folgenden Jahr begonnen.



#### Projektsteckbrief

##### Projektname

Magneto-Optische  
Lichtbogenanalyse



##### Projektlaufzeit

Januar 2019 – Dezember 2021

##### Projektpartner

TU Darmstadt  
Institut für Elektrische Energiesysteme

##### Kontakt

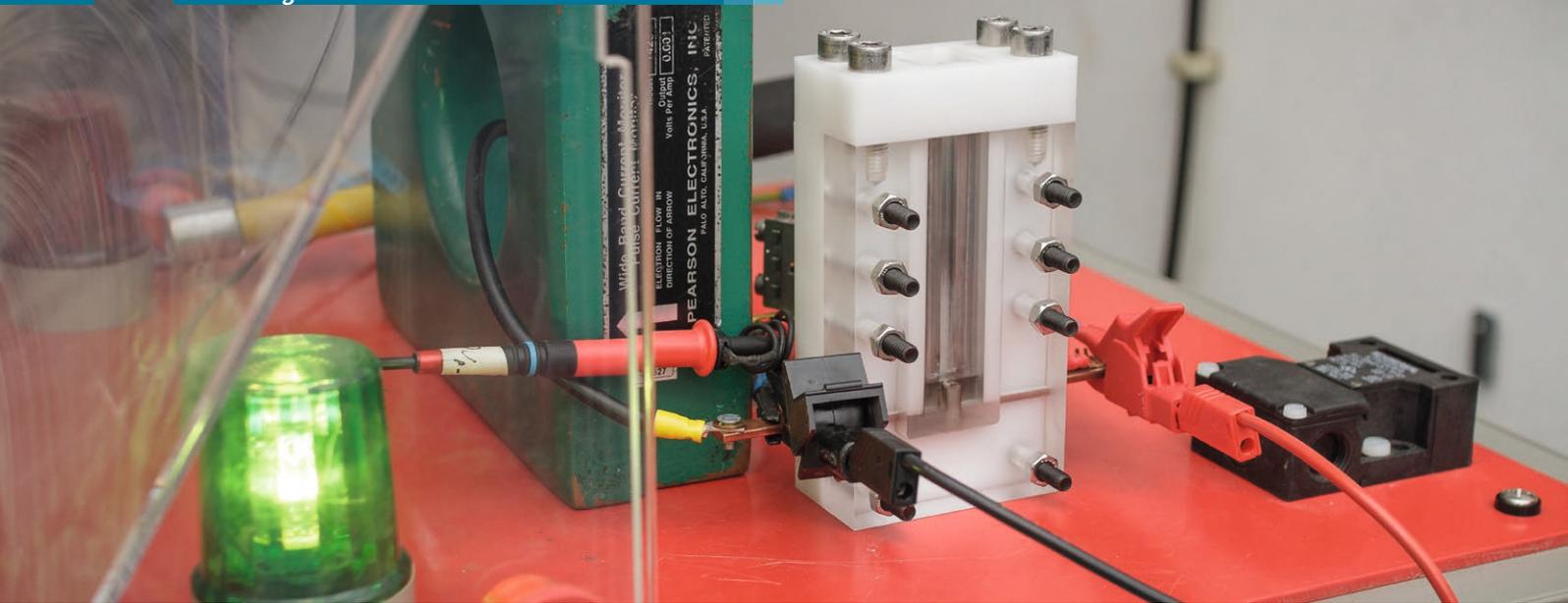
Benjamin Weber  
Benjamin.weber@tu-braunschweig.de  
+49 531-391-7771

Benjamin Kühn  
+49 531 391 9723  
b.kuehn@tu-braunschweig.de

Tobias Hartmut Kopp  
+49 531 391 9729  
t.kopp@tu-braunschweig.de

Gefördert durch

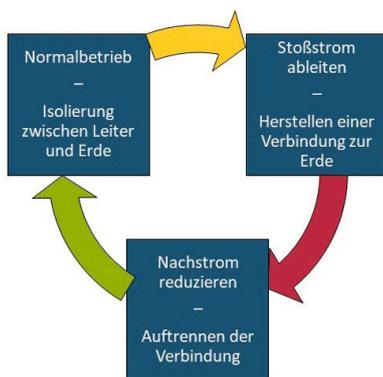
**DFG** Deutsche  
Forschungsgemeinschaft



# Blitzstromableiter

## Untersuchung des Verhaltens von Funkenstrecken unter Stoßstrombelastung mithilfe von bildgebenden Methoden

Blitzschutzgeräte, Typ 1-Ableiter, sind in den Verteilnetzen erforderlich, um den fehlerfreien Betrieb sicherzustellen. Mithilfe von diesen Geräten wird ein auftretender Blitzstrom direkt zum Schutzleiter hin abgeleitet, sodass die nachfolgenden elektrischen Anlagen geschützt werden. Mit dem Ziel der Untersuchung des Leitungsverhaltens während eines Stoßstromes, wird der Stoßstromgenerator des Blitzschutzlabores am elenia verwendet. Die Prüfungen sind standardisiert nach internationalen Normen. Es wird eine  $8/20 \mu\text{s}$  Stoßstromform verwendet.



Schematische Grundprozesse während des Ableitvorgangs

Als Typ 1 Ableiter werden Funkenstrecken verwendet. Zwischen den beiden Kontakten wird ein Lichtbogenplasma gezündet, welches den niederimpedanten Pfad zur Erde bildet. Während dieses Prozesses werden folgende Funktionen bereitgestellt:

Als erstes wird ein Pfad mit einer hohen Leitfähigkeit hergestellt, sodass der Stoßstrom nahezu vollständig zur Erde hin abfließt, wodurch die Schutzfunktion für den nachgelagerten Bereich sichergestellt ist.

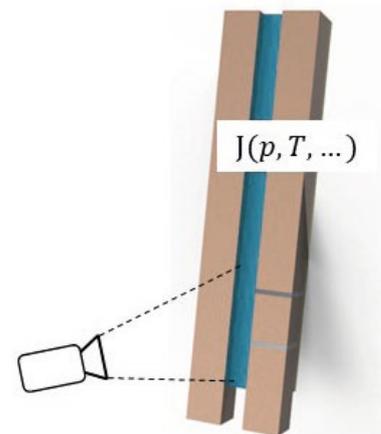
In dem sich zeitlich daran anschließenden Bereich muss die Leitfähigkeit der Schaltstrecke um viele Größenordnungen reduziert werden, damit ein entstehender Nachstrom effektiv unterdrückt werden kann. Der Nachstrom wird durch das angeschlossene Niederspannungsnetz getrieben, welches mit dem Kurzschluss in der Funkenstrecke in Wechselwirkung tritt.

Die Schwierigkeit besteht darin diese konträren Anforderungen abzudecken. Das Verhalten der Funkenstrecke hängt von den Plasmaeigenschaften (Druck, elektrische Leitfähigkeit und Temperatur) und der Geometrie der Plasmaabrennkammer ab. Zur Verbesserung der Schutzfunktion und des Entwicklungsprozesses werden diese Größen herangezogen.

### Versuchsträger

Speziell für die Untersuchungen des Ableitverhaltens haben wir am Institut verschiedene Modellfunkenstrecken entwickelt. Für die hochgeschwindigkeitskamera-basierte Untersuchung der Stromdichte wurde eine Laufschieneanordnung herangezogen. In der fol-

genden Abbildung ist die Modellfunkenstrecke dargestellt.



Modellfunkenstrecke mit Laufschieneanordnung und separierter Elektrode

Das Plasma wird im unteren Bereich zwischen den Elektroden gezündet. Durch eine Öffnung am oberen Ende der Plasmaabrennkammer findet ein Druckausgleich mit der Umgebung statt. Die Kathodenlaufschiene (in der Abbildung rechts) ist in drei Segmente unterteilt, welche jeweils mit einem Stromshunt verbunden ist. Dies erlaubt uns den Strom für einzelne Bereiche zu messen. Die Stromdichte ist neben der Abhängigkeit von der elektrischen Leitfähigkeit im Allgemeinen von dem Plasmadruck und der Temperatur des Plasmas abhängig. Ziel der Untersuchungen ist es ein vereinfachtes Modell für die Stromdichte

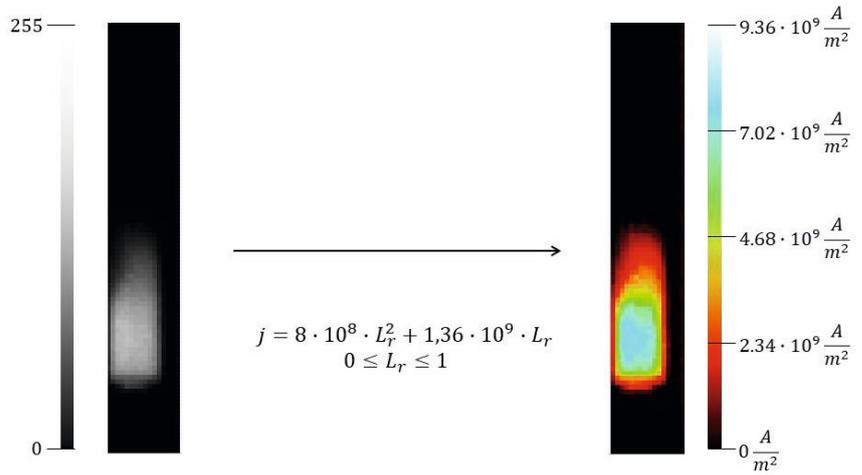
während des Ableitprozesses aufzustellen.

**Modellierung**

Die Modellierung ist anhand der Abbildung rechts zu entnehmen. Durch den Aufbau der Modellfunkenstrecken mit den Teilkathoden ist es möglich Teilströme für diese zu messen. Mithilfe der Kenntnis der Elektrodenfläche und unter der Annahme, dass das Plasma den Interelektrodenraum homogen ausfüllt, lassen sich Stromdichten bestimmen. Auf der rechten Seite der Abbildung rechts ist die Kombination der erstellten Aufnahmen mit den Kameraeinstellungen (Integrationszeit, Blende, Neutraldichtefilter) dargestellt. Daraus ergibt die Strahldichte, welche auf die maximal erreichbare Intensität der Kamera normiert ist. Als Resultat werden diese beiden Größen, die Stromdichte und die relative Strahldichte durch ein empirisches Modell korreliert.

**Ergebnisse**

Das Ergebnis des experimentell erstellten Modells ist in der unteren Abbildung dargestellt. Auf der linken Seite ist eine Aufnahme der Hochgeschwindigkeitskamera zu sehen. Diese erlaubt eine Quantisierung der Helligkeit des Plasmas mit



Anwendung der quadratischen Funktion zur Bestimmung von lokalen Stromdichten

der Transferfunktion in eine Stromdichte gewandelt. Als Ergebnis entsteht das Bild auf der rechten Seite. Die Skala zeigt eine mögliche Stromdichteverteilung im Bereich zwischen 0 A/m<sup>2</sup> und 10<sup>10</sup> A/m<sup>2</sup>.

Es ist zu sehen, dass über den unteren Bereich der Elektrode der größte Teil des Stromes fließt.

Dieses Modell reicht oftmals, um eine grobe Einschätzung für die Beschreibung des Plasmazustands zu erhalten.

Für zukünftige Untersuchungen ist es

**Quelle**

Kopp, T., Peters, E., Kurrat, M.: *Estimation of Current Density Using High-Speed-Camera Recordings in a Model Spark Gap during Surge Currents*, Plasma Physics and Technology, Symposium on Physics of Switching Arc, September 2019

**Projektsteckbrief**



**Projektname**

Lichtbogentechnologie

**Projektlaufzeit**

Juli 2018 - Juni 2021

**Projektpartner**

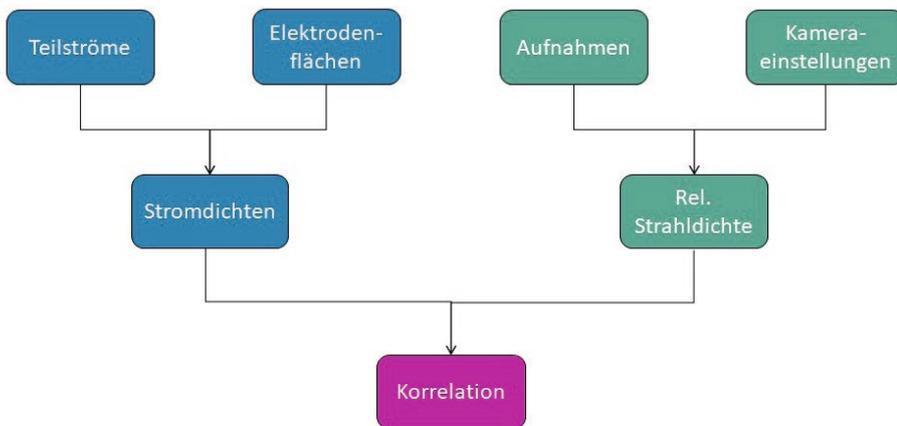
Phoenix Contact



**Kontakt**

Enno Peters

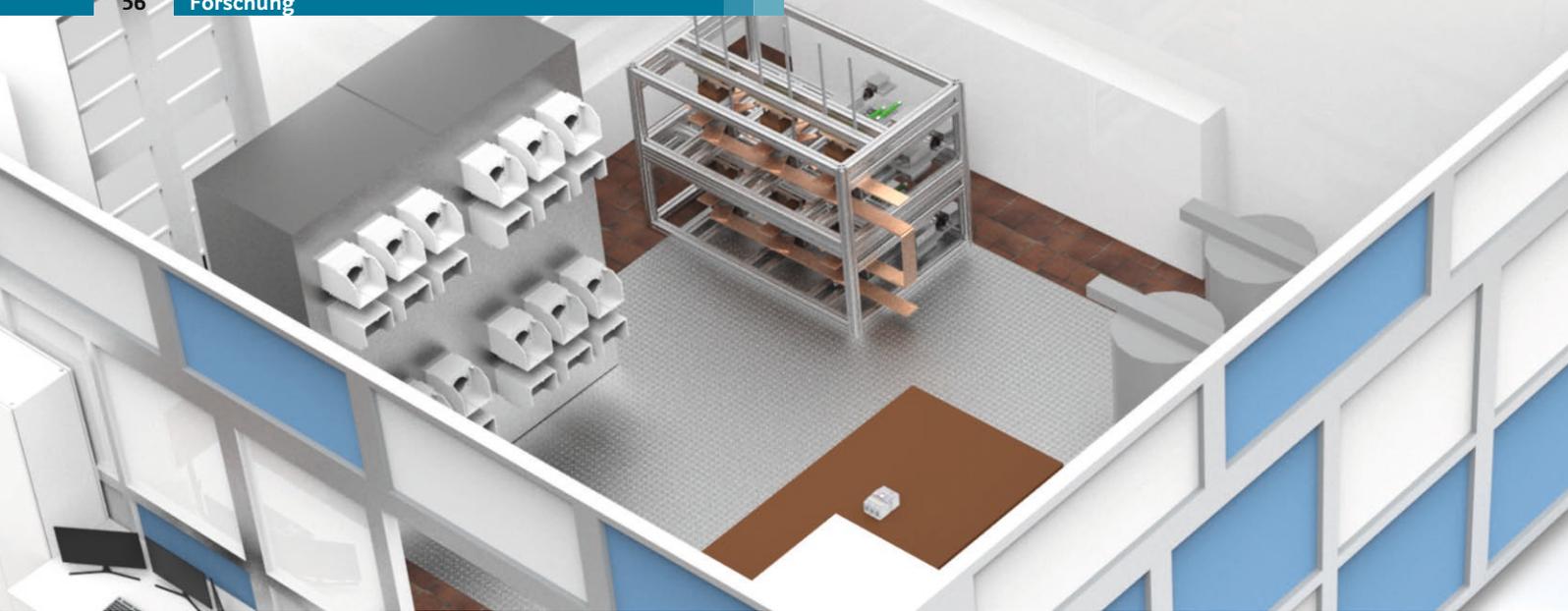
e.peters@tu-braunschweig.de



Schematische Übersicht der Korrelation elektrischer und strahlungsphysikalischer Größen

8 Bit (Werten von 0 – 255). Die Amplitude des Stoßstromes beträgt 20 kA. Die aufgenommene Intensität wird während der Belichtungszeit mit dem zeitlichen Mittelwert der Stromdichte korreliert. Die Korrelation, welche auf eine quadratische Regression der Messdaten zurückzuführen ist, mittig abgebildet. Der Gültigkeitsbereich des Modells liegt für Stoßströme zwischen 10 und 20 kA. Um aus der Intensitätsverteilung auf der linken Seite eine Stromdichteverteilung zu gewinnen, wird das erstellte Modell angewendet. Jeder einzelne Pixel wird mit

sinnvoll, die Grenzen des Modells weiter zu untersuchen, um die Aussagekraft weiter zu steigern. Des Weiteren ist eine Integrierung in eine automatisierte Messdatenauswertung nützlich, sodass die Anwendbarkeit effizienter gestaltet wird.



# Universal Power Switch

## Neubau eines Hochleistungsgleichstromprüffeldes im Zuge des Förderprojektes UPS

Der Anteil an Gleichstromnetzen nimmt immer mehr zu. Einsatzgebiete sind unter anderem Bordnetzte in Elektrofahrzeugen, sowie Schiffen oder Flugzeugen. Auch auf Grund der Energiewende ist ein weiterer Anstieg durch die Nutzung von erneuerbaren Energien wie Photovoltaiksystemen, stationären und mobilen Batteriespeichern, sowie die Netzanbindung von Offshore-Windparks zu erwarten. Um die Lastflüsse in diesen Netzstrukturen sicher steuern zu können sind geeignete Leistungsschalter unabdingbar. Für die Entwicklung geeigneter, kostengünstiger Leistungsschalter ist die Kombination von modernsten Leistungshalbleitern und mechanischen Schutzschaltgeräten in einem Hybridschaltgerät, eine vielversprechende zukunftsweisende Lösung. Hybride Leistungsschalter vereinen die Vorteile mechanischer Schaltgeräte und Leistungshalbleiter in einem Gerät und sind für Gleich- sowie Wechselstromanwendungen verwendbar. In einem Verbundprojekt aus Industrie und Wissenschaft wird in UPS ein solcher optimierter Leistungsschalter entwickelt.

### Das Neue Hochleistungsgleichstromprüffeld

Im Zuge dieses Projektes entsteht am elenia ein neues Prüflabor für AC- und DC- Hochstromprüfungen. Die Auslegung des Prüffeldes hat mit dem Start des Projektes begonnen. Es wurden verschiedene Möglichkeiten zur Erzeugung einer Prüfgleichspannung betrachtet. Diese wurden weiterentwickelt sodass konkret mit den Herstellern: ABB, Ampegon und Astrol diskutiert wurde.

Die gegenwärtigen Planungen sehen eine maximale Prüfspannung von 12 kV DC und einen maximalen Prüfstrom von 30 kA vor. Auf Grund der angestrebten hohen Leistungen erfolgt die Planung der Netzanbindung in enger Zusammenarbeit mit den zuständigen Stellen der Technischen Universität Braunschweig, sowie dem örtlichen Netzbetreiber BS-Netz.

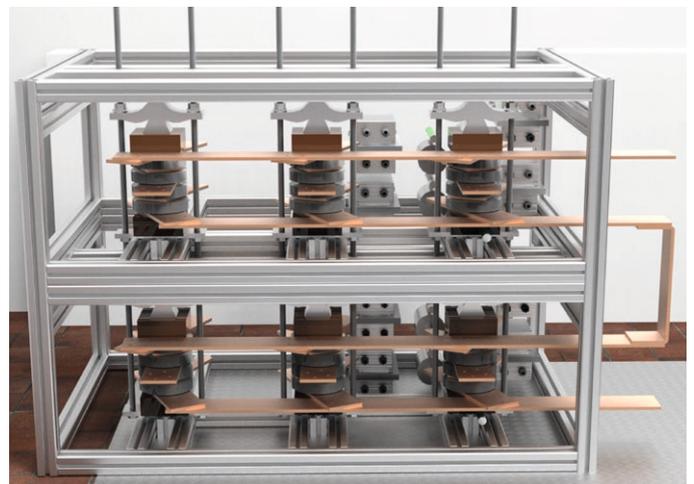
### Primärtechnik

Das Herzstück des neuen Labors bildet ein gesteuerte B12 Gleichrichter. Für die notwendigen Prüfparameter ist keine

Phasenanschnittsteuerung des Gleichrichters notwendig. Das grundlegende Verhalten der Brücke wurde in SPICE-Simulationen verifiziert. Der Gleichrichter wird über zwei Transformatoren, die in den Kellerräumen des Institutes aufgestellt werden, versorgt. Durch die um 30° verschobene Ausgangsspannung der beiden Transformatoren wird eine besonders geringe Restwelligkeit der Gleichspannung erreicht. Das eigentliche Prüffeld samt Gleichrichter, Mess- und Prüftechnik wird in der Hochspannungshalle des Institutes errichtet. Die Bauvorhaben im Rahmen des Projektes UPS sind mit dem Gebäudemanagement der Technischen Universität Braunschweig vorgeplant. Der Aufbau des Prüflabors erfolgt in der Hochspannungshalle des elenia.

### Die Sekundärtechnik

Während der Versuche im Labor kann es zu transienten Vorgängen kommen, die in Steuersysteme einkoppeln können. Um eine mögliche Beeinträchtigung auszuschließen, werden sicherheitsrelevante Steuerstromkreise in Schütztechnik reali-



Aufbau des B12- Gleichrichters im Prüffeld

sirt. Im Vergleich zu elektronischen Lösungen ist diese durch wesentlich höheren Spannungspegel störungsempfindlicher und damit zuverlässiger für diesen sicherheitsrelevanten Einsatzbereich. Die Sekundärtechnik übernimmt die Ansteuerung und den Schutz der Primärtechnik, welche durch entsprechend gegenseitige Verriegelungen sicherstellt, dass Fehlschaltung zuverlässig vermieden werden können. Außerdem wird der Schutz von Personen durch entsprechende Türschalter sichergestellt, welche bei Betätigung automatisch und augenblicklich den Leistungsteil der Versuchsanlage stromlos schalten müssen. Zur Steuerung der Sekundärtechnik kommt eine speicherprogrammierbare Steuerung zum Einsatz. Da sie sich weit außerhalb der Versuchskammer befindet, ist eine Beeinflussung oder Störung des Gerätes durch transiente Vorgänge nicht anzunehmen.

### Mess- und Steuertechnik

Der Prüfablauf wird mit einem Sequenzer der Firma Amotronics vorgegeben. Dieser hat 8 digitale Eingänge, 16 Digitale Ausgänge und 8 Analoge Ausgänge, er ist voll Echtzeitfähig und kann die Ausgänge mit einer Genauigkeit von bis zu 50 ns ansteuern. Sämtliche Steuersignale werden aus Gründen der Störsicherheit mittels Lichtwellenleiter an die einzelnen Schalter übermittelt. Der Sequenzer der Firma Amotronics wurde innerhalb der Laboratorien der TU von einem wissenschaftlichen Mitarbeiter in Betrieb genommen. Dabei wurde die Software auf ihre Eignung geprüft und das Gerät in das Netzwerk der TU eingebunden. Der Sequenzer erfüllt die vorgegebenen Anforderungen und kann für die bevorstehenden Prüfungen genutzt werden.

Die Installation, sowie Kalibrierung der neuen Messtechnik wird in enger Zusammenarbeit mit der PTB erfolgen.

### Netzanschluss

Da die zum Betrieb des Prüffeldes nötigen Leistungen unmöglich aus dem 6 kV-Netz der Universität entnommen werden können, sieht die Planung eine direkte Anbindung über eine neuerrichtete Schaltanlage in den Räumlichkeiten des elenia an das 20 kV-Stadtnetz vor. Die Evaluation der Eignung der Netzstruktur erfolgte in enger Absprache mit dem Netzbetreiber BS-Netz. Hierfür sind, unter anderem, Simulationskampagnen in PSCAD durchgeführt worden. Dies ermöglichte es den Spannungseinbruch in der 20 kV-Ebene bei transienter Leistungsabnahme durch das Prüffeld zu ermitteln. Hierbei wurden unterschiedliche Netzpunkte, Lastfälle und Anschluss-szenarien betrachtet. Die Simulationsergebnisse sind BS-Netz zur Planung des Anschlusses zur Verfügung gestellt worden. Szenarien mit Spannungseinbrüchen von unter 10% bei maximaler Leistungsabnahme sind von BS-Netz gefordert worden. BS|NETZ hat Netzurückwirkungen sowie thermische und magnetische Belastungen von Betriebsmitteln in seiner Netzinfrastruktur betrachtet. Dazu wurden entsprechende Netzberechnungen sowohl durch BS|NETZ als auch durch die TU durchgeführt. Die Berechnungen kommen unabhängig voneinander zu dem Ergebnis, dass eine Bereitstellung hoher Stoßprüfströme aus dem Mittelspannungsnetz der BS|NETZ unter bestimmten schaltungstechnischen Voraussetzungen im Rahmen zulässiger Netzurückwirkungen möglich ist. Dabei auftretende thermische und magnetische Belastungen mit vorzeitiger Alterung der betroffenen Betriebsmittel werden als gering eingeschätzt. Sollten sich dennoch andere Erkenntnisse in der Praxis bei den betroffenen Betriebsmitteln herausstellen, muss gemeinsam nach Lösungen für einen nachhaltigen Betriebsmitteleinsatz und den damit verbundenen

zuverlässigen Netzbetrieb der BS|NETZ gesucht werden.

Der Anschlussvertrag über die 20kV-Versorgung liegt zur Unterschrift im Präsidium der TU Braunschweig vor, sodass die Planungssicherheit zur Ausführung des Bauprojekts hergestellt werden konnte. Die Versorgung über eine 20kV-Leitung steht nun nichts mehr im Wege. Die Arbeiten könnten zeitnah beginnen und dauern laut BS|Netz je nach Auftragslage nur wenige Monate.



## Projektsteckbrief

### Projektname

Universal Power Switch

### Projektlaufzeit

Juli 2016 – Juni 2020

### Projektpartner

E-T-A,  
Rockwell Automation,  
PTB,  
TU Braunschweig

### Kontakt

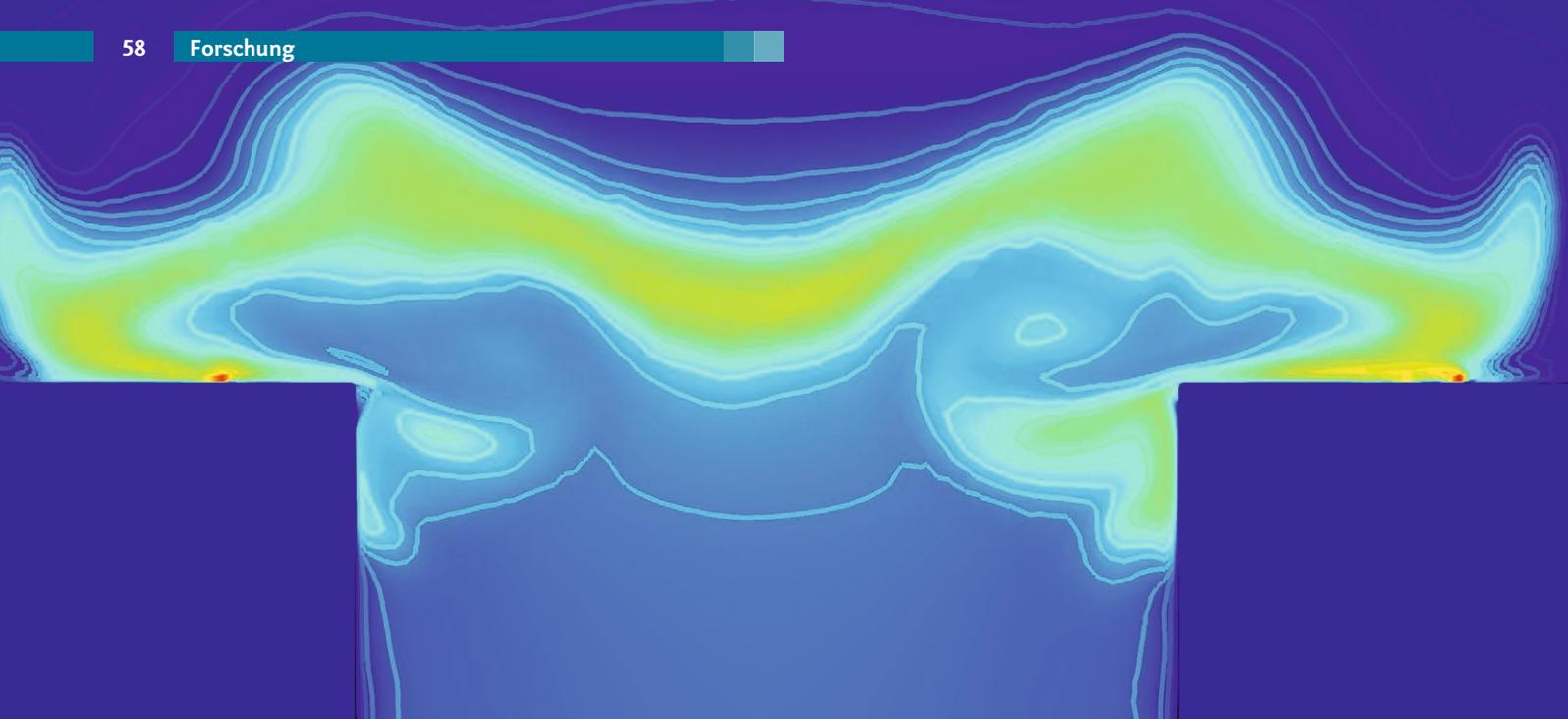
Dirk Bösche  
d.boesche@tu-braunschweig.de  
+49 531 391-7745

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

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



# Forschungsbereich Plasmen

## Computermodelle für thermische Plasmen

### Einführung

Computermodelle sind unerlässlich für das Verständnis und die Untersuchung der grundlegenden physikalischen Vorgänge in Plasmen. Im Allgemeinen wird bei den Computermodellen zwischen Black-Box-Modellen, qualitativen physikalischen Modellen und allgemeinen physikalischen Modellen unterschieden. Um das Verhalten eines Plasmas orts- und zeitaufgelöst analysieren zu können, sind die allgemeinen physikalischen Modelle gut geeignet.

Bei den allgemeinen physikalischen Modellen wird zwischen einer Einzelteilchenbeschreibung und einer Beschreibung im Flüssigkeitsbild unterschieden. Als geeigneter Ansatz für die im Rahmen der Untersuchung betrachteten Plasmen wird mit Computermodellen im Flüssigkeitsbild gearbeitet. Das Plasma wird als eine einzige Flüssigkeit beschrieben, bei dem die Teilchen im Plasma eine Temperatur haben. Um das Verhalten von Plasmen zeit- und ortsaufgelöst zu verstehen, können in den Computermodellen mehrere physikalische Domänen einbezogen und miteinander gekoppelt werden.

### Plasmamodell

Ausgehend vom Liouville-Theorem wird die Entwicklung der Verteilung der Spezies in einem Plasma durch die verallgemeinerte Boltzmann-Gleichung beschrieben. Es handelt sich hierbei um

eine Einzelteilchenbeschreibung, welche eine Abhängigkeit von sieben Variablen aufweist.

Über die Bildung der Momente der Boltzmann-Gleichung können die Gleichungen der Magneto hydrodynamik gewonnen werden. Das Plasma wird dabei im Flüssigkeitsbild betrachtet.

Die beschreibenden Gleichungen der Magneto hydrodynamik (MHD) setzen sich aus den Gleichungen für die Beschreibung der elektrischen und magnetischen Felder sowie der Beschreibung des Plasmas als Fluid zusammen. In gekoppelter Form wird dieser Satz an Gleichungen gelöst.

Die Beschreibung des Plasmas mittels der MHD basiert auf Erhaltungsgleichungen, welche die Erhaltung der Masse, des Impulses und der Energie abbilden. Die Einflüsse durch die elektrischen und magnetischen Felder werden durch die Maxwell-Gleichungen abgebildet. Die Gleichungssätze können miteinander gekoppelt werden. Eine schwache Kopplung erfolgt dabei über das elektrische Strömungsfeld, die elektrische Feldstärke und die magnetische Flussdichte.

### Strahlungstransport

Das Plasma ist ein äußerst spannendes Naturphänomen, da es durch seine wahrnehmbare Leuchterscheinung auch eine Aussage über seinen Zustand macht.

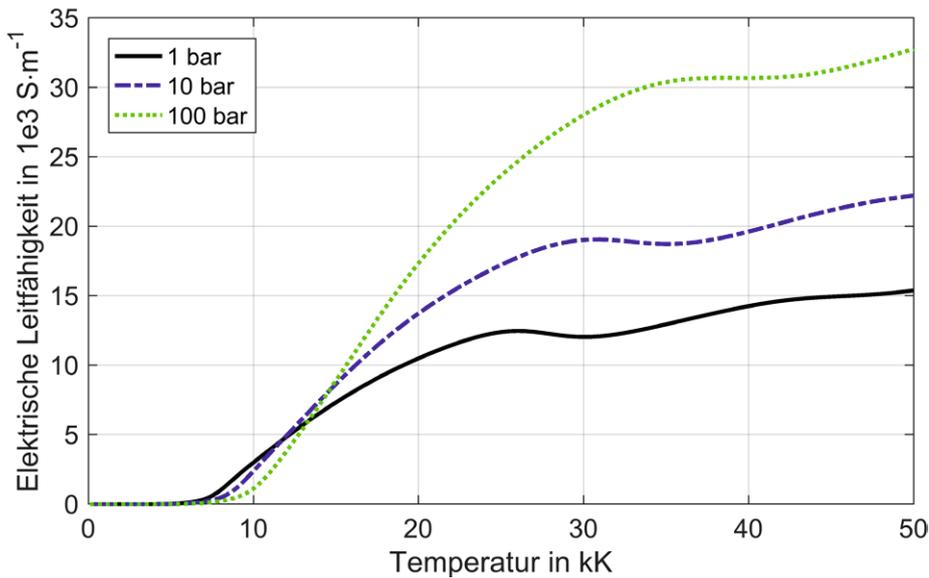
Für eine Beschreibung im Computermodell werden zu den MHD-Gleichungen weitere beschreibende Gleichungen ergänzt. Die Leuchterscheinung im Plasma stellt einen wichtigen Transportmechanismus dar. Dabei sind die Vorgänge der Emission, der Absorption und Streuung durch das Plasma zu betrachten. Im Allgemeinen führt dies zur allgemeinen Strahlungstransportgleichung.

Zur geeigneten numerischen Lösung der Strahlungstransportgleichung werden etablierte Strahlungsmodelle herangezogen. Zu nennen sind der Nettoemissionskoeffizient oder die PN-Approximation. Für die Strahlungsmodelle dienen als Eingangsdaten unter anderem die Absorptionskoeffizienten des Plasmas. In Abhängigkeit von der numerischen Performance und der Genauigkeit der Ergebnisse werden beide Modelle herangezogen.

Im Gesamtmodell werden für die Strahlung zusätzlich Gleichungen berücksichtigt, die zusammen mit dem MHD-Modell gelöst werden.

### Plasmaeigenschaften

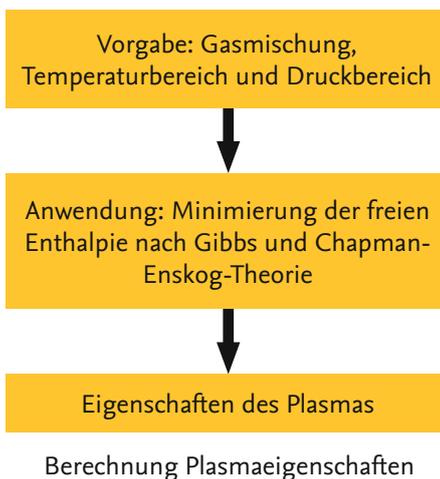
Das Computermodell wird durch die physikalischen Eigenschaften des Plasmas ergänzt. Diese Eigenschaften sind temperatur- und druckabhängig Größen in den MHD Gleichungen. Die Eigenschaften lassen sich unterteilen in die thermodynamischen Eigenschaften und



#### Berechnete elektrische Leitfähigkeit

Transporteigenschaften. Zu den thermodynamischen Eigenschaften gehören die Enthalpie, die spezifische Wärmekapazität und die Dichte. Die elektrische Leitfähigkeit, die thermische Leitfähigkeit und die dynamische Viskosität zählen zu den Transporteigenschaften.

Die Plasmaeigenschaften werden vorab berechnet und für die Größen in den MHD-Gleichungen hinterlegt. Für die Berechnung der Plasmaeigenschaften sind zwei Ansätze zu nennen, die benutzt werden. Die Berechnung der thermodynamischen Eigenschaften erfolgt typischerweise über den Ansatz der Minimierung der Freien-Enthalpie nach Gibbs. Die Berechnung der Transporteigenschaften basiert auf der Chapman-Enskog Theorie. Unter Berücksichtigung der Gasmischung, der Temperatur und des Druckes ergeben sich die jeweiligen Eigenschaften des Plasmas. In Abbildung 1 ist der Ablauf der Berechnung der Plasmaeigenschaften schematisch skizziert. Die Eigenschaften sind für einen weiten Temperaturbereich von bis zu 50.000 K



und einen weiten Druckbereich von bis zu 100 bar berechnet. In obiger Abbildung ist exemplarisch die berechnete elektrische Leitfähigkeit über der Temperatur und für drei verschiedene Drücke dargestellt.

#### Plasma-Festkörper Interaktion

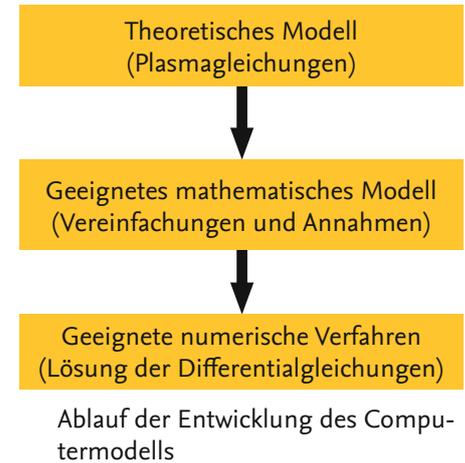
Ein zusätzlicher Bestandteil im Rahmen der Modellierung ist die Interaktion des Plasmas mit der Umgebung. Im Wesentlichen zählen hierzu die Elektroden. Die Eigenschaften der Elektroden, wozu die Wärmekapazität, die elektrische Leitfähigkeit und die thermische Leitfähigkeit zählen, weisen eine starke Temperaturabhängigkeit auf. Diese Eigenschaften sind elementar für die Wärmeleitvorgänge in den Elektroden und können über das Fourier'sche Wärmeleitungsgesetz beschrieben werden.

#### Lösung des Computermodells

Aus den einzelnen Beschreibungsgleichungen und den Eigenschaften für das Plasma und der Festkörper wird das theoretische Modell gewonnen. Unter Berücksichtigung geeigneter Vereinfachungen und Annahmen wird aus dem theoretischen Modell ein geeignetes lösbares mathematisches Modell gewonnen. Das mathematische Modell besteht in diesem Falle aus einem Satz gekoppelter Differentialgleichungen, die auf dem Rechengebiet zu lösen sind. Die Lösung der beschreibenden Gleichungen erfolgt durch geeignete numerische Verfahren. Der Ablauf, die die Entwicklung des Computermodells skizziert, ist in der nachfolgenden Abbildung zu sehen.

Zur numerischen Lösung der Differentialgleichungen wird das Rechengebiet in einzelne diskrete Elemente unterteilt.

Auf dem Berechnungsgebiet werden die Differentialgleichungen diskretisiert und ein lineares Gleichungssystem erzeugt. Geeignete numerische Verfahren für die Diskretisierung sind unter anderem die Finite-Elemente Methode oder die Finite-Volumen Methode. Unter Berücksichtigung der Randbedingungen wird aus dem Satz an Differentialgleichungen ein lineares Gleichungssystem gewonnen. Mittels weiterer iterativer Verfahren, wird dann das lineare Gleichungssystem gelöst.



Bei der Lösung der Plasmagleichungen kommen entweder druckbasierten oder dichte-basierte Verfahren zum Einsatz. Die druckbasierten Verfahren werden für inkompressible Fluide verwendet. Hervorzuheben ist dabei das SIMPLE-Verfahren, auch Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations genannt. Es erfolgt eine iterative Lösung der Druck- und Impulsgleichungen. Die dichte-basierte Verfahren werden für kompressible Fluide verwendet. Typischerweise wird dabei der Druck aus den Zustandsgleichungen ermittelt.

In enger Zusammenarbeit mit dem Institut für theoretische Physik ist ein Computermodell mit den hier skizzierten physikalischen Domänen aufgebaut. Weitere Untersuchungen befassen sich mit der Weiterentwicklung der Computermodelle.

#### Projektsteckbrief

**Projektname**  
Forschungsbereich Plasmen

**Projektlaufzeit**  
Januar 2018 - Dezember 2021

**Projektpartner**  
Phoenix-Contact

**Kontakt**  
Muhamet Alija  
m.aliya@tu-braunschweig.de



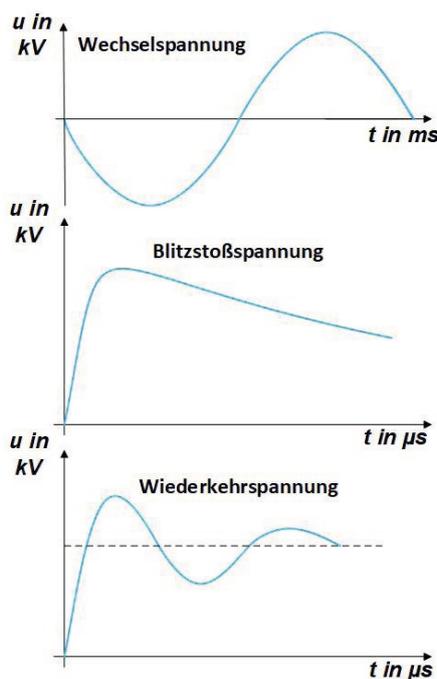
# Dielektrische Festigkeit

## Von Wechselspannung über Blitzstoßspannung zur transienten Wiederkehrspannung

In diesem Jahr waren vor allem drei Spannungsformen (Abbildung Mitte) in der Hochspannungstechnik des elenia von besonderem Interesse. Dies war wieder die Wechselspannung im tiefkalten Stickstoffgas, wie im Vorjahr, welche bei hohen Gasdichten betrachtet wurde. Motivation dafür ist die Unterstützung der Auslegung des Isoliersystems von Supraleiteranwendungen, welches aus flüssigem und oder gasförmigen Stickstoff je nach Betriebsart und Zustand bestehen kann. Darüber hinaus ging es auch in den umgekehrten Dichte-Bereich, in das Hochvakuum. Dort wurden Untersuchungen mit Blitzstoßspannungen im Vakuumgefäß durchgeführt. Um die elektrische Festigkeit gerade in Vakuumschaltern zu charakterisieren ist dazu auch ein Versuchsaufbau mit transienter Wiederkehrspannung realisiert worden.

### Wechselspannung im tiefkalten Stickstoffgas

An einer Versuchsanordnung im Kryostat konnte bestätigt werden, dass das Paschengesetz bei Temperaturen um 80 K im kalten Stickstoffgas anwendbar ist, insofern es auf die Gasdichte bezogen ist. Davon ausgehend wurden weitere Gasdurchschlagmechanismen und die Ladungsträgerbereitstellung, gültig für Raumtemperatur, auf ihre Anwendbarkeit im kalten Gas hin untersucht. Als relevante Prozesse des Gasdurchschlages wurden der Townsend- und der Streamer-Mechanismus genauer betrachtet.



Die drei Spannungsformen

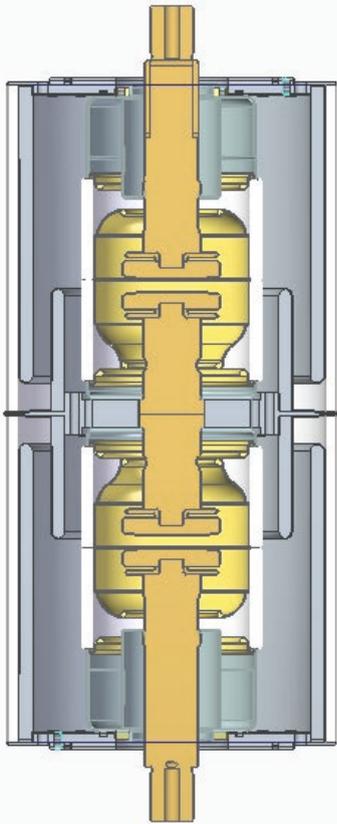
Dazu wurden die Durchschlagsspannungen bei homogenen und schwach inhomogenen Feldanordnungen ermittelt und damit die makroskopische elektrische Feldstärke im Gasvolumen simuliert. Darauf aufbauend konnte der Ionisierungskoeffizient bestimmt werden und damit Ladungsträgerdichten ermittelt werden. Diese Ladungsträgerdichten ermöglichen dann die Berechnung, ob eine ausreichende Raumladung entsteht um zu einer Feldverstärkung in Größenordnungen des makroskopischen elektrischen Feldes zu führen. Die Berechnung

zeigt, dass der Townsend-Mechanismus im kalten Gas bei Elektrodenabständen von 1-3 mm der wirksame Durchschlagsprozess bei Wechselspannungsbelastung ist. Diese Betrachtung wurde auch bei Blitzstoßbelastung durchgeführt. Dort konnte ein Übergangsbereich gefunden werden, wo bei 1 mm noch der Townsend-Mechanismus wirkt, bei 3 mm aber bereits der Streamer-Mechanismus.

### Blitzstoßspannung im Vakuum

Neben den Hochspannungstechnischen Untersuchungen im Bereich der Wechselspannungen werden in diesem Jahr wieder verstärkt Blitzstoßspannungsuntersuchungen durchgeführt. Die Motivation hierfür liegt in der Energiewende. Neben den viel diskutierten erneuerbaren Energien und dem intelligenten Stromnetz ändern sich auch die Anforderungen an Komponenten im Stromnetz. So erfordert der Einsatz von erneuerbaren Energien wesentlich mehr Schaltspiele im Netz und eine dementsprechend höhere Belastung der Komponenten. Gleichzeitig wird über umweltfreundliche Schaltmethoden nachgedacht. Der Vakuumschalter ist mit seinen hervorragenden Eigenschaften eine hervorragende Lösung für Anwendungen im Mittelspannungsnetz. Ansätze um diesen auch als Alternative zu dem Schwefelhexafluorid-Schalter im Hochspannungsnetz zu verwenden werden derzeit am elenia untersucht. In der [Hochspannungshalle](#)

(Abbildung rechts) werden hier Versuche zur Dielektrik von Vakuum-Doppelunterbrechungen durchgeführt. Viele Bereiche aus diesem Themenfeld wurden bereits in den 80er und 90er Jahren untersucht, insofern ist die dielektrische Festigkeit von Doppelstrecken weitestgehend bekannt. Auch der Einfluss von Bauteilen auf fliegenden Potentialen wurde in einigen Arbeiten thematisiert und in Kombination mit Steuerkonden-



Vakuum-Schalter mit Doppelunterbrechung

satoren untersucht. Eine Forschungslücke besteht in Ansätzen zur kapazitiven Steuerung dieser fliegenden Potentialen. Hierzu hat das elenia eine neue Lösung gefunden und untersucht diese im Detail in mehreren Abschlussarbeiten in unserer Hochspannungshalle.

In einer ersten Masterarbeit wurde eine zusätzliche externe Schirmanordnung entwickelt, welche die Doppelstrecke umgibt (Abbildung 3). Es werden Vakuumkondensatoren zur Steuerung der fliegenden Potentialen, also des Mittenpotentials und die Potentialen der Dampfschirme der Doppelanordnung verwendet. Da die entstehende Kapazität im 50 pF-Bereich liegt und damit relativ gering ist, wurde gleichzeitig eine Schirmung entwickelt, welche den externen Störeinfluss reduziert. Hierdurch können alle fliegenden Potentialen bei einer Be-

lastung mit Blitzstoßspannungen zuverlässig eingestellt werden.

In einer zweiten Masterarbeit ist die entwickelte Schirmanordnung in einen Vakuumrezipienten eingebaut und die dielektrische Festigkeit des Systems mit einer klassischen Up- and Down Methode ermittelt worden. Um sicherzustellen dass die entstehenden Röntgenemissionen ungefährlich sind, wird in dieser Arbeit mit Blitzstoßspannungen gearbeitet. Weiterhin besteht an dieser Stelle eine Kooperation mit der PTB Braunschweig, welche mit ihrer Expertise ermöglicht die Röntgenemissionen während der Blitzstoßspannungsapplikation im  $\mu\text{s}$  Bereich zu erfassen und zu bewerten.

Zu diesem Thema gibt es eine Publikation im Rahmen der ISDEIV 2018 in Greifswald und eine weitere ist geplant für die kommende ISDEIV in Padova / Italien.

#### Wiederkehrspannung im Vakuum

Seit Beginn des Jahres ergänzt eine weitere Spannungsform den Forschungsbereich Hochspannungstechnik am elenia. Die transiente Wiederkehrspannung, kurz TRV (transient recovery voltage) ist eine netztypische Spannungsform, die beim Ausschaltvorgang eines Leistungsschalters entsteht. Die charakteristische Form wird gekennzeichnet durch einen schnellschwingenden Verlauf (einige kHz) und eine hohe Amplitude mit bis zu 150 kV (im Mittelspannungsnetz). In einer Masterarbeit wurde ein Hochspannungskreis konzipiert und anhand von Leerlauf- und Kurzschlussversuchen charakterisiert. Diese Arbeit diente zur Wegbereitung für einen Aufbau eines Hochspannungskreises zur Erzeugung der TRV.

Der Ausschaltvorgang eines Leistungsschalters im Netz wird oftmals durch einen Netzfehler ausgelöst. Im Falle eines Fehlers wird der Schalter erst durch einen hohen Kurzschlussstrom und anschließender Wiederkehrspannung belastet. Zur Untersuchung der Ausschaltcharakteristik von Vakuum-schaltern in der Hochspannungsebene wird am elenia ein synthetischer Prüfkreis verwendet. Der Prüfkreis besteht aus einem Hochstromkreis, der schon seit einigen Jahren fester Bestandteil des **synthetischen Leistungsprüffeldes** ist. Der Hochstromkreis erzeugt einen Kurzschlussstrom von bis zu 63 kA. Der Bau eines Hochspannungskreises ist in diesem Jahr gestartet. Er wird eine tran-



Hochspannungshalle mit Vakuumgefäß

siente Wiederkehrspannung mit bis zu 150 kV bei Frequenzen von 5 bis 10 kHz ermöglichen.

Neben Spannungsfestigkeitsprüfungen mittels Blitzstoßspannungen wird demnach in Zukunft auch die TRV angewendet werden können. Dazu wird die TRV an einer doppelunterbrechenden Schaltstrecke im Vakuum eingesetzt. Der Doppelunterbrechende Schalter wird ebenfalls als einfachunterbrechende Schaltstrecke verwendet. Hier wird ein hoher Kontaktabstand von bis zu 30 mm realisiert, um den Durchschlagmechanismus und die Wiederverfestigung für lange Lichtbögen zu untersuchen und somit die Spannungsfestigkeit des Vakuumschalters für die Hochspannungsebene zu gewährleisten.

Mit den vorgestellten Untersuchungen anhand der drei Spannungsformen befindet sich der Forschungsbereich Hochspannungstechnik des elenia im Bereich der aktuellen Forschung.

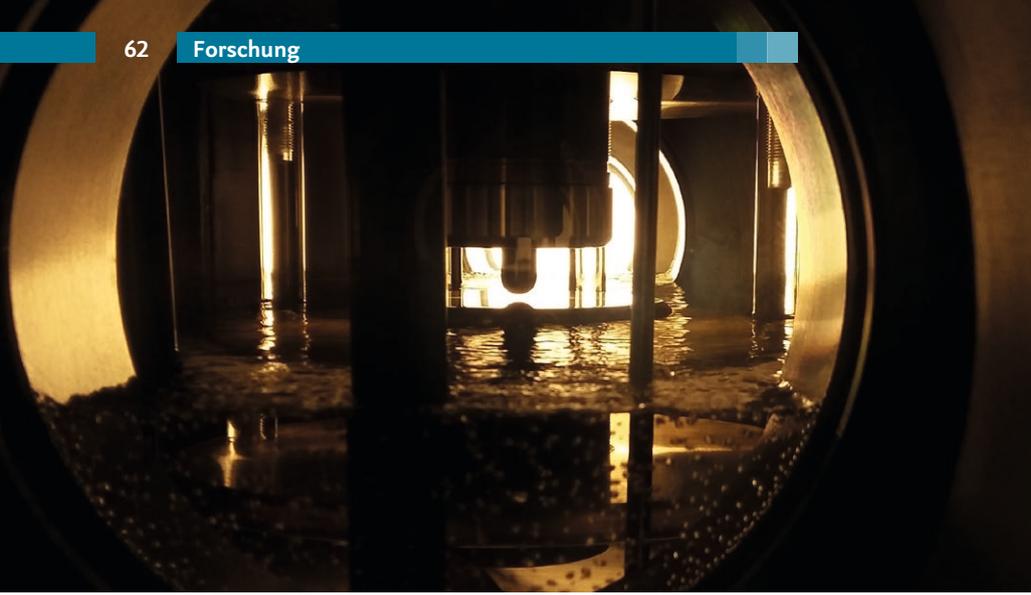
#### Kontakt

Nicholas Hill  
n.hill@tu-bs.de

Benjamin Kühn  
b.kuehn@tu-braunschweig.de

Timo Meyer  
Timo.meyer@tu-braunschweig.de





## Nicholas Hill - Eine kalte Promotion mit dem Titel „Evaluation of breakdown voltages in cold nitrogen gas“

*Nachfolgend ist die Kurzfassung der Arbeit in angepasster Version zu finden.*

Mit wachsender Anzahl an Hochtemperatur-Supraleiteranwendungen wird die Kenntnis der elektrischen Festigkeit von flüssigem Stickstoff, ein Kühl- und Isoliermedium, immer wichtiger. Um im Rahmen der Isolationskoordination nicht jede Komponente eines Supraleitersystems separat untersuchen zu müssen, ist es sinnvoll ein Verfahren zu entwickeln mit dem die elektrische Festigkeit berechnet werden kann. Diese Arbeitsstelle stellt eine Methodik zur Verfügung die solch eine Auslegung unterstützt.

Als Ausgangspunkt für die Berechnung können bekannte Durchschlagmodelle verwendet werden, wie zum Beispiel der verschleierte Gasdurchschlag. Denn unter der Berücksichtigung, dass in Supraleitersystemen immer auch ein Wärmeeintrag vorliegt, entweder betriebsbedingt oder im Fehlerfall, kann es zur Bildung eines Mischsystems aus flüssiger und gasförmiger Phase kommen. Viele Untersuchungen haben bereits den starken Einfluss einer Gasphase im flüssigen Stickstoff auf die Isolation gezeigt. Um daher den Durchschlagmechanismus im flüssigen Stickstoff zu untersuchen, muss vorher der Prozess im kalten Gas verstanden werden. Dies wird in dieser Arbeit anhand von selbst ermittelten Durchschlagspannungen bei

tiefkaltem Stickstoffgas durchgeführt. Dabei werden einfache Modellvorstellungen zur Theorie des Gasdurchschlages einem komplexen und umfassenden Modell vorgezogen um eine bessere ingenieurtechnische Anwendung zu ermöglichen. Zunächst werden relevante Theorien zu Entladungen in Gas beschrieben. Dazu gehört die Berechnung von Ionisierungskoeffizienten, der Anzahl an Elektronen und über Näherungsgleichungen auch die Einflussgrößen wie Flächen oder Volumeneffekte sowie die Spannungs-Zeit-Fläche. Da die Modelle auf die gemessenen Durchschlagspannungen angewendet werden, folgt eine Beschreibung des Zustandes und der Eigenschaften des untersuchten Stickstoffgases zum Zeitpunkt der Versuche. Danach wird beschrieben, wie die Wechsel- und Blitzstoßspannungen in dieser Arbeit erzeugt und bestimmt werden. Auf die Diskussion der ermittelten Durchschlagspannungen folgt dann die detaillierte Analyse von möglichen Prozessen der Ladungsträgerbereitstellung, welche für die Einleitung des Durchschlages benötigt werden. Darunter fallen die Ionisation im Volumen durch kosmische und Hintergrundstrahlung, Photoemission und Feldemission. Im Anschluss wird dann der eigentliche Prozess, welcher zum Durchschlag der Isolationsstrecke führt, betrachtet. Als relevante Modelle werden die Entladung



Kryostat (li.) mit Vorratsbehälter für flüssigen Stickstoff (re.)

nach Townsend und Streamer betrachtet. Unterstützt wird die Modellbildung und Diskussion durch elektrostatische Feldsimulationen zur Bestimmung der elektrischen Feldstärken und damit Lawinenbildung entlang der Feldlinien. Abgeschlossen wird mit einem Ausblick auf Folgefragen und weitergehende Untersuchungen.



### Steckbrief

*Am elenia in der Zeit:* seit 04/2013

*Tätigkeiten am elenia:*

- Elektrische Festigkeit von flüssigem und gasförmigen Stickstoff, Teilentladungsdiagnostik bei erhöhten Temperaturen in Niederspannungsgeräten
- AG-Leiter (ab 10/2019) und Hochspannungshallenverantwortlicher
- Gesicht des Studienganges Elektromobilität ([tu-braunschweig.de/eitp/studium/emob](http://tu-braunschweig.de/eitp/studium/emob), seit Mai 2014)





# Tobias Marseille - Vakuumschalter

## Kurzfassung

**Vakuumleistungsschalter** (VCB) für die Mittelspannungsebene stellen als Schaltgeräte eine entscheidende Komponente in der Energieversorgung dar. Beim Ausschaltvorgang möglicher Kurzschlussströme im Netz von bis zu 63 kA (RMS) entsteht eine erhebliche Belastung durch das Schaltplasma, welche der VCB aufgrund seiner besonderen Konstruktion der Schaltkontaktstücke sicher beherrschen kann. Ein weitverbreiteter Typ ist das Transversal-Magnetfeld-(TMF)-Schaltkontaktstück. Beim Ausschalten von hohen Strömen ( $> 10$  kA) kommt es zur Aufschmelzung von Anoden-Oberflächenbereichen durch das Schaltplasma. Diese werden als Anodenflecke bezeichnet und nehmen Durchmesser von wenigen Milli-metern an. Sie kühlen zum Stromnulldurchgang ab, wobei die Temperaturhöhe zu Stromnull eine wesentliche Rolle bei der Wiederverfestigung der Schaltstrecke spielt. Die Höhe der Anoden-Oberflächentemperatur zum Stromnulldurchgang ist ein Maß für das Strom-Ausschaltvermögen der Schaltkontaktstücke und darf eine gewisse Grenztemperatur nicht überschreiten, da ansonsten ein Niederdruckdurchschlag nach Townsend möglich ist. Im Rahmen dieser Arbeit werden erstmalig die abkühlenden Anodenflecke zum Stromnulldurchgang bei konventionellen TMF-Schaltkontaktstücken (Kupfer/Chrom 75/25 (gew. %)) mit einem

kalibrierten thermografischen Messverfahren analysiert. Hierzu wird eine neuartige Methode zur thermografischen Oberflächentemperaturmessung entwickelt, die für die Analyse der abkühlenden Anodenflecken zum Stromnulldurchgang bei Ausschaltvorgängen mit verschiedenen Stromstärken von 20 kA (RMS), 25 kA (RMS) und 31,5 kA (RMS) angewendet wird. Sie ermöglicht einen detaillierten Einblick in die Abkühlvorgänge der Anodenflecke.

Mit dem Erlöschen des Vakuumbogens bis zu 3 ms vor Stromnull sind die abkühlenden Anodenflecke eindeutig auf der Schaltkontaktstückoberfläche identifizierbar. Die Positionen der abkühlenden Anodenflecke korrelieren mit dem Laufverhalten des Vakuumbogens, welches simultan mit einer Hochgeschwindigkeitskamera ermittelt wird. Der Schwerpunkt der Flecken ist von der Stromstärke abhängig und verlagert sich mit steigendem Wert vom inneren Oberflächenbereich zum äußeren Rand des Schaltkontaktstückes. In den Abkühlverläufen der Anodenflecke werden zu Beginn Temperaturen von  $> 2200$  K ermittelt. Diese fallen auf ein Plateau mit einer Temperatur von 1350 K und einer Plateaudauer von bis zu 3 ms ab. Dieses entsteht aufgrund der freiwerdenden latenten Wärme während der Verfestigung des Kontaktstückmaterials im eutektischen Punkt. Nach der vollständigen

Verfestigung kühlen die Bereiche weiter auf Raumtemperatur ab. Zum Stromnulldurchgang wird eine Temperatur von ca. 1400 K bestimmt, welche geringer ist als die Grenztemperatur von 1700 K und somit keinen Einfluss auf die Wiederverfestigung der Schaltstrecke hat.

Die thermografische Oberflächentemperaturmessung setzt die Kenntnis des Emissionsgrades von Kupfer/Chrom 75/25 voraus, welcher in einem zusätzlichen experimentellen Aufbau messtechnisch erfasst wird. Hierzu wird das Schaltkontaktstückmaterial mit einer Induktionsspule aufgeschmolzen und gleichzeitig dessen thermische Abstrahlung gemessen. Dieser Aufbau ermöglicht die Bestimmung des Emissionsgrades beliebiger Metalle bei verschiedenen Temperaturen. Der Emissionsgrad von Kupfer/Chrom 75/25 wird für den Temperaturbereich zwischen fest (1350 K) und flüssig (1903 K) im Wellenlängenbereich von  $1,5 \mu\text{m} - 1,7 \mu\text{m}$  bestimmt. Hieraus ergibt sich ein Emissionsgradverlauf von  $0,237 \pm 0,026$  auf  $0,125 \pm 0,016$ .

Die Methode zur Oberflächentemperaturmessung im Zusammenhang mit der Emissionsgrad-Bestimmung ist auf diverse Schaltgeräte mit einsehbaren Kontaktstückoberflächen und Kontaktmaterialien anwendbar, sodass diese Arbeit eine allgemeine Grundlage für die thermischen Untersuchungen von Schaltkontaktstückoberflächen darstellt.



### Steckbrief

*Am elenia in der Zeit:* von 11/2013 bis 06/2018

*Tätigkeiten am elenia:*

- Mitglied im PMO
- Oberflächentemperatur-Messung von Vakuumschaltkontaktstücken in Kooperation mit ABB

*Jetzt tätig bei:*

TenneT Offshore, Betriebsingenieur für HGÜ-Systeme



## Ole Binder - HGÜ

### mit dem Titel „Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Verlustbestimmung an HGÜ-Mehrpunkt-Stromrichtermodulen

In der Dissertation werden das Schalt- und Verlustverhalten von Teilmodulen (en: submodules, TM) experimentell untersucht. Hierfür wird der Betrieb eines modularen Mehrpunkt-Stromrichters (en: modular multilevel converter, MMC) für die Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) anhand von Szenarien nachgebildet.

Wesentliche Komponenten eines TM sind Hochspannungskondensatoren und IGBT-Module. Einleitend werden neben dem Vorstellen dieser elementaren TM-Komponenten auch Aufbau und Funktionsweise eines MMC erklärt. Zusammen mit der Beschreibung der Regelung des Stromrichterbetriebs und der Strompfade eines Teilmoduls sind somit die Grundlagen gelegt, mit denen geeignete Versuchsanordnungen hergeleitet werden. Der Aufbau der neu eingerichteten Versuchsanlage, der neu entwickelten niederinduktiven Teilmodule und des speziell für die Untersuchungen zusammengestellten Messsystems werden dokumentiert. Durch Einführen einer Begrenzer-Schaltung wird ermöglicht, Halbleiter-Durchlassspannungen

präzise zu messen und Halbleiter-Sperrschicht-Temperaturen zu überwachen. Die Verlustbestimmung erfolgt durch die Auswertung gemessener elektrischer Signale. Zur schnellen und einfachen Analyse des dynamischen TM-Schaltverhaltens wird ein standardisiertes Auswerteverfahren eingeführt.

Mit einem vereinfachten Stromrichtermodell werden MMC-Ventilströme für verschiedene MMC-Betriebszustände simuliert. Diese berechneten Stromverläufe bilden die Grundlage für das Erstellen der betriebsnahen Prüfsequenzen, die experimentell in der Versuchsanlage nachgebildet werden. Das Erstellen der Prüfsequenzen unter Vorgabe von Sollwerten wird erklärt und anhand gemessener Signalverläufe veranschaulicht. Der TM-Prüfling wird für einen bestimmten Zeitraum kontinuierlich im jeweiligen Szenario betrieben. Einblick in die Schaltvorgänge und die thermische Belastung des TM-Prüflings während des Prüfbetriebs wird gegeben. Welchen Verlustanteil im Prüfling die Schalthandlungen und Durchlasszustände der IGBTs und Dioden sowie

der Teilmodul-Kondensator verursachen, wird aufgezeigt. Die Genauigkeit bei der TM-Verlustbestimmung während des kontinuierlichen Szenario-Betriebs unter Verwendung der eingeführten Auswertemethodik wird analysiert.

Abschließend werden das Messsystem und die relevanten Messketten ausführlich untersucht. Es werden Maßnahmen abgeleitet, um eine hohe Genauigkeit bei den elektrischen Messungen und der Verlustbestimmung zu erreichen. Das Messsystem wurde für das Messen von Gleich- und Wechselspannungen sowie Sprung- und Impulsantworten kalibriert und die erreichten Messunsicherheiten werden aufgeführt. Auf Basis der Kalibrierergebnisse wird die erreichbare Unsicherheit berechnet, mit der Schalt- und Leitungsverluste mit Hilfe des verwendeten Messsystems bestimmt werden können.

Mit Abschluss dieser Arbeit stehen eine Versuchsumgebung und ein Referenzmesssystem bereit, um das Schalt- und Verlustverhalten von MMC-Teilmodulen zu analysieren und zu optimieren.



#### Steckbrief

*Am elenia in der Zeit:*

von 11/2010 bis 04/2016

*Tätigkeiten am elenia:*

- Mitgründer des elenia Projekt-Management-Office (PMO)
- Leitung des Forschungsschwerpunkts „Komponenten der Energieversorgung“
- Internationales Forschungsprojekt EMRP ENGo7 „Metrology for High Voltage Direct Current (HVDC)“
- Gremienarbeit (CIGRE Working Group B4.52 „HVDC Grid Feasibility Study“)

*Jetzt tätig bei:*

EnBW AG als Manager Elektrotechnik im Bereich Offshore-Windenergie





## Uwe Westerhoff - Batterietechnik

### Klassifizierung von Lithium-Ionen-Batteriezellen mittels kenngrößenbasierter Methoden

Im Zuge der Energie- und Mobilitätswende stellen innovative Energiespeicher eine Schlüsseltechnologie dar, um die Klimaschutzziele des Pariser Abkommens aus dem Jahr 2015 zu erreichen. Der stark steigende Bedarf an Energiespeichern für mobile und stationäre Anwendungen hat zur Folge, dass die Anzahl der Batteriezell-, Modul- und Systemhersteller und deren Produktionskapazitäten rasant wachsen. Die kurzen Zellentwicklungs- und Produktionshochlaufzeiten tragen zur steigenden Bedeutung der integrierten Qualitätssicherung von der Elektrode bis zum System bei. Ein wichtiger Baustein der integrierten Qualitätssicherung stellt die Klassifizierung von Batteriezellen im Wareneingang eines Modul- und Systemherstellers dar.

Die vorliegende Arbeit widmet sich dieser Herausforderung mit einer messtechnischen Analyse der Qualitätsmerkmale von Li-Ionen-Batteriezellen auf Basis elektrischer und elektrochemischer Messmethoden, um eine Klassifizierung von Batteriezellen in einer Wareneingangsprüfung durchführen zu können. Hierzu werden 250 Pouchzellen in einem zweistufigen Qualitätstestverfahren messtechnisch untersucht und deren Eigenschaften durch eine Vielzahl an Kennzahlen in einem Kennzahlensystem zusammengefasst.

Der erste Test entspricht einer kurzen zeitsparenden Wareneingangsprüfung (Short Quality Test) unter Anwendung der elektrochemischen Impedanzspektroskopie. Anschließend wird jede Zelle mit einer umfassenden Testroutine aus Kapazitäts-, Ruhespannungs-, C-Raten- und Innenwiderstands-

messung sowie der elektrochemischen Impedanzspektroskopie bei unterschiedlichen Ladezuständen charakterisiert und die Ergebnisse mit den Auswertemethoden der differentiellen Spannungsanalyse, der Verteilungsfunktion der Relaxationszeiten und dem Ersatzschaltbildverfahren weiter aufgearbeitet. Diese Kombination von kenngrößenbasierten Methoden entspricht dem Long Quality Test. Das Kennzahlensystem aus den Ergebnissen dieser Testroutine liefert eine gute Trennschärfe der Qualitätsmerkmale, um eine Sortierung und Klassifizierung der Zellen vorzunehmen. Abschließend wurde mit diesem Kennzahlensystem die Güte der kurzen Wareneingangsprüfung bewertet. Mit diesem Kurzttest können Zellen mit ausgeprägten Qualitätsmerkmalen identifiziert und klassifiziert werden.



#### Steckbrief

*Am elenia in der Zeit:*

von 06/2012 bis 12/2018

*Tätigkeiten am elenia:*

- Aufbau und Betreuung von Batteriezelltestständen zur Formierung, Reifung und Zyklisierung von Li-Ion Batterien am elenia und in der BLB
- Entwicklung und Umsetzung von Schutzmaßnahmen für das Testen von Li-Ionen Batterien
- Leitung des Forschungsschwerpunkts „Elektromobilität“

*Jetzt tätig bei:*

Volkswagen AG in der QS Batteriezellfertigung





# Jan Mummel - Elektromobilität

## Entscheidungsunterstützung in der Planung von Infrastrukturen für Elektrofahrzeugflotten

Der Verkehrssektor ist mit etwa 22 % einer der Hauptverursacher der Treibhausgasemissionen in Deutschland [UMW18c]. Durch die Elektrifizierung des Antriebsstrangs kann mit einer Energieversorgung bei einem hohen Anteil erneuerbaren Energiequellen eine erhebliche Reduzierung der Treibhausgasemissionen im Betrieb der Fahrzeuge sichergestellt werden. Die Etablierung von Elektrofahrzeugen ist so ein wichtiger Bestandteil der Mobilitätswende.

Um die Elektrofahrzeuge dauerhaft als Alternative zu den bisherigen konventionellen Fahrzeugen zu etablieren, müssen die Entwicklungskosten der Fahrzeuge auf das Niveau der aktuellen Fahrzeuge gesenkt werden. Zudem ist ein wirtschaftlicher Betrieb der Fahrzeuge notwendig. Speziell im gewerblichen Bereich kann überwiegend nicht auf die öffentliche Ladeinfrastruktur (LI) zurückgegriffen werden, ohne dass ein zeitlicher und damit kostentechnischer Mehraufwand für den Anwender entsteht. Daher muss für den Betrieb der gewerblichen Elektrofahrzeuge die Errichtung der notwendigen Infrastruktur berücksichtigt werden. Die alleinige Energiekostenbetrachtung des Fahrverbrauchs ist hierbei nicht ausreichend. Zur Infrastruktur von Elektrofahrzeugflotten zählen die LI und die Energieversorgung. Die Energieversorgung kann aus dem Energieversorgungsnetz und sofern möglich aus lokalen dezentralen erneuerbaren Energien (DEA) erfolgen.

Die Dissertation zeigt auf, dass schon jetzt durch eine fundierte Planung eine nachhaltige Integration der Infrastruktur für Elektrofahrzeuge in der gewerblichen Anwendung gelingen

kann. Die Besonderheit hierbei ist, dass die Integration der Infrastruktur einen ganzheitlichen Ansatz unter Berücksichtigung der technischen, ökologischen und ökonomischen Anforderungen betrachtet.

Zunächst erfolgt die Betrachtung der Elektromobilität im Kontext der Mobilitäts- und Energiewende. Darauf aufbauend wird in dieser Dissertation ein Modell entwickelt, welches Fuhrparkmanagern bei der Planung der benötigten Infrastruktur für eine gewerbliche Flotte unterstützt. Hierbei werden Szenarien für die LI mit unterschiedlicher Ladeleistung für gesteuerte und ungesteuerte Ladevorgänge erstellt und simuliert. Zudem werden die ökonomischen Auswirkungen unterschiedlicher Netzanschlussleistungen unter Berücksichtigung des Leistungspreises analysiert und die ökologischen und ökonomischen Auswirkungen der Einbindung lokaler DEA untersucht. Auf Basis dieser erfolgt eine Entscheidungsunterstützung für die Fuhrparkmanager hinsichtlich vorher festgelegter Zielkriterien wie einem nachhaltigen Betrieb der Flotte ohne Einschränkung des Mobilitätsverhaltens.

Am exemplarischen Beispiel einer Elektrofahrzeugflotte eines Energieversorgungsunternehmens kann aufgezeigt werden, dass mit einer höheren Ladeleistung von 22 kW mit intelligenter LI sowie der Einbindung einer lokalen DEA (Photovoltaik-Anlage) im Betrieb eine Besserstellung hinsichtlich ökologischer und ökonomischer Betrachtung ohne Beeinflussung des Mobilitätsverhaltens gegenüber einer konventionellen Flotte erzielt werden kann.



### Steckbrief

*Am elenia in der Zeit:*

von 01/2013 bis 12/2018

*Tätigkeiten am elenia:*

- Leitung des Forschungsschwerpunkts „Elektromobilität“ - 06/2016-12/2018
- Niedersächsisches Forschungszentrum Fahrzeugtechnik (NFF) - Wissenschaftlicher Geschäftsführer - 01/2017-01/2018
- NFF - Koordination Forschungsvision "Nachhaltige Mobilität" - 10/2013-10/2014

*Jetzt tätig bei:*

PE-Systems GmbH - Geschäftsführender Gesellschafter





# Ole Marggraf - Spannungsregelung

## Auslegung und Bewertung autonomer Spannungsregelkonzepte für Verteilungsnetze

In den letzten Jahren wurden, in erster Linie getrieben durch die Energiewende, neue Ansätze zur statischen Spannungshaltung im Verteilungsnetz wie der regelbare Ortsnetztransformator und die spannungsabhängige Blindleistungsregelung (Q(U)-Regelung) entwickelt. Zusammen mit bereits länger existierenden Konzepten wie dem Strangregler und dem regelbaren Umspannwerktransformator sowie Technologien, die aus höheren Spannungsebenen übertragen wurden, wie dem Static Synchronous Compensator, bilden sie eine Fülle an Möglichkeiten der statischen Spannungshaltung. Diese beziehen jeweils die gemessene aktuelle Spannung am Netzverknüpfungspunkt als Regelgröße ein. Im Gegensatz zur Wirksamkeit der Regelverfahren ist insbesondere das Zusammenspiel dieser verschiedenen autonom arbeitenden Spannungsregelungen bisher kaum beachtet worden.

Die Dissertation widmet sich im Kern den Wechselwirkungen der genannten autonomen Spannungsregelungen im Verteilungsnetz in Form von Simulationen, Laborversuchen und einem Feldversuch in einem realen Niederspannungsnetz. Dabei werden sowohl Wechselwirkungen zwischen Spannungsregelungen des gleichen als auch verschiedenen Typs betrachtet. Zur Vorbereitung der Untersuchungen wurden dynamische Simulationsmodelle für einen regelbaren Umspannwerktransformator, einen regelbaren Ortsnetztransformator sowie eines Strangreglers erstellt und anhand von Labormessungen validiert. Auf ein bereits existierendes und validiertes Wechselrichtermodell konnte zudem aus einer Vorarbeit zurückgegriffen werden. Für die Laborversuche wurde

darüber hinaus eine Hardware-In-The-Loop-Simulation eines regelbaren Ortsnetztransformators aufgebaut und validiert. Die Untersuchungen zu möglichen Spannungsregelungs-Interaktionen stellen die Q(U)-Regelung in den Fokus, da erst durch einen spannungshaltungsbedingten Blindleistungs-transport wechselseitige Regelungsinteraktionen im Verteilungsnetz möglich gemacht werden. Die Ergebnisse der Simulationen, Laborversuche und des Feldversuchs zeigen, dass es theoretisch und praktisch zu Interaktionen kommen kann, die nicht als Instabilitäten interpretiert werden sollten. Aus Netzsicht unerwünschte Interaktionen, wie beispielsweise mehrere Stufen des regelbaren Ortsnetztransformators in Folge, konnten nur für praxisferne, bzw. fehlerhafte Regelungsparameter und installierte Leistungen der Erzeugungsanlagen, parametrisiert mit der Q(U)-Regelung, oberhalb der Aufnahmefähigkeit des Netzes hervorgerufen werden. Für die praktische Auslegung von autonomen Spannungsregelkonzepten für Verteilungsnetze können sie daher vernachlässigt werden.

Abschließend erfolgt eine simulative Wirksamkeitsanalyse der untersuchten Spannungshaltungskonzepte – in Form einer Steigerung des Integrationspotenzials hinsichtlich weiterer Erzeugungsanlagen. Sie zeigt die höchste Wirksamkeit für eine kombinierte Spannungshaltung aus Q(U)-Regelung und regelbarem Ortsnetztransformator. Ergänzt werden die Ergebnisse durch eine ökonomische Bewertung auf Basis von Marktrecherchen und einer Befragung von Verteilungsnetzbetreibern.



### Steckbrief

*Am elenia in der Zeit:*

von 01/2013 bis 05/2019

*Tätigkeiten am elenia:*

- Koordination und Bearbeitung der FNN-Studie Statische Spannungshaltung sowie des Forschungsprojektes „U-Control“ zur Statischen Spannungshaltung
- Planung und Aufbau einer Forschungs-Photovoltaik-Anlage am elenia
- Mitglied der Schwerpunktleitung „Aktives Verteilnetz“ seit März 2017

*Jetzt tätig als:*

Projektentwickler HS-Primärtechnik für 110-kV-Umspannwerke bei der Avacon Netz GmbH





# Stephan Diekmann - Energiemanagement

## Technisch-ökonomische Betrachtung von elektrischem Gebäudeenergiemanagement bei Mehrfamilienhäusern

Die Energiewende und die damit verbundene großflächige Umstrukturierung des Energiesystems sind eines der größten ingenieurwissenschaftlichen Projekte unserer Zeit. Die ambitionierten Ziele des Klimaschutzes und einer möglichst vollständig regenerativen Energieversorgung lassen sich nur verwirklichen, wenn alle Wirtschaftssektoren daran mitwirken. Die in diesem Kontext bisher zu geringe wissenschaftliche Beachtung des hohen Anteils der Mehrfamilienhäuser am Haushaltssektor wird in dieser Arbeit adressiert. Rechtliche, regulatorische und organisatorische Hemmnisse werden als wesentliche Faktoren für die bisherige Zurückhaltung von Wohnungswirtschaft, Bewohnern und weiteren Akteuren identifiziert. Diese basieren unter anderem auf der gegebenen Akteursvielfalt und der damit fehlenden Personenidentität zwischen potentielltem Betreiber und Nutzer dezentraler Energieanlagen.

Diese Forschungsarbeit zeigt das technisch-ökonomische Potential von elektrischem Energiemanagement bei Mehrfamilienhäusern auf und liefert folglich Anreize, um das ganzheitliche Gelingen der Energiewende zu ermöglichen. Dabei wird das entwickelte Konzept des skalierbaren Multi-Level-Energiemanagements vorgestellt. Es kombiniert die Ansätze des Mieterstroms und der simultanen Mehrfachnutzung von Photovoltaik-Speichersystemen miteinander. Bewohnern und weiteren Akteuren wird die effiziente Partizipation an der Energiewende ermöglicht und die Bewältigung der steigenden Elektrifizierung des Haushaltssektors, bedingt durch Megatrends wie Digitalisierung und Elektromobilität, wird be-

günstigt.

Weiterhin wird ein Demonstrator-Gebäude vorgestellt, an dem im Rahmen der Arbeit mitgewirkt wurde. Konzipiert und realisiert ist es u. a. als Laborumgebung für zukünftige praktische Untersuchungen der entwickelten Ansätze.

Diese Arbeit untersucht das beschriebene Konzept mittels einer Rechnersimulation hinsichtlich Einflussfaktoren für technische und ökonomische Zielgrößen. Die Simulationsergebnisse bestätigen das vermutete Potential sowohl für Bewohner und Anlagenbetreiber als auch gebäudeübergreifend. Anhand verschiedener Simulationsszenarien wird insbesondere die Vorteilhaftigkeit einer dynamischen Mehrfachnutzung technischer Anlagen über mehrere Wohnungen deutlich, gegenüber einer statischen Zuordnung von Anlagenanteilen. Die gewonnenen Erkenntnisse sowie abgeleitete Handlungsempfehlungen begünstigen die Partizipation des Geschosswohnungsbaus an der Energiewende und leisten folglich einen wichtigen Beitrag zum Erreichen der gesteckten Ziele.



### Steckbrief

*Am elenia in der Zeit:*

von 02/2013 bis 12/2018

*Tätigkeiten am elenia:*

- Elektromobilität (FleetsGoGreen, MOBIL4e), Elektrisches Gebäudeenergiemanagement bei Mehrfamilienhäusern (BASIS)
- Jungmitgliederreferenz des VDE Bezirksvereins Braunschweig e.V. - 02/2013 bis 12/2018
- DV-Koordinator und Systemadministrator

*Jetzt tätig als:*

Geschäftsführender Gesellschafter, Hidden Industries GmbH, Braunschweig





# Daniel Unger - Solarstromspeicher

## Energiewirtschaftliche Integration von mehrfach genutzten Solarstromspeichern

Die ständige Verfügbarkeit elektrischer Energie hat eine hohe volkswirtschaftliche Bedeutung. Für ein zukünftiges Energiesystem mit einer steigenden Erzeugung aus erneuerbaren Energien wird mehr Flexibilität benötigt. Einen Beitrag zu der benötigten Flexibilität können Solarstromspeicher leisten. Es werden 560 Haushalte simuliert, welche sich im Jahresenergieverbrauch, der Photovoltaikanlagengröße und der Speichergröße unterscheiden. Die Kombinationen werden jeweils so gewählt, dass die Summe der durchschnittlichen Verteilung im Jahr 2015 entspricht. Als Ergebnis wird ein Durchschnittsspeicher mit einer Kapazität von 4,8 kWh entwickelt.

Über zwei Betriebsweisen können Solarstromspeicher ihre verfügbare Kapazität am Energiemarkt anbieten. Bei der sequenziellen Betriebsweise nutzt in jedem Zeitschritt nur ein Nutzer den Solarstromspeicher. Das kann der Haushalt mit der Eigenverbrauchsoptimierung oder der Anbieter mit der Nutzung am Energiemarkt sein. Die Solarstromspeicher werden jeweils leer dem nächsten

Nutzer übergeben. Es stehen so pro Jahr durchschnittlich 22 % der Speicherkapazität für eine Mehrfachvermarktung zur Verfügung. Bei der zweiten Betriebsweise, dem simultanen Betrieb von Solarstromspeichern, können pro Jahr durchschnittlich 55 % der Speicherkapazität für die Mehrfachvermarktung genutzt werden. Die Steigerung gegenüber dem sequenziellen Betrieb ist möglich, weil alle Nutzer gleichzeitig den Solarstromspeicher nutzen. Generell ist die Verfügbarkeit in den Wintermonaten höher als in den Sommermonaten.

Die Nutzung der Solarstromspeicher am Energiemarkt beeinflusst die restliche Erzeugungsstruktur. Für die Untersuchung der Auswirkungen wird ein Fundamentalmodell des Energiemarktes entwickelt, welches auf einer gemischt-ganzzahligen Optimierung beruht. Die Simulation von Szenarien erfolgt in einem Zeitraster von 15 Minuten für eine Winterwoche mit hoher Last und niedriger Einspeisung aus erneuerbaren Energien und einer Sommerwoche mit entsprechend niedriger Nachfrage und hoher Einspeisung. Die Eingangs-

daten umfassen den Kraftwerkspark in Europa und die Übertragungsleistung der Grenzkuppelstellen. Der Einsatz mehrfach genutzter Solarstromspeicher im Jahr 2015 hat nur geringe Auswirkungen auf den Energiemarkt. Grund ist die niedrige installierte Anzahl an Speichern.

Im Jahr 2030 führt eine im Vergleich zu 2015 höhere verfügbare Anzahl an Solarstromspeichern zu einem deutlichen Einfluss auf den Energiemarkt. Die erzeugte Energie aus Gaskraftwerken und die exportierte Energie wird in der Winterwoche mit einer steigenden Anzahl an mehrfachgenutzten Solarstromspeichern reduziert. In der Sommerwoche führt eine höhere Speicherkapazität von Solarstromspeichern zu einer stärkeren Nutzung von heimischen Steinkohlekraftwerken. Die Erzeugungsleistung aus heimischen Braunkohlekraftwerken wird dafür reduziert. Sowohl in der Winter- als auch in der Sommerwoche wird der Ausstoß von CO<sub>2</sub> durch den Einsatz der mehrfachgenutzten Solarstromspeicher reduziert. Die eingesparte Menge liegt zwischen 1.300 und 5.000 Tonnen.



### Steckbrief

*Am elenia in der Zeit:*

von 06/2012 bis 06/2018

*Tätigkeiten am elenia:*

- Mehrfachnutzung von Solarstromspeichern, Blindleistungsbereitstellung von dezentralen Erzeugungsanlagen
- AGL 02/2017 bis 06/2018

*Jetzt tätig bei:*

Hidden Games als Geschäftsführer

# Veröffentlichungen

## Alija, M., Kurrat, M.:

A Computational Model For High Current Density Arc Plasmas , Plasma Physics and Technology Journal, Symposium on Physics of Switching Arc , Prague: Czech Technical University , 9. September 2019, S. 1-4.

## Brockschmidt, J.:

Characterisation of lithium-ion battery stacks in terms of second use applications, IBPC 2019 - International Battery Production Conference , Braunschweig, 4.- 6. November 2019

## Drees, R.:

Fast Charging Formation, IBPC 2019 - International Battery Production Conference, Braunschweig, 4.- 6. November 2019

## Hill, N., Hilbert, M., Kurrat, M.:

Partial Discharge Testing for Low Voltage Switchgear at High Temperatures, 66th IEEE Holm Conference, Milwaukee, 15.-18. September 2019

## Hill, N., Blaz, M., Haake, F., Hilbert, M., Kurrat, M.:

Bushing for a Liquid Nitrogen Cryostat - A Novel Field Grading Material, 21st International Symposium on High Voltage Engineering, Budapest, 26.-30. August 2019

## Hoffmann, L., Ryll, K., Kurrat, M.:

Key figure-based evaluation and process quality relationships of the formation result of lithium-ion batteries, International Battery Production Conference, Braunschweig, 4.- 6. November 2019

## Hoffmann, L., Grathwol, J., Haselrieder, W., Leithoff, R., Jansen, T., Dilger, K., Dröder, K., Kwade, A., Kurrat, M.:

Capacity distribution of large format lithium-ion battery pouch cells in context with pilot production processes, Kraftwerk Batterie, Aachen, 2.- 4. April 2019

## Hoffmann, L., Westerhoff, U.:

Formierung und Reifung von Lithium-Ionen Zellen – Beschleunigung und energetische Optimierung, Batterieforum Deutschland, Berlin, 23.-25. Januar 2019

## Hoffmann, L., Grathwol, J., Haselrieder, W., Leithoff, R., Jansen, T., Dilger, K., Dröder, K., Kwade, A., Kurrat, M.:

Capacity Distribution of Large Lithium-Ion Battery Pouch Cells in Context with Pilot Production Processes, Energy Technology, Mai 2019. DOI:10.1002/ente.201900196

## Hoffmann, M., Rathke, C., Menze, A., Hemdan, N., Kurrat, M.:

Parallel Operation of HVDC DRU and VSC Converters for Offshore Wind Farm Connection: Technical and Economic Feasibility, The 15th IET international conference on AC and DC Power Transmission, Coventry, 5.- 7. Februar 2019



Pfeiffer Vacuum HiPace® 300 Turbovakuumpumpe mit TC400-Antriebselektronik ideal für UHV-Anwendungen

**Kopp, T., Peters, E., Kurrat, M.:**

Estimation of Current Density Using High-Speed-Camera Recordings in a Model Spark Gap during Surge Currents, Plasma Physics and Technology, Symposium on Physics of Switching Arc, Tschechien, 9.-13. September 2019, S. 60-64. ISBN 2336-2626

**Köppe, H., Schuster, M., Grab, R., Engel, B.:**

Reactive Power Provision with Distributed Energy Resources: Limitations, Potentials and Losses, IEEE PES PowerTech 2019, Mailand, 30. November 2019

**Kühn, B., Weber, B., Gentsch, D., Kurrat, M.:**

Influence of varying gaps between TMF contacts on constricted high current vacuum arcs, Plasma physics and technology, Symposium on Physics of Switching Arc, Czech Republic, Brno, 9.-13. September 2019, S. 103-106. ISBN 2336-2626

**Kühn, B., Gentsch, D., Weber, B., Hilbert, M., Kurrat, M.:**

Recent Developments Of Field Grading For High Voltage Vacuum Circuit Breakers, The 21st International Symposium on High Voltage Engineering, International Symposium on High Voltage Engineering, Budapest, Hungary, Springer, 26.-30. August 2019

**Nuschke, M., Winter, B., Strauß-Mincu, D., Engel, B.:**

Power System Stability Analysis for System-split Situations with Increasing Shares of Inverter based Generation, NEIS 2019, Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems – NEIS 2019, Hamburg, Germany, Berlin: VDE-Verlag, 19.-20. September 2019

**Peters, E., Claaßen, L., Kurrat, M.:**

Beschreibung einer Methode zur Bildanalyse von Schaltlichtbögen in Niederspannungsschaltgeräten , Albert-Keil-Kontaktseminar, Karlsruhe, 9.-11. Oktober 2019

**Pronobis, O., Kurrat, M.:**

Assessment of Static Charging Management Methods, ETG Kongress, Esslingen am Neckar, 8.- 9. Mai 2019

**Ries, J., Reinhold, C., Herr, H., Engel, B.:** Modular Control System for Testing of Electrical Power Systems and Energy Management Systems in elenia-energy-labs, ETG-Fb. 158: Internationaler ETG-Kongress 2019 - Das Gesamtsystem Im Fokus der Energiewende, Internationaler ETG-Kongress 2019, Esslingen am Neckar, Berlin: VDE Verlag, 8.- 9. Mai 2019, S. 159-164. ISBN 978-3-8007-4505-0

**Weber, B., Marseille, T., Kurrat, M.:**

Aktuelle Methoden zur Bestimmung von Oberflächentemperaturen an Vakuumschaltkontakten, VDE Fachbericht 75 Kontaktverhalten und Schalten, 25. Fachtagung Albert-Keil-Kontaktseminar, Karlsruhe, Berlin: VDE VERLAG GMBH, 9.-11. Oktober 2019, S. 135-143. ISBN 978-3-8007-5084-9

**Wussow, J., Modica, G., Engel, B.:**

Integration of Electric Vehicles in Extreme Suburban Grids with the Support of Extended Functionality of PV Storage Systems, E-Mobility Integration Symposium, Dublin, 14. Oktober 2019

**Wussow, J., Modica, G., Engel, B.:** Grid-Oriented Charging of Electric Vehicles as Approach for Increasing Penetration in Residential Areas, ETG Kongress, Esslingen am Neckar, 8.- 9. Mai 2019



Mechanische Verbindung zwischen Asynchron- und Synchronmaschine (Metallbalgkupplungen und Drehmomentsensor)

# Labore & Werkstätten

# 3

# Labore des elenia

Energiemanagementlabor	74
Netzdynamiklabor	76
Batterietest-Labore am elenia	80
Hochleistungs-DC-Prüffeld	82
Leistungsprüffeld	84
Blitzschutzlabor	86
Hochspannungshalle	88
Mechanische Werkstatt	90
Elektrotechnische Werkstatt	91

Die vielfältigen Forschungsbereiche des elenia spiegeln sich gleichermaßen in den modernen Laboren wider. Praktische Umsetzungsmöglichkeiten runden unsere Forschung ab. Ob elenia energy labs, Batterietest-Labor, Leistungsprüffeld oder Hochspannungshalle – jedes Labor bietet einen großen Mehrwert für unsere For-

schungs- und Dienstleistungsprojekte. Auch im Jahr 2019 wurden die Labore erweitert und weiterentwickelt, z. B. in Form von neuen Versuchsaufbauten oder einzelnen Komponenten. Auch unsere Werkstätten, mechanisch und elektrisch, leisten einen wichtigen Beitrag zur Funktionalität unserer Versuchsaufbauten und/oder Labore.



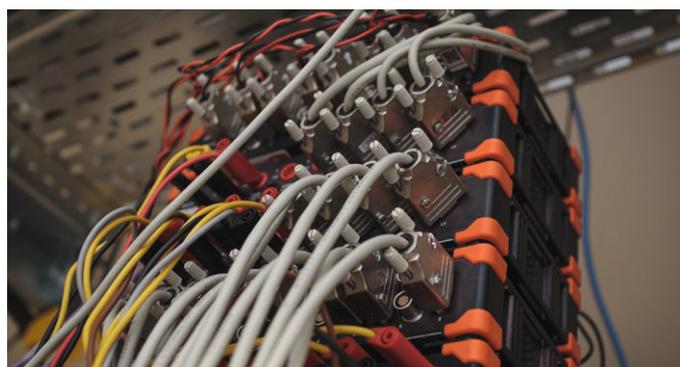
# Energiemanagementlabor

## Sektorkopplung durch effizientes Energiemanagement und intelligente Messsysteme

Das Energiemanagementlabor bietet einen 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 sowie ein Wärmepumpenteststand bestehend aus einer Luft-Wasser-Wärmepumpe, einer Klimakammer und einem Heizkreislauf zurückgegriffen werden. Zur Messung der auftretenden Ströme und Spannungen werden mehrkanalige Messsysteme der Firma DEWESoft verwendet. Durch die leistungs- und datentechnische Kopplungen des Energiemanagementlabors mit dem Netzdynamiklabor besteht zudem die Option von laborübergreifenden Messungen. Dies ermöglicht die Bearbeitung neuer Forschungsfragen und -projekte im Bereich der ganzheitlichen laborbasierten Forschung, wie beispielsweise die Auswirkungen eines Smart Building auf die Netzstabilität.

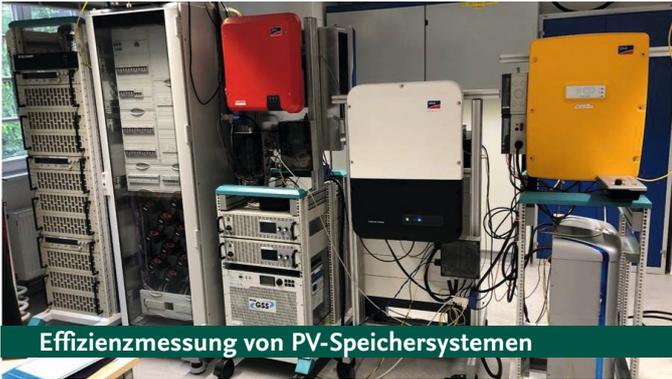
Für die zentrale Ansteuerung der elektronischen und thermischen Komponenten werden derzeit sämtliche Geräte in die am elenia entwickelte modulare Steuerungsumgebung ModSys-eelabs eingebunden. Der Anwender hat mit dieser Steuerungsumgebung die Möglichkeit, in wenigen Schritten ein Wohngebäude das seinen Anforderungen entspricht, nach dem Baukastenprinzip realitätsnah nachzubilden. Seit der Eröffnung des Labors Ende 2018 wurde bereits der Aufbau eines Prosumer-Demonstrators im Projekt NetProsum2030 realisiert und Untersuchungen zu verschiedenen Mobilitätskonzepten im Projekt EnEff Campus: blueMAP durchgeführt. Zukünftig sollen im Energiemanagementlabor die For-

schungsvorhaben flexess und MELANI bearbeitet werden. In dem 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 Messverfahren und Zählerkonzepte zur Mehrfachnutzung von PV-Heimspeichersystemen entwickelt. Die Laborumgebung des Energiemanagementlabors soll verwendet werden, um ein Abbild des entwickelten Konzepts zu evaluieren. 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 durch die erweiterte Laborumgebung. Darüber hinaus ermöglicht die umfangreiche Ausstattung des Energiemanagementlabors die Durchführung von Effizienzmessungen von PV-Speichersystemen nach Effizienzleitfaden und erweitert somit den Dienstleistungsbereich des Institutes.



DEWESoft Sirius DAQ Messsystem

# Übersicht - Laboreinrichtung



Effizienzmessung von PV-Speichersystemen



Ladesäule am Mühlenfordthaus



Heizlastemulation des Wärmepumpenteststandes

- Charakterisierung der Wirkungsgrade, des Standby-Verbrauchs, sowie der Regelungseffizienz von AC- und DC-gekoppelten Batteriespeichersystemen
- Automatisierte Ansteuerung der Systemkomponenten und Auswertung der Messergebnisse

## Simulation einer PV-Anlage

- Wechselrichter: „SUNNY TRIPOWER STP 20000TL-30“
- 2 DC-Quellen: „Elektro Automatik EA PSI 91000-30“ (je 10 kW)

## Nachbildung von Verbrauchern

- 3 AC-Lasten: „Höcherl & Hackl ZSACR“ (je 9,8 kW)

## Ladeinfrastruktur des elenia am Mühlenfordthaus

- » Zwei Mennekes AC-Wallboxen mit Ladeleistungen bis 22 kW
- » Multicharger (CCS Typ 2- und CHAdeMO-Anschluss) für DC-Laden bis 22 kW
- Physikalische Kopplung der Ladeinfrastruktur mit dem Energiemanagementlabor möglich
- Zur IT-Einbindung wird das im Projekt Fleets-Go-Green entwickelte Lademanagementsystems elias verwendet
- Forschung im Bereich erzeugungsorientiertes Laden und netzorientiertes Laden

- Hardware-in-the-Loop-Wärmelastemulation im Zusammenspiel mit der Gebäudesoftware TRNSYS zur Emulation der Heiz- und Kühllast von Gebäuden
- Klimakammer mit Temperaturbereich von  $-5^{\circ}\text{C}$  bis  $35^{\circ}\text{C}$  optionale Beeinflussung der Luftfeuchtigkeit
- Trinkwarmwasseremulation durch Vorgabe von Zapfprofilen
- Durch die Einbettung in ein institutseigenes Energiemanagementsystem sind Untersuchungen unterschiedlicher Betriebsweisen von Luft-Wasser-Wärmepumpen möglich, hierzu zählen die temperaturgeführte, eigenverbrauchsoptimierte und netzdienliche Betriebsweise

## Übersicht - Dienstleistungen

Durchführung von Speichereffizienzmessung

Erprobung von Steuerungsverfahren und Kommunikationsprotokollen

Kombinierte Versuche mit Hardwaregeräten, Simulationsmodellen und Steuerungssystemen mit einer modularen Steuerungsumgebung (HiL)

Energie- und Leistungsmessung

Modulare Steuerungsumgebung ModSys-eelabs

Steuerungs- und Auswertungstools für Speichereffizienz-Messungen

Messungen bei definierter, konstanter Temperatur und Luftfeuchtigkeit

## Kontakt

Frank Soyck  
+49 531 391-7739  
f.soyck@tu-braunschweig.de

Frederik Tiedt  
+49 531 391-9799  
f.tiedt@tu-braunschweig.de

Mattias Hadlak  
+49 531 391-9799  
m.hadlak@tu-braunschweig.de

Gian-Luca Di Modica  
+49 531 391 7704  
g.di-modica@tu-braunschweig.de

Stefanie Čelan  
+49 531 391-9727  
s.celan@tu-braunschweig.de





# Netzdynamiklabor

## Netzstabilität in Zeiten umrichterdominierter 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. Ein 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 Ener-

gieversorgungsanlagen 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

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



Ladesäule der PION AG im 7-stündigen 44kW-Dauerbelastungstest

### Neues aus dem Labor - Gekoppelter Maschinensatz

Die zentrale Frage unseres Energieversorgungssystems der nächsten Jahre wird der stabile Übergang auf eine CO<sub>2</sub>-neutrale Stromversorgung sein. Technisch bedeutet dies den Übergang von einem primär durch Synchrongeneratoren von fossilen Kraftwerken definierten Netz hin zu einer durch die Umrichter von regenerativen Anlagen betriebenen Netzstruktur. Hiermit ändert sich in vielen Punkten das grundsätzliche Verhalten der Energieversorgungsinfrastruktur. Grund genug, um diesen Übergang im Labor zu erproben. Zu diesem Zweck bietet das Netzintegrationslabor einen gekoppelten Maschinensatz, um Untersuchungen im Netzparallelbetrieb von Umrichtern und Synchronmaschine unter Laborbedingungen zu testen.

Aktuell wird der Maschinensatz im Labor installiert und ersten Testläufen unterzogen. Das eigens angefertigte Konzept zum Schutz von Personen und Hardware, die Ansteuerung der Maschine sowie die Koordination verschiedener am Betrieb beteiligter Komponenten ermöglicht einen sicheren Laborbetrieb für alle künftigen Versuche. So umfasst der aktuelle Versuchs-

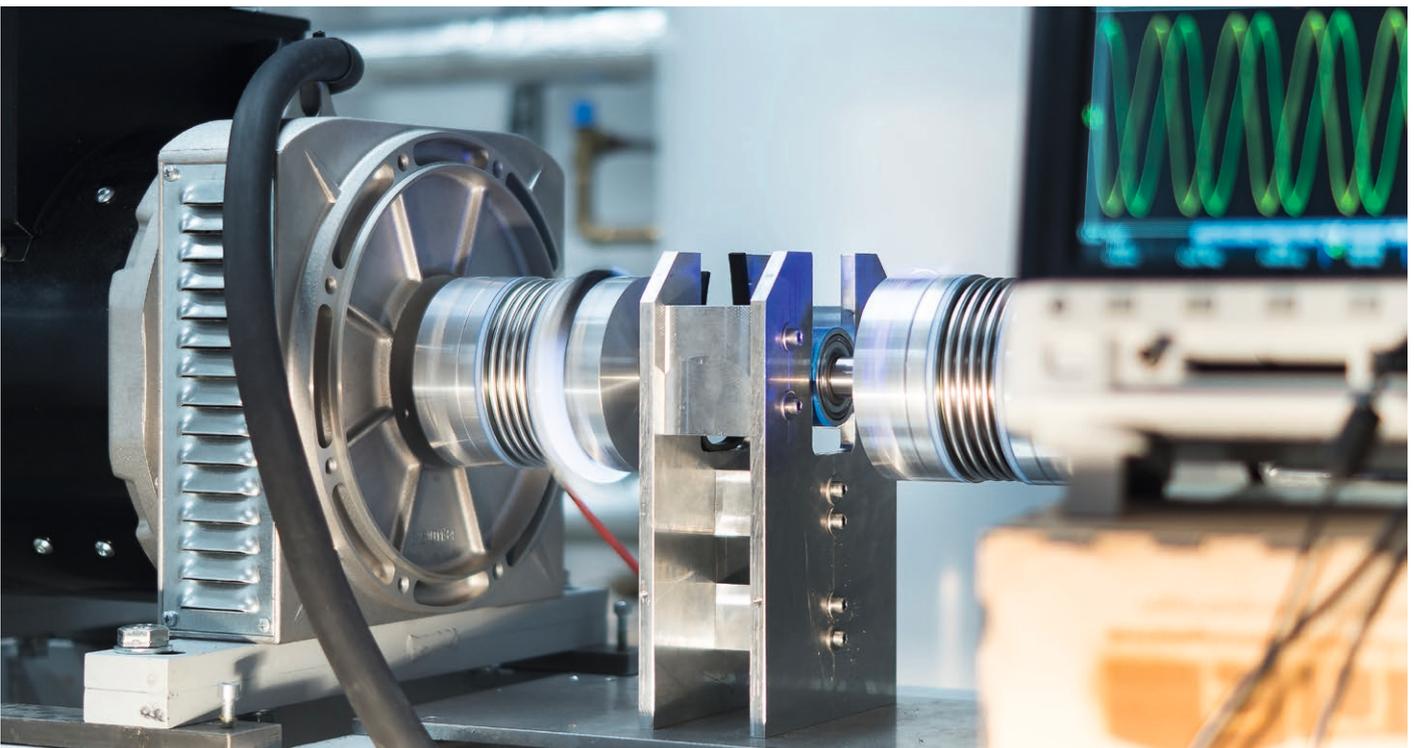
fokus die Reaktion von Netzkomponenten auf schnelle, meist durch Fehler hervorgerufene Sprünge der Netzphase und – amplitude. In diesen tendieren Maschinen dazu, zu pendeln, sind aber in der Lage, das Netz durch Abgabe kurzzeitiger hoher Überströme zu stabilisieren. Umrichter können flexibler agieren, sind aber im Überstrom stark begrenzt. Können sich diese Systeme im Übergang ergänzen? Wie lässt sich das Netz mit verschiedenen Durchdringungsgraden von Umrichtern und Maschinen stabil betreiben? Wie gilt es, Umrichterregelungen hierfür auszulegen? Das Netzdynamiklabor lädt zur Untersuchung dieser Fragestellungen ein.



Rechenstarker OPAL Echtzeitsimulator

### Neues aus dem Labor – 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 Bedingungen 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.



Gekoppelter Maschinensatz im Testbetrieb nach Ausrichtung und Kalibrierung des Wellenflansches

Zu diesem Zweck wurde das Labor um einen rechenstarken Echtzeitsimulator ergänzt. Der Echtzeitsimulator ermöglicht es, hybride Anwendungsfälle aus Simulation und Hardware in 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 Simulator statt. Geräte und Simulationsmodell arbeiten dabei parallel und in Echtzeit zusammen. Ursachen für Abweichungen zwischen Simulation und Laborversuch können so besser und kleinschrittiger isoliert und gefunden werden. Im Gegensatz zum Labor ermöglicht ein Simulator 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 Mausclick ändern. Fehlerfälle in spannungsführenden Elementen können in Simulationen abgebildet werden, ein Vorteil für die Personensicherheit und den Geräteschutz.

### 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, aber 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.



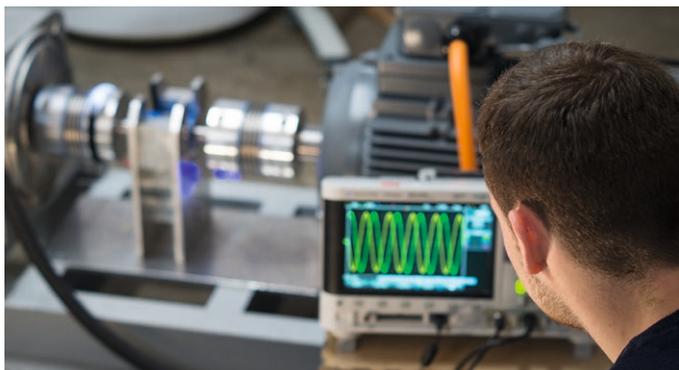
Leitungsnachbildende Elemente entsprechen bis zu 1,8 km Niederspannungskabel

### Fakten & Zahlen zum Netzdynamlabor

Verschiedenste 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 einstellbaren Widerständen 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.

Einige Kernelemente und Versuchskomponenten, welche die zentralen Kernpunkte des Labors definieren, sind im Folgenden zu finden:



Vielfältige Arbeits- und Lernbereiche im Labor

# Übersicht - Laboreinrichtung



Netzsimulator AMETEK MX-45

**Voll rückspeisefähiger Netzsimulator zur Nachbildung verschiedener Netzzustände mit variablen Netzparametern**

- 45 kVA Anschlussleistung
- Spannungen bis 300 VRMS und 400VDC
- Ströme bis 50 ARMS
- Frequenzbereich 16-800 Hz
- 4-adriger Anschluss (Unsymmetrische Belastung)
- Integriertes Messsystem
- Analoge Schnittstellen zur präzisen Ansteuerung einzelner Phasen



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 wie MODBUS, EtherNet, EtherCAT, CAN, TimeStamp, GOOSE, etc.
- FPGA-Technik zur schnelleren Befehlsverarbeitung



TRIPHASE – Voll programmierbare Umrichter

**Frei programmierbare Vollumrichter zur Implementierung und Untersuchung eigener Regelungsmodelle**

- Zwei Vollumrichter mit jeweils 15 kVA Nennleistung
- 1x 3-adriger Anschluss, gekoppelter Gleich- und Umrichter, als Batteriesimulator verwendbar
- 1x 4-adriger Anschluss, unsymmetrischer Betrieb, Nullsystemeinprägung



30 kW gekoppelter Maschinensatz

**Gekoppelter Maschinensatz, bestehend aus Asynchron- und Synchronmaschine mit frei parametrierbarem Umrichter**

- 30 kW Anschlussleistung bei 1500 rpm nominaler Drehzahl und 150 Nm Nenndrehmoment
- Synchronisierungseinheit zur Anbindung von externen Quellen an den Maschinensatzverbund
- Generatorischer und motorischer Betrieb möglich

## Übersicht - Dienstleistungen

Verhalten von Komponenten auf Frequenz- und Spannungsänderungen  
 Überstrombegrenzung und Kurzschlussverhalten dezentraler Erzeugungsanlagen  
 Verhalten 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 von Regelungen zur Bereitstellung von systemstützenden Eigenschaften  
 Untersuchungen zu rONT mittels eigenem Simulationsmodell

## Kontakt

Björn Oliver Winter  
 bjoern.winter@tu-bs.de

Florian Rauscher  
 f.rauscher@tu-braunschweig.de

Frederik Tiedt  
 f.tiedt@tu-braunschweig.de





# Batterietest-Labore am elenia

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

Die Batterietechnik rückt aufgrund des zunehmenden Bedarfs an elektrischen Energiespeichern sowohl für mobile als auch für stationäre Anwendungen immer weiter in den Fokus aktueller Forschungsvorhaben. Insbesondere Lithium-Ionen-Batterien zählen wegen ihrer vergleichsweise hohen Energie- und Leistungsdichten, ihrem hohen Wirkungsgrad und ihrer Langzeitstabilität zu den relevantesten Batterietechnologien. Dennoch besteht noch immer ein weitreichendes Entwicklungspotential, um die anspruchsvollen Anforderungen der verschiedenen Anwendungen erfüllen zu können. Das elenia besitzt Batterietesteinrichtungen an vier Standorten (BLB, InES, BatLab, PTB), die sich hinsichtlich ihrer Forschungsschwerpunkte unterscheiden. An der BLB und dem InES erfolgen schwerpunktmäßig Untersuchungen auf Zellebene, wobei sowohl eigens in der BLB gefertigte als auch kommerzielle Zellen genutzt werden. Aktuelle Forschungstätigkeiten beschäftigen sich u.a. mit dem Einfluss der Formierung auf die Zellperformance, der elektrischen und elektrochemischen Charakterisierung zur Qualitätsbewertung und der Langzeitzyklisierung zur Identifikation von Alterungsmechanismen. Am BatLab und der 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 SecondLife Anwendungen.

Für die unterschiedlichen Untersuchungen stehen an den vier Standorten eine Vielzahl an Gerätschaften zum Testen der Batterien zur Verfügung. Um konstante Umgebungsbedingungen während der Tests zu garantieren, stehen Temperaturprüfkammern mit einem großen Temperaturbereich bereit. 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 Gefahreneinstufung bei Batteriefehlern entsprechend EU CAR kann damit bis Hazard Level (HZ) 5 getestet werden.

Mit den Batterietestsystemen können Lithium-Ionen-Batterien mit verschiedenen Strom- und Spannungsprofilen belastet werden, um die elektrischen Eigenschaften zu charakterisieren. So werden einerseits Kapazitätstests bei konstanter Strombelastung durchgeführt, um die energetischen Eigenschaften zu bestimmen. Andererseits sind Stromraten- und Innenwiderstandstests möglich, um die elektrische Leistungsfähigkeit zu beurteilen. Durch periodische Lade- und Entladezyklen sowie Erfassung der sinkenden zur Verfügung stehenden Kapazität und dem Anstieg des Innenwiderstands werden die zyklischen Alterungserscheinungen abgeleitet. 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 Sicherheitsschränken 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, welches es erlauben das elektrische Verhalten der Batterie simulativ abzuleiten. Durch den Einsatz der Temperaturprüfkammern können Batteriemodelle in Abhängigkeit von der zulässigen Einsatztemperatur von  $-30^{\circ}\text{C}$  bis  $+60^{\circ}\text{C}$  parametrieren. Mithilfe von elektro-thermisch parametrierten Batteriemodellen kann der Einsatz der getesteten Batteriezellen für verschiedene Einsatzgebiete und Anwendungen überprüft werden.

# Übersicht - Laboreinrichtung



Temperaturprüfschränke der Fa. Binder

## Temperaturprüfschränke der Fa. Binder

- 6 x KB 420/S\*, KB 700/S\*
  - » Prüfvolumen 6 x 420 l und 2 x 700 l
  - » -5 °C bis 100 °C
- MK 240/S\*
  - » Prüfvolumen 240 l
  - » -40 °C bis 180 °C

## Temperaturprüfschränke der Fa. Weiss

- Prüfvolumen 600 l
- -40 °C bis 180 °C

## Temperaturprüfschränke der Fa. Vötsch

- Prüfvolumen 34 l
- -20 °C bis 80 °C

**S\*** inkl. Schranklöschanlage, Abluft und Havariefilter



Batterietester - XCTS Serie der Fa. Basytec

## Zelltester der Fa. BaSyTeC

- 48 Kanäle  $\pm 50$  A, 0-6 V, parallelschaltbar
- 48 Kanäle  $\pm 25$  A, 0-6 V, parallelschaltbar
- 52 Kanäle  $\pm 20$  A, 0-6 V, parallelschaltbar
- 90 Kanäle  $\pm 5$  A, 0-6 V, parallelschaltbar
- 3 Kanäle  $\pm 30$  A, 0-150 V, parallelschaltbar

## Zell- und Modultester der Fa. Digatron und der Fa. Fuelcon

- 6 Kanäle  $\pm 100$  A, 0-6 V
- 3 Kanäle  $\pm 30$  A, 5-150 V, parallelschaltbar

## Systemtester der Fa. Greenlight

- 1 Kanal  $\pm 600$  A, 5-200 V

## Impedanzspektroskopie der Fa. Ametek und der Fa. Gamry Instruments

- 2 Kanäle  $\pm 20$  A, 0-10 V, 10  $\mu$ Hz – 1 MHz
- 24-fach Multiplexer  $\pm 3$  A, 0-32 V, 10  $\mu$ Hz – 1 MHz

## Übersicht - Dienstleistungen

Formierung von Batteriezellen

Sicherheits- und Performancetests

Untersuchungen von Lithium-Ionen-Batterien auf Zell- und Modulebene

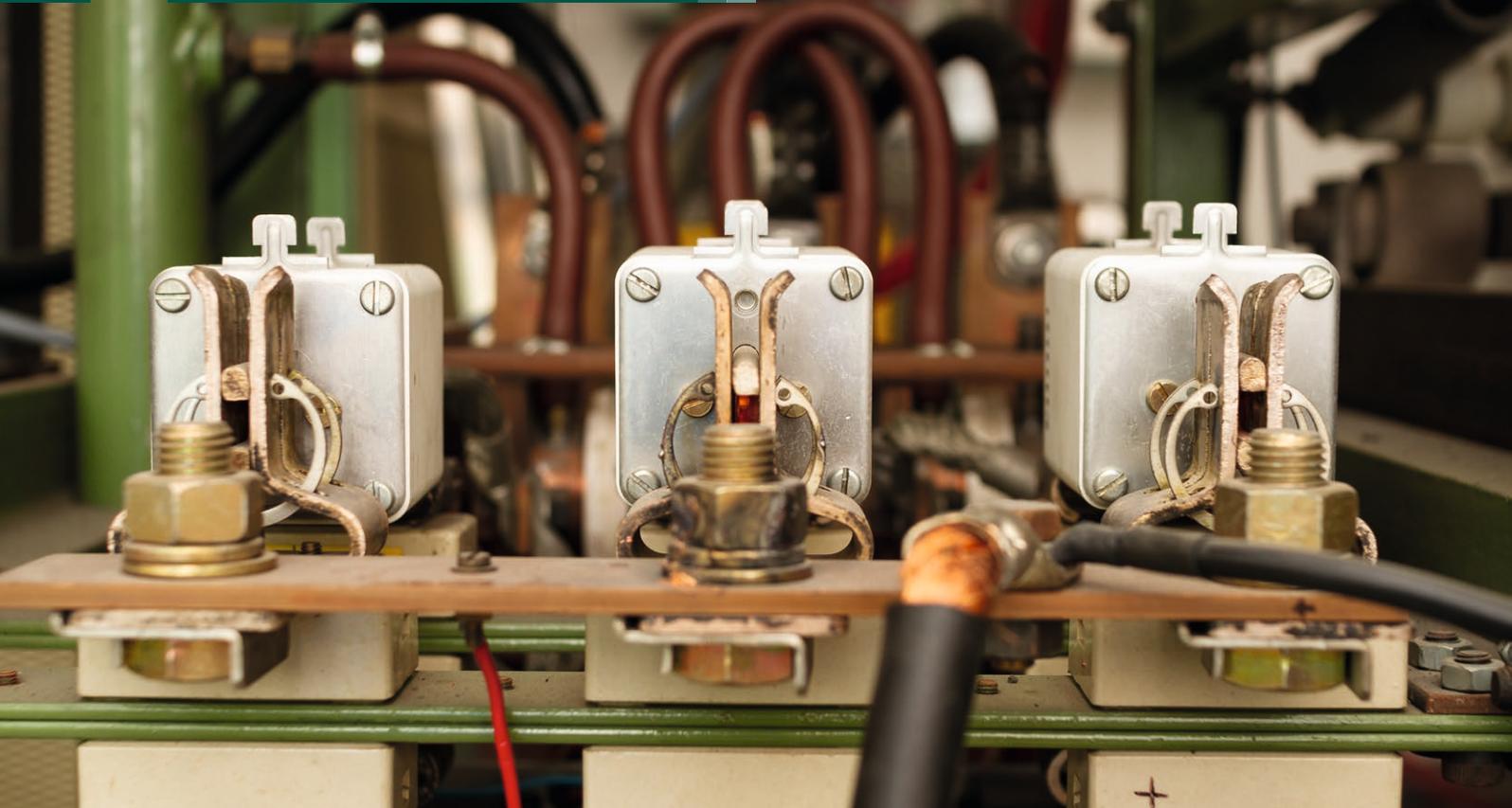
- Elektrische Charakterisierung mittels entsprechender Analyseverfahren
- Alterungsuntersuchungen
- Modellierung

## Kontakt

Louisa Hoffmann  
+49 (0) 531 391 7742  
louisa.hoffmann@tu-bs.de



Robin Drees  
+49 (0) 531 391 9730  
r.drees@tu-braunschweig.de



# Hochleistungs-DC-Prüffeld

Speisung mehrerer Transformatoren aus dem 6 kV-Netz zur Erzeugung von Gleichspannung über eine aktive Gleichrichterschaltung

## Einführung

Das Hochleistungs-DC-Prüffeld ist schon seit vielen Jahrzehnten Bestandteil des Laborportfolios des elenia. In der jüngeren Vergangenheit hat die Nutzung der Laborräumlichkeiten wieder zugenommen. Die Dekarbonisierung der Energieerzeugung und der daraus folgende Forschungsschwerpunkt DC-Systeme, welche auch die DC-Schaltgeräte beinhaltet, ist der wesentliche Grund für die Entwicklung. Die Entwicklung spiegelt sich durch die dauerhafte Nutzung der Räumlichkeiten durch Forschungsprojekte wieder, als auch durch Industrieprojekte und Dienstleistungskuraufträge.

## Aufbau und Komponenten

Das Hochleistungs-DC-Prüffeld bietet ein breites Prüfspektrum zur Untersuchung von DC-Schaltgeräten. Die Leistungsdaten und die detaillierte Beschreibung der Laborkomponenten sind der nachstehenden Tabelle zu entnehmen. In der näheren Vergangenheit wurden verschiedenste Topologien von DC-Schaltgeräten, z.B. mechanische Schaltgeräte mit verschiedenen Löschmechanismen, als auch Hybridschalter, mit dem vorhanden Prüfaufbau untersucht. Die hohe Anzahl und Diversität der Schaltgeräte ist auf die Vielzahl von einstellbaren Prüfparametern zurückzuführen. Neben der Spannung und dem Strom, kann mittels der Lastimpedanz die Zeitkonstante eingestellt werden. Die Reproduzierbarkeit und die Verlässlichkeit der Messergebnisse ist durch die Ablaufsteuerung gegeben. Mittels der Ablaufsteuerung kann der Ausschaltzeitpunkt definiert und über die Messreihe konstant gehalten werden. Durch neuste Messtechnik können auch Schaltvorgänge

mit Leistungshalbleitern zuverlässig untersucht werden. Die Messdatenübertragung erfolgt über Lichtwellenleiter.

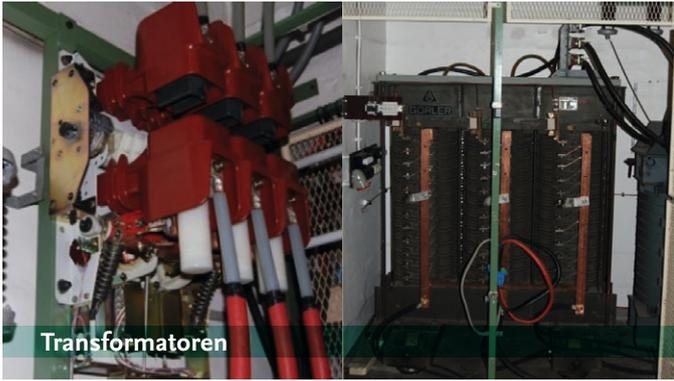
## Prüfungen

Die durchgeführten Untersuchungen und Versuchsauswertungen besitzen einen unterschiedlichen Umfang. Dieser reicht von einfachen Untersuchungen zur Bestimmung des Schaltvermögens, bis zur Untersuchung von Plasmavorgängen bei verschiedenen Prüfbelastungen. Die standardmäßige statistische Auswertung, wird meist durch Untersuchungen von festgestellten oder erwarteten Vorgängen ergänzt.

## Ausblick

Zukünftig können in einem neuen DC-Prüffeld höhere Spannungen und Ströme erzeugt werden. Das Prüffeld in seiner jetzigen Bauform ist schon eine Seltenheit, doch mit dem neuen Prüffeld erlangt das elenia ein Alleinstellungsmerkmal. Neben den einzelnen Schalterprüfungen wird das zukünftige Spektrum durch ein mehrstufiges DC-Demonstrationsnetz erweitert. Mit diesem können Auswirkungen der Netzdynamik auf das Schaltverhalten und verschiedene Schutzalgorithmen untersucht werden.

# Übersicht - Laboreinrichtung



Transformatoren

- Anschluss des Prüffeldes direkt an das 6 kV-Verteilnetz der Uni
- Schublasttrenner mit Erder vor Transformatoren
- Transformator 1: 500 kVA, 6kV/4\*50V
- Transformator 2: 400 kVA, 200V/12\*20V
- Hinter Transformatoren Sicherheitsschalter und Draufschalter zum Starten und Stoppen der Untersuchungen
- Aktuell noch ein weiterer Transformatorsatz im Labor
- Im Laufe des Projektes SMS II wird ein DC-Demonstrationsnetz, welches verschiedene Spannungsebenen bedient (3 kV, 1 kV, 380 V) aufgebaut



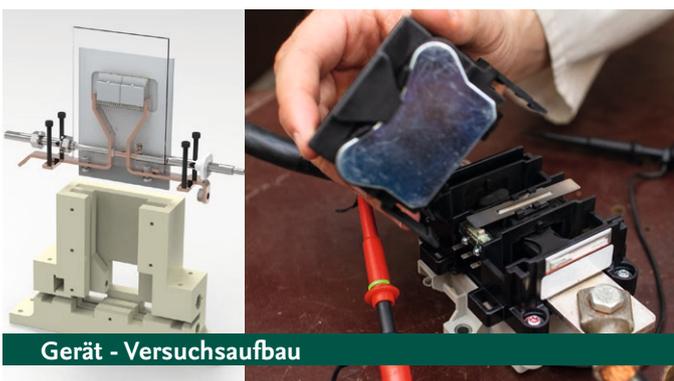
Gleichrichter

- Erzeugung von Gleichstrom aus Wechselstrom über eine aktive B6-Brückengleichrichterschaltung
- Thyristorbasierter Gleichrichter mit Schmelzsicherungen als Reserveschutz
- Max. DC-Prüfspannung: 560 V
- Max. DC-Prüfstrom: 5 kA
- Zündwinkeleinstellung
- Variable Prüfdauer durch digitale Ablaufsteuerung



Messgeräte (Kamera + HBN Transientenrekorder)

- Die Erfassung elektrischer wie auch optischer Messdaten während der Untersuchungen ist möglich
- Transientenrekorder HBM Genzi/GenzT-2:
- 16 Messkanäle (isoliert, BNC und LWL)
- 12 Bit Auflösung
- 1 MS/s bzw. 25 MS/s Abtastrate
- Hochgeschwindigkeitskamera Redlake MotionPro X4:
  - » Auflösung 512 x 512 Pixel
  - » Schwarz-Weiß oder Farbaufnahmen
  - » Max. Bildfrequenz von 200 kHz
  - » Min. Belichtungszeit 1 µs



Gerät - Versuchsaufbau

## Breites Spektrum an Themen kann behandelt werden:

- Entwicklung, Optimierung und Schaltversuche mit Gleichstrom- und Hybridschalter, Schaltgerätekoordination, HV-Bordnetz und Automotivschaltgeräte, Untersuchung des Abbrandverhaltens von Kunststoffen durch Schaltlichtbögen, ...
- Das Demonstrationsnetz aus SMS II soll eine umfangreiche Untersuchung der Vorgänge in DC-Verteilnetzen und von neuartigen Schutzkonzepten für diese ermöglichen

## Übersicht - Dienstleistungen

Entwicklung und Optimierung von Gleichstromschaltern und Hybridschaltgeräten  
 Untersuchung der Schalteigenschaften kommerziell erhältlicher DC-Schaltgeräte  
 Untersuchung von DC-Netztopologien  
 Entwicklung eines neuartigen DC-Schutzsystems  
 Abbrandverhalten von Kunststoffen anhand thermischer Lichtbogenbelastung

## Kontakt

Lars Claaßen  
 +49 531 391-9715  
 l.claassen@tu-braunschweig.de



Frederik Anspach  
 +49 531 391-9736  
 f.anspach@tu-braunschweig.de



# Leistungsprüffeld

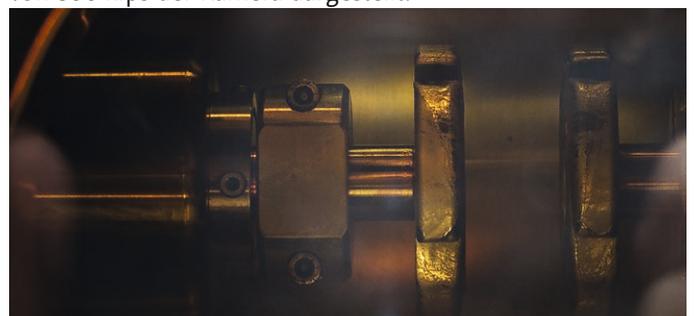
## Synthetische Erzeugung von Prüfbedingungen für Leistungsschalter der Mittel- und Hochspannungsebene

Das synthetische Prüffeld des Instituts dient der Erforschung der Vakuumleistungsschalter für die Hochspannungsebene. Dafür werden Ausschaltversuche durchgeführt die das Ausschaltverhalten von Vakuumleistungsschalter charakterisiert. Zur Etablierung des Vakuumleistungsschalters auf die Hochspannungsebene werden zwei Vakuumschaltkammern in Reihe verschaltet, um die geforderte Spannungsbefestigung zu erreichen. Dafür wurde ein spezieller Vakuumrezipient konstruiert, der variable Kontakthübe ermöglicht. An diesem Vakuumschalter 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 eine Netzfehler ausgelöst werden 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 Hochspannungs-Kondensatorbank 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 137 kV. Die restlichen Elemente des Hochspannungskreises sind modular aufgebaut, wodurch unterschiedliche Spannungsteilheiten und Frequenzen erzeugt werden. Die Frequenz der Einschwingspannung liegt zwischen 5 und 10 kHz, das den Frequenzen in der Mittel- und Hochspannungsebene während des Fehlerfalls entspricht und sogar darüber hinaus, 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 Schaltkontaktstückgeometrien, 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 x 1024) und einer maximalen Bildfrequenz von 800 kfps der Kamera dargestellt.



# Übersicht - Laboreinrichtung



Hochstrom-Kondensatorbank

## Erzeugung eines Hochstroms zur Belastung von Leistungsschaltern

- Max. Ladespannung 3 kV
- Max. Strom 63 kA(RMS)
- Kreisfrequenz 35 Hz / 50 Hz
- Energie 500 kJ



Hochspannungs-Kondensatorbank

## Erzeugung einer Hochspannung zur Prüfung der Wieder- verfestigung der Schaltstrecke

- Max. 137 kV TRV
- TRV-Frequenz 5 bis 10 kHz
- Energie 9,8 kJ



Vakuum-Versuchsschalter

## Untersuchung der Plasmaphänomene zwischen Schaltkontakten möglich

- Spezieller Vakuumrezipient
- Vakuumpumpe ( $p < 10^{-7}$  hPa)
- Variabler Hub bis 40 mm
- Reihenschaltung von zwei Leistungsschaltern möglich



High-Speed Kamera

## Zur Visuellen Untersuchung der Lichtbögen steht eine High-Speed Kamera zur Verfügung

### Nova S6 von Photron

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

## Übersicht - Dienstleistungen

### Leistungsprüfung

- Prüfung von Leistungsschaltern bis UN=72,5 kV
- Kurzschlussprüfung 1-phasig

### Kontaktgeometrieuntersuchung

- Untersuchung neuartiger Kontaktgeometrien

### Thermografieuntersuchung

- Untersuchung von Oberflächentemperaturen bei verschiedenen Materialien

## Kontakt

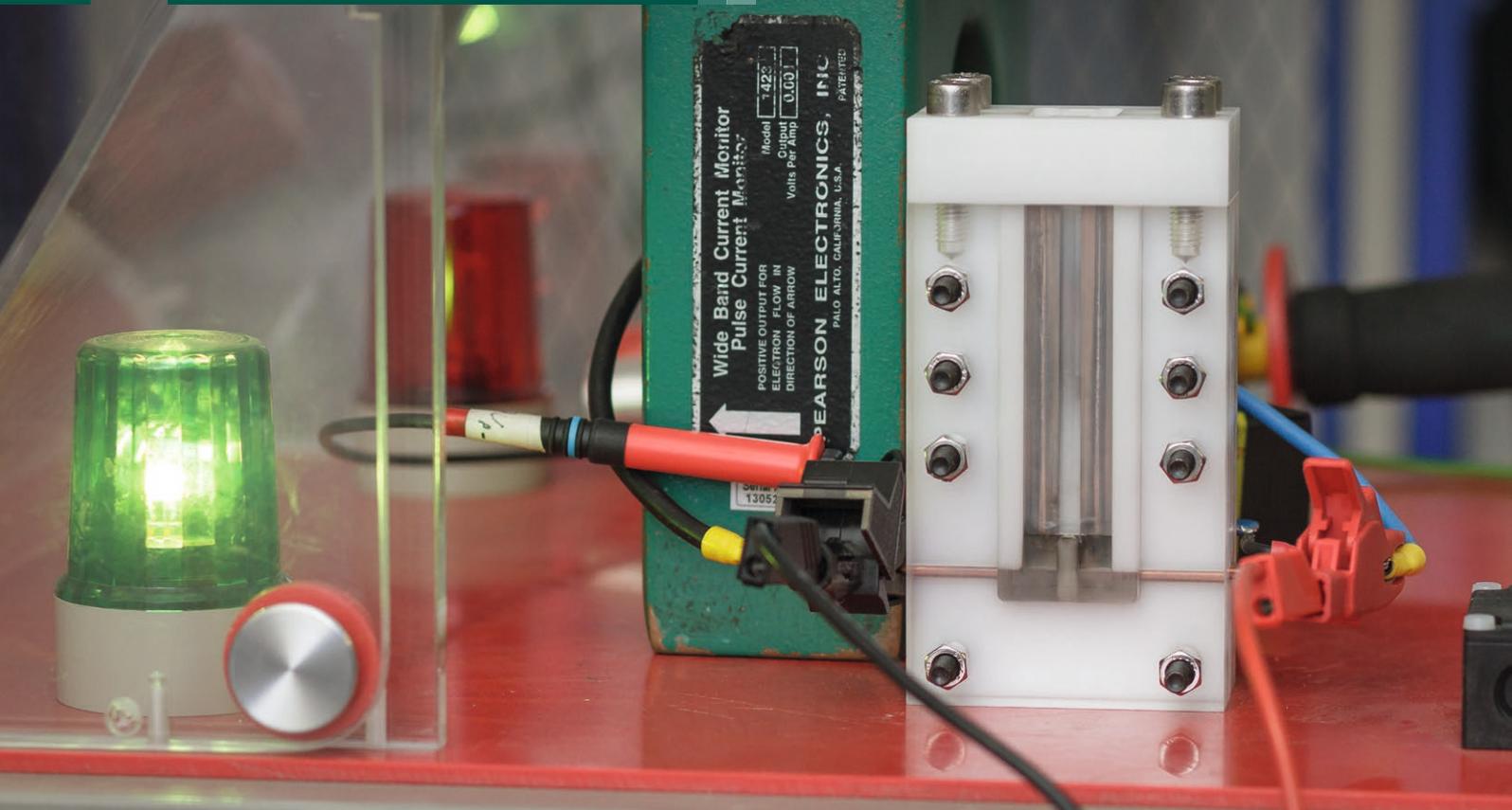
Benjamin Weber  
benjamin.weber@tu-bs.de



Benjamin Kühn  
b.kuehn@tu-braunschweig.de

Timo Meyer  
Timo.meyer@tu-braunschweig.de





# Blitzschutzlabor

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

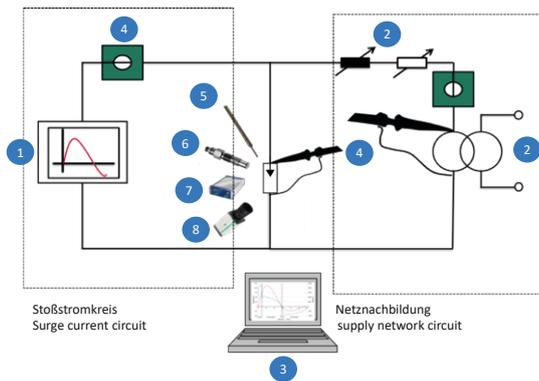
**Blitzstromableiter** (Typ 1 Ableiter) werden als Grobschutz kategorisiert und sorgen für den sicheren Betrieb von elektrischen und elektronischen Geräten. Sie begrenzen auftretenden Überspannungen, die infolge eines Blitzeinschlages oder Schalthandlungen im Netz entstehen. Bei auf Funkenstreckentechnologie basierenden Blitzstromableitern wird bei einer charakteristischen Überspannung ein Plasma zwischen zwei Elektroden gezündet. Dieses stellt einen Kurzschluss zur Erdungsanlage her, wodurch ein Potentialausgleich geschaffen wird und hohe Energien abgeleitet werden können. Die Anforderungen an moderne Blitzstromableiter umfassen ein hohes Ausschaltvermögen, neben dem eigentlichen Ableitvorgang und dem damit verbundenen hohen Energieabsorptionsvermögen. 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.

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 parallelgeschaltet 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.

Der Stoßstrom wird mit Hilfe eines Stoßstromgenerators erzeugt (1). Es können 8/20  $\mu$ s Impulse mit bis zu 25 kA aber auch 10/350  $\mu$ 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 fünf Messsonden mit einer Amplitudenauflösung von 14-bit bei einer Samplingrate von 100 MS/s zur Verfügung. Die Messsonden sind über Lichtwellenleiter potentialgetrennt an das Messsystem angeschlossen (3). Weiterhin stehen zusätzliche Messeinrichtungen zur Verfügung wie Pearsonsonde, Hochspannungstastköpfe (4), Potentialsonden (5), Drucksensoren (6), Spektrometer (7) und High-Speed-Kameras (8).

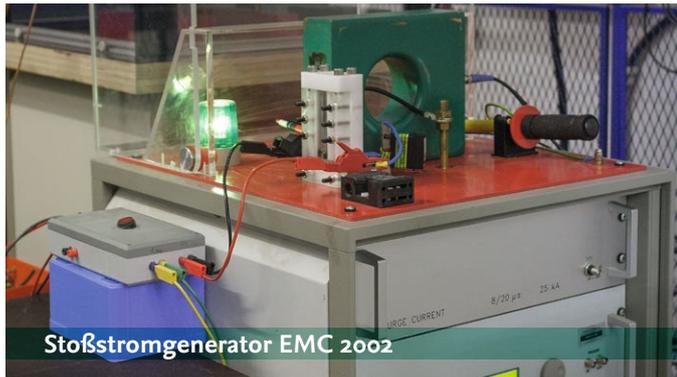
**Das aktuelle Ziel der Forschung** ist, die Plasmaeigenschaften nach der Stoßstrombelastung im Übergang zum Netzfolgestrom zu untersuchen. Mithilfe der in Abbildung 1 beschriebenen Messtechnik finden experimentelle Untersuchungen statt. Daraus resultieren Modelle, die wiederum mit Simulationen validiert werden. Aus den gewonnenen Erkenntnissen lassen sich Druck, Temperatur und Leitfähigkeit des Plasmas in hoch dynamischen Bereichen bestimmen und das Plasmaverhalten beschreiben. Die Forschung ermöglicht es die Funkenstreckenableiter zu charakterisieren und damit eine zielgerichtete Entwicklung des Überspannungsschutzes zu gewährleisten.

# Übersicht - Laboreinrichtung



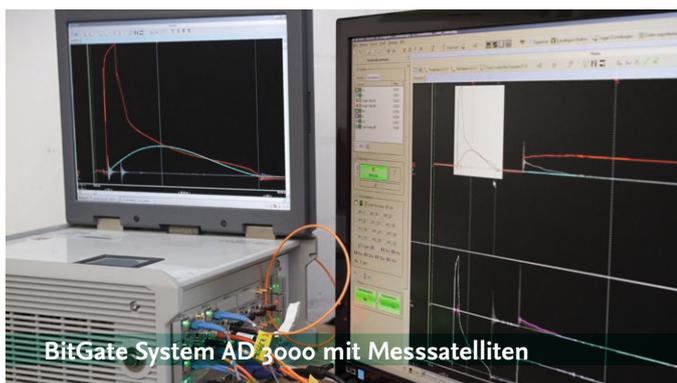
## Versuchsfeld zur Bestimmung der Plasmavorgänge

1. Stoßstromgenerator EMC 2002
2. Niederspannungsnetz bis 750 VAC mit einstellbarer Netzimpedanz ( $\cos \varphi$ )
3. BitGate System
4. Spannungs- und Strommessung
5. Leitfähigkeit über Potentialsonden
6. Druckmessung
7. Spektroskopie
8. Hochgeschwindigkeits-Kamera



## Stoßstromgenerator zur Untersuchung von Funkenstrecken mit bis zu 25 kA

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



## Hochauflösendes Messsystem zur simultanen Aufnahme der elektrischen Größen

- 5 Messkanäle
- 14 Bit Auflösung
- Samplingrate bis zu 100 MS/s
- Signalübertragung mittels Lichtwellenleitern



## Hochgeschwindigkeitskamera zur Analyse der Plasmaverteilung

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

## Übersicht - Dienstleistungen

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)

Variable Einstellung von  $\cos \varphi$  (induktiv)

Verschiedene Netzsynchrisationswinkel, Triggerung des Stoßstromes auf 1° Genauigkeit

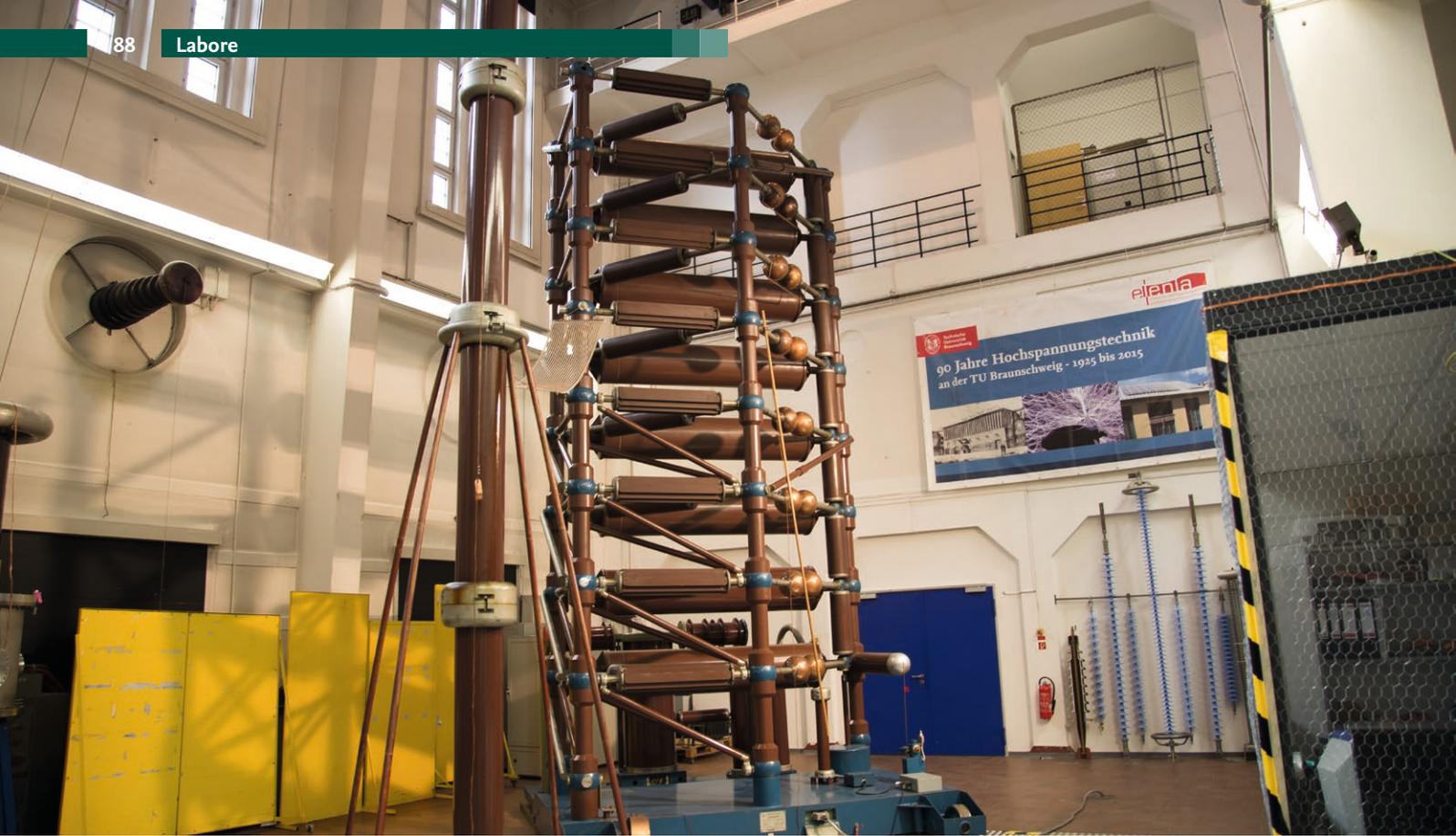
Diagnose von hochdynamischen Plasmaeigenschaften (Druck, Temperatur und Leitfähigkeit)

## Kontakt

Enno Peters  
+49 531 391-7701  
e.peters@tu-braunschweig.de

Tobias Kopp  
+49 531 391-9729  
t.kopp@tu-braunschweig.de





# Hochspannungshalle

## Hochspannende Prüfmöglichkeiten für Komponenten der Nieder-, Mittel- und Hochspannungstechnik

Die Hochspannungshalle des Institutes gliedert sich in drei Bereiche. Das ist das große Prüffeld mit zwei Systemen zur Hochspannungserzeugung, Wechselspannungen und Blitzstoßspannungen, das kleine Prüffeld in dem ein neues Prüffeld für Leistungsuntersuchungen aufgebaut wird, und die elektrisch geschirmte Teilentladungsmesskabine. Das große Prüffeld bietet vielfältige Möglichkeiten für Untersuchungen, unter anderem auch durch die Verwendung der Greinacher-Kaskade welche aus einer eingangsseitigen Wechselspannung eine Gleichspannung erzeugt, womit drei Spannungsformen im großen Prüffeld erzeugt werden können. Die dabei erreichbaren Spannungsamplituden sind für Wechsel- und Gleichspannung bis zu 800 kV, bei Blitzstoßspannung bis zu 2 MV. Zusätzlich können vielfältige Schaltungen im Spannungsbe- reich bis etwa 300 kV über die ebenfalls vorhandenen Baukastensysteme aufgebaut werden. Neben der Erzeugung 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 auch potentialfrei übertragen und so die Sicherheit des Personals gewährleistet werden.

Neben der Erzeugung und der Messung wird aber für korrekte Untersuchungen auch der passende Versuchsaufbau 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  $\dot{U} = 200 \text{ kV}$  bei Temperaturen von  $-190 \text{ °C}$  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 10-5 mbar durchgeführt werden. Aktuelle Untersuchungen an diesem Prüfgefäß dienen der Erfassung von Röntgenstrahlung 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.

Im dritten Bereich, dem kleinen Prüffeld wird ein Hochleistungsgleichstromprüffeld aufgebaut. Nach Fertigstellung sollen dort Untersuchungen mit einer Prüfspannung von maximal 12 kV (Gleichspannung) bei maximal 30 kA möglich sein. Details dazu im Bericht „[Universal Power Switch](#)“.

# Übersicht - Laboreinrichtung



Stoßspannungsgenerator

## Voll rückspeisefähiger Netzsimulator zur Nachbildung verschiedener Netzzustände mit variablen Netzparametern

- Links: Stoßspannungsgenerator für Blitzstoßspannungen mit 400 kV / 50 kJ (bis 2 MV möglich)
- Ganz rechts: Belastungskapazität und Widerstände einstellbar für normgerechte 1,2/50 Impulse
- Rechts: Gedämpft kapazitiver Teiler bis 2 MV



Wechselspannungstransformator

## Echtzeitsimulator mit hoher Rechenleistung für Power-Hardware-In-The-Loop Anwendungen und verzögerungsfreie Laboransteuerung

- Mittig: 50 Hz-Wechselspannungstransformator bis 400 kV / 400 kVA (bis 800 kV möglich)
- Mittig: Verschiedene Baukastenkomponenten bestehend aus Kapazitäten, Widerständen und Dioden
- Links: Pressgaskondensator für Spannungsmessung
- Rechts: Kryostat bis  $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$  und ca. 200 kV bis 3 bar Absolut-Druck



Greinacher-Kaskade und Vakuumprüfgefäß

## Frei programmierbare Vollumrichter zur Implementierung und Untersuchung eigener Regelungsmodelle

- Links: Greinacher-Kaskade bis 800 kV bei 0,05 A mit integriertem Teiler und wechselbarer Polarität
- Rechts: Vakuumprüfgefäß bis 400 kV bei 10-5 mbar mit Schaugläsern



Teilentladungs-Messkabine

## Gekoppelter Maschinensatz, bestehend aus Asynchron- und Synchronmaschine mit frei parametrierbarem Umrichter

- Vorne: Teilentladungsmessstand für Wechselspannungen bis  $\hat{U} = 100\text{ kV}$  und Grundstörpegel  $< 500\text{ fC} - 1\text{ pC}$ , bei Temperaturen bis  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Hinten: Parallelprüfanlage für Durchschlagprüfungen in Öl und Luft

## Übersicht - Dienstleistungen

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

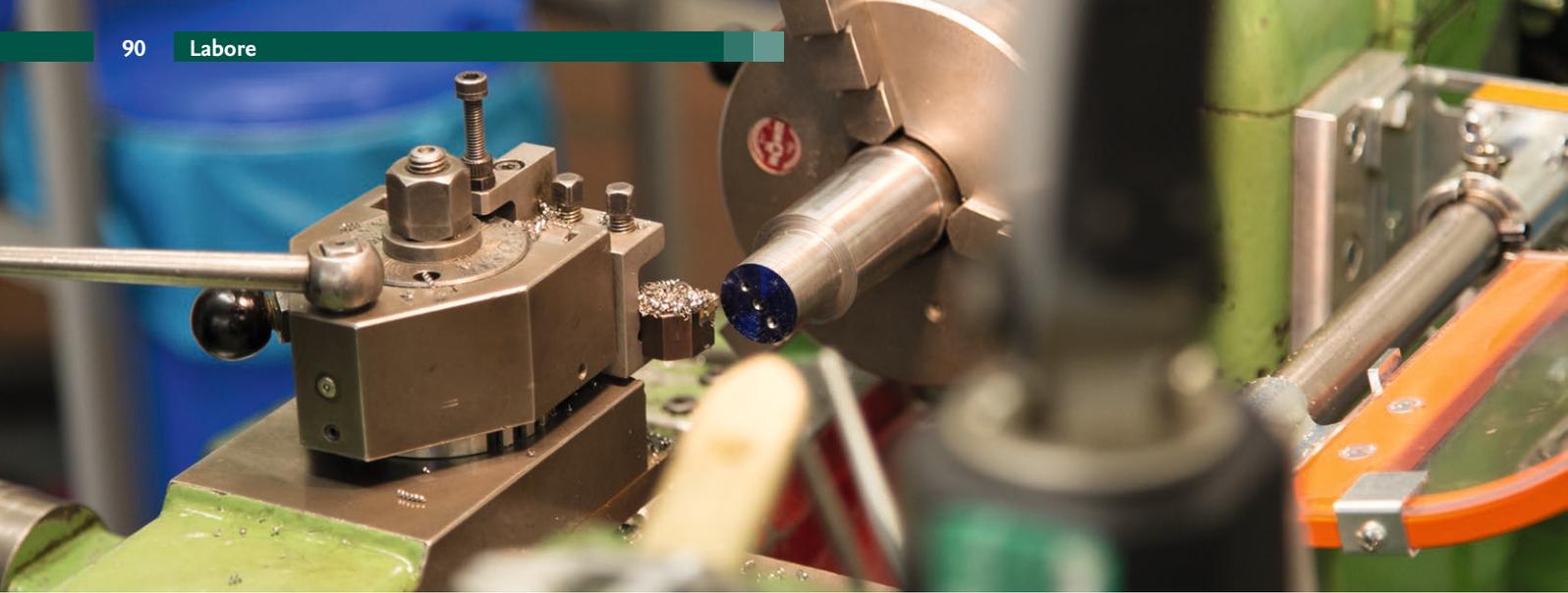
Dielektrische Materialprüfungen wie Verlustfaktor, relative Permittivität und Durchgangswiderstände bei variablen Frequenzen und Temperaturen

Verschiedene Hochgeschwindigkeitskameras stehen zur Visualisierung von Entladungen zur Verfügung

## Kontakt

Dipl.-Ing. Nicholas Hill  
+49 531 391 7785  
n.hill@tu-braunschweig.de





# Mechanische Werkstatt

Wir unterstützen alle wissenschaftlichen Mitarbeiter des elenia in ihrer Forschung mit unseren Kompetenzen in Entwurf, Konstruktion und mechanischer Fertigung von Versuchsanlagen, Testaufbauten, Komponenten und Prüfkörpern. Auch für die Forschung relevante Um- und Neubauten verschiedenster Labore und Einrichtungen gehören zu unserem Service.

## Als Beispiele aus dem letzten Jahr sind hier im Besonderen zu benennen:

- Auf- und Umbau im Leistungsprüffeld
- Hochleistungs-Kondensatorbank für das Projekt „Experimentelle Untersuchung einer Doppelunterbrechung mit TMF-Kontakten im Vakuum“
- Vakuumdoppelunterbrechungs-Testschalter für das Projekt EULAS
- Universal Power Switchgear II
- Laborauf- und umbau für das Projekt Optimierte Zellformierung „OptiZellForm“
- Modellaufbau zur Transientenanalyse von Leitungen

## Die Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen der mechanischen Werkstatt im Überblick:



Kerstin Rach

### Meisterin im Maschinenbaumechaniker-Handwerk Werkstattleiterin und Ausbilderin

„Die Arbeit und Betreuung der wissenschaftlichen Mitarbeiter, inklusive deren Forschung und die Betreuung der Mitarbeiter und Azubis in der mechanischen Werkstatt, sind so individuell und spannend wie die dahinterstehenden Personen. Diese Individualität macht den Reiz und die Herausforderung meiner Arbeit aus.“  
k.rach@tu-braunschweig.de



Frank Haake

### Feinmechaniker

„Ich denke nicht über Probleme nach, sondern über Lösungen dafür“

f.haake@tu-bs.de



Reinhard Meyer

### Feinmechaniker

„Einer meiner großen Arbeiten war der Aufbau eines „Vakuumdoppelunterbrechungs-Testschalter“. Neben drehen, fräsen, CF-Flansche (Schneidringe drehen), Kontakte Lötten (Vakuum) und Gestell fertigen, war der Zusammenbau interessant.“



Julia Musebrink

### Feinwerkmechanikerin Fachrichtung Maschinenbau

„Die Projekte bieten eine interessante und abwechslungsreiche Arbeit“

j.musebrink@tu-bs.de



Alessa Damrath

### Auszubildende Feinwerkmechanikerin 3. Lehrjahr

„Mir macht es sehr viel Spaß hier zu arbeiten, da es unglaublich abwechslungsreich ist und ich täglich vor neue Herausforderungen gestellt werde“

a.damrath@tu-bs.de



# Elektrotechnische Werkstatt

Neben dem üblichen Tagesgeschäft können wir 2019 recht zufriedenstellend auf rund 28 kleinere teils größere abgeschlossene Aufträge zurückblicken. Wir bedanken uns für die gute Zusammenarbeit in 2019 und blicken auf ein spannendes neues Jahr mit hoffentlich vielen anspruchsvollen Projekten.

## Ausgewählte Projekte der elektrischen Werkstatt aus dem Jahr 2019:



Reparatur

Steuerungseinheit CNC Fräsmaschine



Improvisation

Einbindung eines Versuchsaufbaues in den Sicherheitskreis der HV-Halle



Reparatur

Tesla-Transformator



Konstruktion

Arduino gesteuerte Ampel für Präsentationszeitmanagement



Konstruktion

Laborverteilung für das **elenia-energy-lab**

Lehre

4

# Lehre am elenia

<b>Vorlesungen</b>	<b>94</b>
<b>Labor : Intelligentes Laden</b>	<b>96</b>
<b>Labore und Seminare des elenia</b>	<b>97</b>
<b>Erfahrungen eines Masteranden</b>	<b>98</b>
<b>Studentische Abschlussarbeiten am elenia 2019</b>	<b>99</b>

Lehrveranstaltungen haben am elenia eine hohe Priorität. Neben verschiedenen Vorlesungen bieten wir auch eine Reihe von Laboren und Seminaren an, die von den Studierenden belegt werden können. Die Vorlesungen umfassen einige Grundlagenveranstaltungen, aber auch viele Vertiefungen. Auch externe Dozenten aus der Industrie werden entweder für eine ganze

Vorlesung oder auch für einzelne Termine gern eingesetzt. Unsere Labore stellen ein breites Spektrum an Versuchen dar, die wir direkt aus unserer wissenschaftlichen Arbeit in der Lehre umsetzen. Der Laborversuch Intelligentes Laden wurde in diesem Jahr für das Praktikum Elektromobilität neu konzipiert.



hier nicht aufgeführt: Systemtechnik der Photovoltaik (Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel)

# ARBEITSGRUPPE ENERGIETECHNOLOGIEN

## ELEKTRISCHE ENERGIEANLAGEN I & II

### Inhalte der Vorlesung (EA I)

Leitungs- und Netzformen, Ersatzschaltbilder von Betriebsmitteln, Synchronmaschine, usw.  
Netzberechnungsverfahren, KS-Stromberechnung

**Dozent** Dr. Ernst-Dieter Wilkening

### Inhalte der Vorlesung (EA II)

Belastbarkeit von Betriebsmitteln, Schaltanlagen, Schaltgeräte und Schutztechnik, Verhalten der Netzspannung nach der Unterbrechung des Stromflusses

**Dozent** Dr. Ernst-Dieter Wilkening

## AUFBAU UND BERECHNUNG VON GLEICHSTROMSYSTEMEN

### Inhalte der Vorlesung

Grundlegende Kenntnisse zum Aufbau von Gleichstromnetzen und deren Komponenten  
Selbstständige Berechnungen zum Betriebsverhalten und Fehlerfällen  
Kenntnisse über zulässige Systemzustände beim Betrieb sowie die Sicherheitsbestimmungen

**Dozent** Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat

## AUFBAU UND FUNKTION VON SPEICHERSYSTEMEN

### Inhalte der Vorlesung

Grundkenntnisse über den Aufbau und die Funktionsweise von Speichersystemen  
Kenntnisse über die Speicherkenngrößen, Auslegung für Doppelschichtkondensatoren, Batteriespeicher, Ladeinfrastruktur und Wasserstofftechnologien

**Dozent** Dr. Frank Lienesch

## TECHNOLOGIEN DER ÜBERTRAGUNGSNETZE

### Inhalte der Vorlesung

Komponenten der elektrischen Energietechnik z.B. Freileitungen, Kabel und Transformatoren  
Stabilität, Fehlerfälle, Netzformen, Netzplanung und die Systemanalyse  
Kraftwerksarten wie konventionelle und erneuerbare Energieerzeugungsanlagen

**Dozent** Dr.-Ing. Christian Schulz



## NUMERISCHE BERECHNUNGSVERFAHREN

### Inhalte der Vorlesung

Grundlagen zur numerischen Lösung von linearen Gleichungssystemen  
DGL 1. Ordnung (Anfangswertprobleme) und partiellen DGL  
Rechnerübung

**Dozent** Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat

## HOCHSPANNUNGSTECHNIK I & II

### Inhalte der Vorlesung (HST I)

Auslegungskriterien für Energieübertragungssysteme  
Isolationskoordination in HV AC und DC-Systemen  
Grundprinzipien der Gasentladung

**Dozent** Dr.-Ing. Michael Hilbert

### Inhalte der Vorlesung (HST II)

Thermische und mechanische Belastbarkeit von Betriebsmitteln, Schaltanlagen/-geräte und Schutztechnik  
Verhalten der Spannung nach Stromflussunterbrechung

**Dozent** Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat

## GRUNDLAGEN DER ENERGIETECHNIK + GENT UI

### Inhalte der Vorlesung

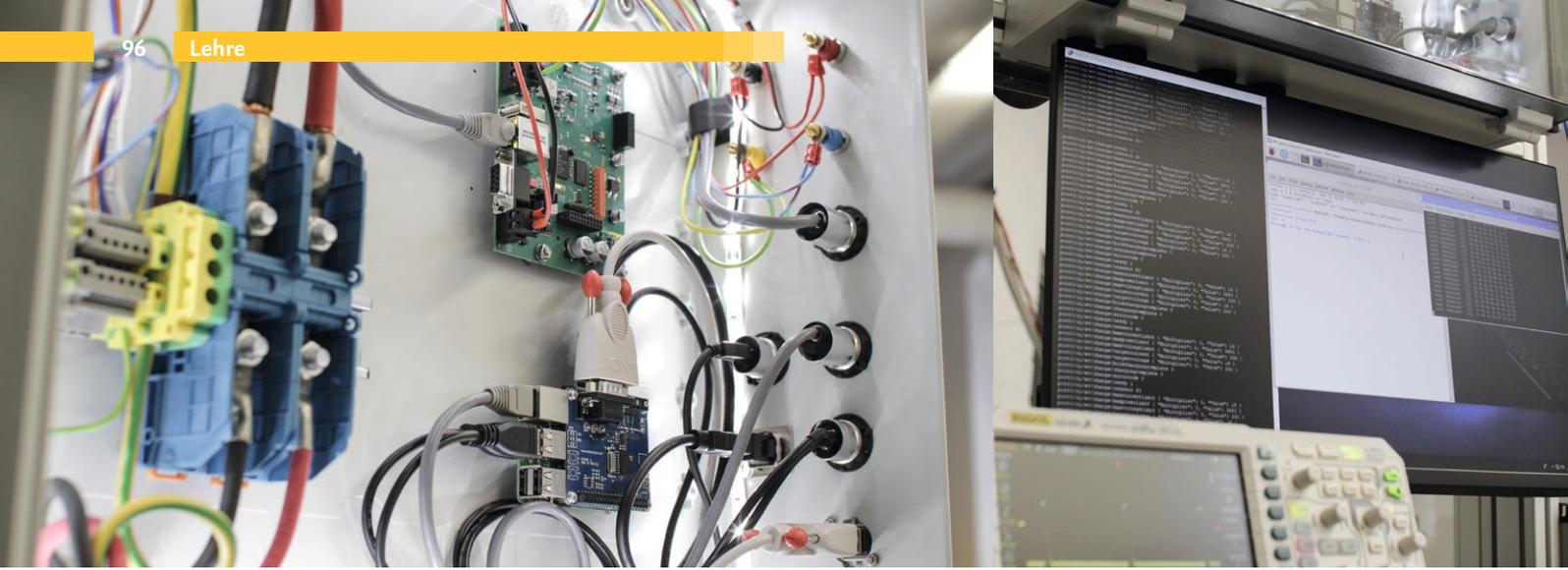
Grundlagen der Hochspannungstechnik  
Komplexe Berechnungen zu Y- und  $\Delta$ -Schaltungen, Freileitungen, Transformatoren und Generatoren

**Dozent** Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat

### Inhalte der Vorlesung + Seminar (GENT UI)

Grundlagen elektr. und magn. Felder  
Berechnungen zu Gleichstromkreisen, Lade- und Entladevorgänge, R-L-C bei Wechselstrom

**Dozent** Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat  
(u.a. gemeinsam mit Prof. Engel)



# Labor : Intelligentes Laden

## Ein neuer Laborversuch für das Praktikum Elektromobilität

Die Elektromobilität ist ein wichtiger Bestandteil der Mobilitätswende und der Energiewende. Die steigende Anzahl von Elektrofahrzeugen und der rasche Zubau von Ladeinfrastruktur wird jedoch bestehende Energieversorgungsnetze vor Herausforderungen stellen. Ein Ansatz für die Integration von einer Vielzahl an Elektrofahrzeugen in Bestandsnetzen ist das intelligente Laden. Dabei wird die Ladeleistung auf Basis aktueller Netzzustände und einer gleichzeitig bestehenden Kommunikation zum Elektrofahrzeug aktiv angepasst. Im Rahmen des neuen Laborversuchs soll den Studierenden das intelligente Laden von Elektrofahrzeugen in einem realitätsnahen Umfeld nähergebracht werden. Der Versuch ist der Erste an der TU Braunschweig, der sich mit dem Bereich des Ladens von Elektrofahrzeugen beschäftigt. Er stellt eine praktische Ergänzung zu bestehenden Vorlesungen im Bereich Elektrotechnik und zum Masterstudiengang Elektromobilität als neuer Versuch des Pflichtlabors dar. Solche praktischen Erfahrungen können für das spätere Berufsleben, insbesondere für Absolventen im Bereich der Elektromobilität, von großem Vorteil sein. Insgesamt kann den Studierenden ein Gesamtüberblick und ein Einstieg in die Welt der Elektromobilität vermittelt werden.

### Fakten zum Laborversuch

Der Laborversuch Intelligentes Laden von Elektrofahrzeugen wurde aus Studienqualitätsmitteln mit einer Gesamtsumme von 10.100 Euro finanziert. Der Aufbau des Versuchs erfolgte im Wintersemester 2018/2019 und wurde tatkräftig durch die elektrische Werkstatt des elenia und Marvin Kruse, eine ehemalige wissenschaftlichen Hilfskraft am elenia, unterstützt. Der Versuch wird im Wintersemester 2019/2020 im Rahmen der Veranstaltung Labor Master Elektromobilität erstmalig durchgeführt. Hauptzielgruppe des Labors sind Studierende in den Masterstudien Elektrotechnik und Elektromobilität.

### Versuchsinhalt

Die Versuchsteilnehmer sollen in dem Laborversuch die Grundlagen von Ladevorgängen kennen lernen. Hierzu wird auf den ganzheitlichen Ladevorgang eingegangen. Dieser wird in vier Punkte unterteilt. Der erste Punkt ist die Ladeinitialisierung und Ladekommunikation. Diese sorgt für den normkonformen Datenaustausch zwischen Ladesäule und Elektrofahrzeug nach ISO 15118 oder DIN SPEC 70121. Der zweite wichtige

Aspekt der Ladung eines EV ist die Leistungsübertragung. Sie muss für ein sicheres und schnelles Laden ausgelegt und angepasst werden. Hierbei hilft die Ladesteuerung weiter, welche einen weiteren wichtigen Teil des Ladens darstellt. Der letzte der vier Punkte, den die Studierenden aus diesem Praktikumsversuch mitnehmen sollen, ist das netzdienliche Laden, das mit steigender Elektrofahrzeugdichte und steigenden Ladeleistungen weiter an Bedeutung gewinnt. Das Ziel des netzdienlichen Ladens ist es, die Stromnetze trotz Ladevorgängen stabil zu halten.

Der Versuchsaufbau besteht aus einer selbstgebauten Gleichstromladesäule. Als Ladegerät wird für die Ladesäule eine DC-Quelle aus dem **Netzdynamiklabor** des elenia verwendet. Die Kommunikations- und Steuerungstechnik besteht aus einem Ladesäulencontroller, welcher die normkonforme Kommunikation mit dem Elektrofahrzeug übernimmt, und einem Raspberry Pi. Der Raspberry Pi setzt z. B. das netzdienliche Laden um. Weiterhin wurde ein Bobbycar mit einem Kommunikationscontroller für Elektrofahrzeuge und Kommunikationsschnittstellen ausgerüstet. Die Abbildung unten zeigt das mit Ladetechnik ausgerüstete Bobbycar.

Die Durchführung gliedert sich in mehrere Schritte. Zunächst wird anhand des Versuchsaufbaus das theoretische Wissen



Mit Ladetechnik ausgerüstetes Bobbycar

vermittelt, welches für das Verständnis der Versuche notwendig ist. Hierzu zählen z. B. die unterschiedlichen Ladebetriebsarten, genormte Ladestecker und die Ladekommunikation. Anschließend wird in zwei Versuchen das Wissen praktisch umgesetzt. Im ersten Versuch wird zunächst mit dem Bobbycar ein Ladevorgang simuliert, um den Studierenden die Grundlagen der Kommunikation während eines Ladevorgangs praktisch und verständlich darzustellen. Danach wird im zweiten Versuch ein realer Ladevorgang an dem instituts-eigenen e-Golf durchgeführt. Hierfür wird die Gleichstromladesäule des Versuchsaufbaus verwendet. In diesem Versuch werden unter anderem netzdienliche Betriebsweisen wie die Wirkleistungssteuerung erprobt. Während der zwei Versuche führen die Studierenden verschiedene praktische Aufgaben durch, wie z. B. das Auslesen des PLC-Signals der Ladeleitung mit einem Oszilloskop, das Übersetzen von CAN-Nachrichten und die Anpassung von Programmcode des Raspberry Pi. Die Abbildung Schaubild zur Kommunikationsüberwachung zeigt beispielhaft das PLC-Signal auf einem Oszilloskop und die ausgelesenen Nachrichten auf einem Bildschirm.

### Ausbaumöglichkeiten des Versuchsstands

Zukünftig kann der Laborversuch mit einer Wechselstromladesäule erweitert werden, wodurch die Studierenden noch weitere Einblicke in die Ladetechniken von Elektrofahrzeugen gewinnen können. Weiterhin kann ein Messsystem in den Aufbau integriert werden. Dies würde umfangreiche messtechnische Untersuchungen während der Laborversuche ermöglichen und den praktische Erfahrungsgewinn der Studierenden zusätzlich erhöhen.

#### Labor

Intelligentes Laden  
von Elektrofahrzeugen



#### Kontakt

Gian-Luca Di Modica  
g.di-modica@tu-braunschweig.de

*finanziert aus Studienqualitätsmitteln*

## Labore und Seminare des elenia

### Übersicht



### Inhalte

#### Elektromobilität

##### Inhalte des Praktikums

Simulation elektrischer Antriebsstränge  
Auslegung von Leistungselektronik  
Ladevorgang und -technik von EV

**Dozent** Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat

#### Num. Berechnungsverfahren

##### Inhalte des Rechnerpraktikums

Typische Simulationsprogramme  
Modelle erstellen und auswerten mit  
Comsol Multiphysics und LTSpice.

**Dozent** Prof. Kurrat

#### Innovative Energiesysteme

##### Inhalte des Praktikums

Versuche zu Solarzelle, Wechselrichtern,  
Batteriespeichern, Inselnetzen und  
Energiemanagement

**Dozent** Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel

#### Innovative Energiesysteme

##### Inhalte des Studienseminars

Vortragsreihe und Präsentationstraining  
zu energietechnischen und energiewirtschaftlichen Themen

**Dozenten** Prof. Kurrat, Prof. Engel

#### Analyse, Simulation, Planung v. Netzen

##### Inhalte des Praktikums

Einführung in die Netzberechnung  
Lastfluss- und Kurzschlussberechnungen  
Quasidynamische Simulationen

**Dozent** Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel

#### Hochspannungstechnik

##### Inhalte des Praktikums

HS-Messtechnik, Isolierstoff- und  
Gleichstromtechnik, Blitzstoßspannung  
Einsatz von Augmented Reality

**Dozent** Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat

#### Doktorandenseminare

##### Inhalte

Systemdenken kennen und verstehen  
Verständnis der Systemtheorie  
Nachhaltige Energiesysteme

**Dozenten** Prof. Kurrat, Prof. Engel

# Erfahrungen eines Masteranden

## Erfahrungsbericht Masterarbeit von Timo Meyer

### Mein Studium an der TU

Bevor ich den Master an der TU Braunschweig begann, habe ich meinen Bachelor der Elektrotechnik mit den Schwerpunkten Energietechnik und Automatisierung in Osnabrück absolviert. Meinen Master wollte ich mit dem Schwerpunkt Energietechnik studieren. Das umfangreiche Angebot der Studieninhalte an der TU Braunschweig bewegte mich zum Studium an der TU. Ich merkte schnell, dass mich die Thematik Energieverteilung, die Komponenten und insbesondere die Hochspannungstechnik begeisterten. Daher war der Entschluss da, meine Abschlussarbeit am elenia zu schreiben.

### Erste Berührungen mit dem elenia

Als HiWi habe ich am elenia zusammen mit einem Kommilitonen Simulationsaufgaben übernommen. Dabei habe ich elektrische Felder, Temperaturen und Druckausgleichsvorgänge für unterschiedliche Geometrien simuliert. Die Arbeitszeit war flexibel und ich hatte Zugang zu dem Computerraum am Institut. Das war ideal, wenn man zwischen den Vorlesungen die Zeit sinnvoll nutzen wollte. Die Arbeit hat mir so gut gefallen, dass ich einen weiteren kleinen HiWi Job

mit mehr Praxisbezug machen wollte. Als habe ich im **synthetischen Leistungsprüffeld** den Aufbau von Prüfkreisen sowie Untersuchungen von Ausschaltvorgängen von Vakuumleistungsschaltern unterstützt.

### Der Weg zu meiner Masterarbeit

Aus den vielen Themen, die am elenia angeboten werden, habe ich mich besonderes für die Vakuumschalttechnik interessiert. Mit meinen Betreuern aus dem HiWi-Job habe ich über die aktuellen Themen der Forschung, meine Wünsche in der Masterarbeit und aktuell ausgeschriebene Abschlussarbeiten gesprochen. Nach kurzer Überlegungszeit habe ich mich für ein Thema entschieden. Ich startete im Oktober 2018 meine Masterarbeit „Entwurf, Aufbau und Charakterisierung eines Hochspannungsprüfkreises zur Erzeugung und Messung transienter Wiederkehrspannungen“.

### Die Arbeit als Masterand

Die Masterarbeit startete mit einem Kick-off Termin zwischen mir und meinen Betreuern, in dem alle Aufgabenpakete besprochen und ein grober Zeitplan entwickelt wurde. Meine Arbeitszeit konnte ich flexibel gestalten, da ich Zu-

tritt zu dem synthetischen Prüffeld und dem Computerraum hatte. Ich konnte auch von zu Hause oder in der Bibliothek arbeiten. In regelmäßigen Terminen mit meinen Betreuern habe ich den aktuellen Stand der Masterarbeit präsentiert und über die nächsten Schritte diskutiert. Ich konnte sehr selbstständig arbeiten und meine Ideen umsetzen und wenn ich mal nicht weiterkam, waren meine Betreuer mit Rat und Tat zur Stelle. Weiterhin haben mir auch andere Mitarbeiter weiterhelfen können. Das Team am elenia ist sehr hilfsbereit und bietet eine Vielzahl von Abschlussarbeiten an, die an dem schwarzen Brett am Institut aushängen. Des Weiteren findet man auch viele HiWi-Stellen ([www.elenia.tu-bs.de/stellenangebote](http://www.elenia.tu-bs.de/stellenangebote)) und Abschlussarbeiten auf der Internetseite des elenia ([www.elenia.tu-bs.de](http://www.elenia.tu-bs.de)).



Timo Meyer, M.Sc.

## Modellierung von Verlusten im Kontext simultaner Mehrfachnutzung

Aufgrund der steigenden Anzahl von PV-gekoppelten Speichersystemen im privaten Sektor wird vermehrt nach effizienteren und zugleich netzdienlichen Speicherbetriebsstrategien gesucht. Eine Möglichkeit das technische Potenzial eines Heimspeichersystems zu nutzen, ist die simultane Mehrfachnutzung. Diese ermöglicht die zeitgleiche Verwendung eines Batteriespeichers durch den Eigentümer und eine externe Partei. Vor der Einführung dieser Nutzungsstrategie müssen u.a. abrechnungstechnische Herausforderungen geklärt werden.

In meiner Masterarbeit habe ich die abrechnungstechnisch relevanten Verlustmechanismen technologieorientiert modelliert sowie die wirtschaftlichen Auswirkungen untersucht. Für eine realitätsnahe Datengrundlage habe ich im **Energiemanagementlabor** ein reales Speichersystem vermessen. Dabei konnte ich erfahren, dass bei der Arbeit im Labor eine ausdauernde Arbeitswei-

se essenziell ist, um nicht vorhersehbare technische Probleme zu lösen. Aus den Ergebnissen ging hervor, dass für die Abrechnung bei einer simultanen Speichernutzung die Umwandlungsverluste, die Regelungsverluste und die Bereitschaftsverluste in absteigender Reihenfolge am relevantesten sind. Diese drei Verlustmechanismen wurden im Folgenden von mir in dem Wechselrichtermodell der **elenia Simulationsumgebung (eSE)** modelliert. Die größte Herausforderung war dabei für mich der Einstieg in eSE, da ich bis zu diesem Zeitpunkt noch keine Erfahrungen mit Simulationsumgebungen gemacht hatte. Durch die zur Verfügung gestellte Hilfeapplikation sowie die Unterstützung meines Betreuers fand ich jedoch relativ zügig Zugang.

Neben den Verlustmechanismen habe ich die simultane Mehrfachnutzung als Betriebsstrategie für PV-Speichersysteme sowie die Aufteilung der Wandlungsverluste bei unterschiedlichen Sze-

narien in **eSE** implementiert. Ergebnis meiner Arbeit war, dass die simultane Speichernutzung unabhängig vom Aufteilungsschlüssel die jährlich auftretenden Wandlungsverluste und damit die Stromkosten für den Speichereigentümer reduziert.

Die Modellierung hat mir in meiner Masterarbeit am meisten Spaß gemacht, da mir viele Freiheiten gelassen wurden, in welcher Form ich die relevanten Prozesse abbilden. Dabei wurde mir mit der Zeit bewusst, dass ich wichtige Entscheidungen für mein Modell selbstständig treffen muss und dass dies auch mal bedeutet, sich falsch zu entscheiden.



Mattias Hadlak, M.Sc.

# Studentische Abschlussarbeiten am elenia 2019



## Studienarbeiten

Gloria Krefth  
Bente Andersson  
Analyse der Einflussfaktoren in der Formierung und SEI-Bildung von Li-Ionen-Batterien  
Wirtschaftlichkeit von Batteriespeichern im Primärregelleistungsmarkt

## Bachelorarbeiten

André Rehbock  
Nils van Ohlen  
Erstellung eines Batteriemodells für ein Lithium-Ionen-Batteriemodul in MATLAB/Simulink  
Simulation und Entwurf einer regenerativen Wasserelektrolyse mit dem Lastprofil eines Windparks am EWE Standort Huntorf

Marten Thomes  
Duy Khanh Pham  
Fenglin Zhou  
Systematische Konzeptentwicklung von DC-Systemen mit anschließender Modelica Implementierung  
Development of a Systems Engineering Based Assessment Methodology for DC Systems  
Development of a software-based analysis tool for the evaluation of measurement data of spark gaps during surge current tests

Wai-Yee Choi  
Henrik Netz  
Violetta Zimmermann  
Entwicklung einer Benutzeroberfläche für eine Flottenlademanagementsimulation  
Analyse des dynamisches Verhaltens spannungseinprägender Wechselrichter bei symmetrischen Netzfehlern  
Analyse des Verhaltens spannungseinprägender Wechselrichter bei netzseitigen Spannungszeigersprüngen im Labor

Xiaoxiong Wang  
Entwicklung einer modularen Steuerungsumgebung zur Untersuchung von energetischen Komponenten für Prosumer-Haushalte

Philipp Jassmann  
Verbrauchs- und Nutzungsanalyse der Hybridflotte bei BS|Energy

## Masterarbeiten

Keyuan Luo  
Frederik Anspach  
Robin Drees  
Patrick Rinder  
Modelling of HVDC Grid Topologies and DC Breakers in MATLAB/Simulink  
Untersuchung zur Auslegung von DC-Schalterkonzepten in Gleichspannungsbordnetzen (Pierburg)  
Simulative Anforderungsableitung zur elektro-thermischen Auslegung von Hochvolt-Batteriesystemen (VW)  
Konzeptionierung und Programmierung eines Batteriemanagementsystems für Lithium-Ionen-Batteriemodule auf Basis eines PXI-Systems

Tianzhu Cang  
Nils Müller  
Thomas Steens  
Mattias Hadlak  
Measurement uncertainty determination of novel high-voltage impulse dividers (PTB)  
Standortanalyse der öffentlichen Ladeinfrastruktur in Braunschweig (BS|Energy)  
Lastprognosen zur Einbindung von Elektromobilität in das Energiemanagement von Bestandsgebäuden (DLR)  
Modellierung und Evaluation eines Wechselrichterverlustmodells im Kontext der Mehrfachnutzung von PV-Speichersystemen

Louis Bültemann  
Sebastian Wolf  
Saeed Ghorbanpour  
Besheli  
Martin Wernicke  
Bewertung der Qualität von Lithium-Ionen-Batteriezellen mittels differentieller Spannungsanalyse  
Entwicklung eines Verfahrens zur Optimierung der Blindleistungsflüsse im Verteilungs- und Übertragungsnetz  
Entwicklung und Untersuchung von Betriebsstrategien von STATCOM-Anlagen an der AC-Netzanbindung von Offshore-Windparks  
Untersuchung der Potenziale und Möglichkeiten zur Einbindung industrieller Blindleistungskompensationsanlagen in das Blindleistungsmanagement der Netzbetreiber

Christoph Steinmann  
Karen Flügel  
Entwicklung einer Verfahrensweise zur Analyse des Blindleistungspotenzials von Stromnetzen  
Untersuchung der Blitzstoßspannungsfestigkeit einer kombinierten Schirm- und Steueranordnung für eine Vakuum-Doppelunterbrechung

Jan Hölk  
Untersuchung der Alterung von Lithium-Ionen-Batterien durch dynamische Belastung mit Stromprofilen in Entladerichtung

Joseph Broer  
Innovative Konzepte zur Bereitstellung des Offshore Windpark Eigenbedarfs unter Berücksichtigung von HGÜ-Netzanschlussstopologien

Jan-Niklas Krokowski  
Marc Kappelt  
Präqualifikation von Photovoltaikanlagen für den Regelleistungsmarkt  
Konzeptionierung, Entwicklung und Integration von künstlicher Intelligenz für Prognosen innerhalb eines dynamischen Flottenlademanagements

Götz-Nikolaus Grobelny  
Erweiterung eines spannungseinprägenden Regelungsverfahrens für Wechselrichter um eine Strombegrenzung für Kurzschluss- und kurzzeitige Überlastsituationen

Alexander Larisch  
Stefan Czybik  
Bereitstellung von Momentanreserve mittels Heimspeichersystemen im Niederspannungsnetz  
Analyse der im Verteilungsnetz eingesetzten Wide Area Network-Technologien auf deren IT-Sicherheit, Reichweite und Anwendungspotenzial

Thanh Nguyen  
Balancing markets in the context of developing countries: Setup of a concept, simulation and application in a case study

Léon Beuchel  
Steffen Meyer  
Erstellung synthetischer Lastprofile für den Energiebedarf von Ladebereichen für Elektrofahrzeuge  
Erstellung synthetischer Lastprofile für den Strombedarf von Gebäudelasten unter Berücksichtigung von Energieeffizienzmaßnahmen

Timo Meyer  
Entwurf, Aufbau und Charakterisierung eines Hochspannungsprüfkreises zur Erzeugung und Messung transientser Wiederkehrspannungen

Dennis Altmann  
Bewertung von Lithium-Ionen Batterien für 2nd-Life Anwendungen mittels elektrochemischer Impedanzspektroskopie und Pulse-Fitting Methode

Adrian Göbel  
Jörn Wolters  
Holger Teichmann  
Tom Bender  
Henrik Wagner  
Philipp Kiemele  
Eigenbedarfsversorgung und Schutzauslegung für ein neues GuD-Kraftwerk (VW Kraftwerke)  
Entwicklung von Verfahren zur Inselnetzerkennung durch spannungseinprägende Umrichter  
Hotspotsanalyse Elektromobilität in Braunschweig (BS|Netz)  
Modellbasierte Einflussgrößenanalyse von E-Fuels als Ergänzung zur Elektromobilität (IAV)  
Untersuchung von NOVA-Maßnahmen für Elektromobilität-Hotspots  
Veränderungen in Planungsgrundsätzen aufgrund der steigenden Elektromobilität (BS|Netz)

# Veranstaltungen & Events

# 5



Am elenia wird nicht nur am Rechner gesessen oder in den Laboren geforscht, wir sind auch über das Institut hinaus aktiv, was sich durch die vielfältigen Veranstaltungen in diesem Jahr zeigt. Neben den Diskussionen über Forschungsprojekte und Dissertationsthemen innerhalb der beiden Arbeitsgruppen haben wir uns auch schwerpunktübergreifend fachlich intensiv ausgetauscht. Als Gastgeber des ersten EFZN Forschungs-

tages hatten wir im Februar Teilnehmende aus ganz Niedersachsen an der TU Braunschweig zu Gast. Auch die Nachwuchsförderung kommt am elenia mit Veranstaltungen für Abiturientinnen und Studierende nicht zu kurz. Insbesondere der erste elenia Open Research Day stieß auf große Begeisterung bei allen Teilnehmenden. Wir freuen uns jetzt schon auf die fachlichen und spaßigen Events im Jahr 2020.

# Besondere Veranstaltungen

## Berichte zu ausgewählten Events des Jahres 2019



### Niedersachsen Technikum, 25. Januar 2019

Im Rahmen des Niedersachsen Technikums der TU Braunschweig waren am 25. Januar elf technisch interessierte Abiturientinnen zu Gast am elenia. Nach einer kurzen Vorstellung des Instituts bekamen die jungen Frauen einen Einblick in die Praxis unserer vielfältigen Forschungsbereiche. Als höchst spannend erwies sich hier vor allem die Hochspannungshalle, doch auch unsere elenia energy labs, das Batterielabor sowie emilia – unser e-Golf – sorgten für großes Interesse. Wir hoffen, den Abiturientinnen die technischen Studiengänge, insbesondere die Elektrotechnik, etwas näher gebracht zu haben und die ein oder andere später auch am elenia begrüßen zu dürfen.



### EFZN Forschungstag, 19. Februar 2019

Energieforschung in Niedersachsen – diese war der Fokus, als der EFZN-Standort Braunschweig am 19. Februar zum EFZN-Forschungstag in das Haus der Wissenschaft einlud. Die Veranstaltung zählte rund 60 Gäste und richtete sich vornehmlich an Nachwuchswissenschaftlerinnen und –wissenschaftler. Neben Vorträgen zu den Themen „Vernetzte Energiesysteme“, „Nachhaltige Energiespeicher und Power2X“ und „Energiewende in der Luftfahrt“ bot sich bei einer Postersession die Chance, Einblicke in die Forschungsthemen der weiteren EFZN-Standorte zu erhalten und wertvolle Kontakte zu knüpfen. Die Veranstaltung wird in den folgenden Jahren an den weiteren Standorten als Serie fortgeführt.



### Gemeinsamer Schwerpunkttag des elenia, 14. Mai 2019

Am 14.05.19 haben sich die Forscher und Forscherinnen des elenia an der PTB zusammengefunden, um sich über ihre Forschung auszutauschen. Vertreten waren alle drei Forschungsschwerpunkte des elenia, bestehend aus dem Aktiven Verteilnetz, der Elektromobilität und den Komponenten der Energieversorgung. Insgesamt nahmen über 40 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler unter der Leitung der drei Schwerpunkt-Mentoren Prof. Michael Kurrat (elenia), Prof. Bernd Engel (elenia) und Dr.-Ing. Frank Lienesch (PTB) teil und stellen ihre Forschungsschwerpunkte in einer Postersession mit offener Diskussion vor. Die Veranstaltung war ein voller Erfolg.



### elenia Open Research Day - von Mitarbeitern für Studierende, 25. Mai 2019

Der erste Open Research Day hatte zum Ziel, den teilnehmenden Studierenden die Forschung am elenia näher zu bringen. Mit etwa 30 interessierten Gästen wurden unsere Erwartungen deutlich übertroffen. Nach einem kurzen Überblick über das Institut und unsere Forschungsthemen gab es einen detaillierten Laborrundgang in Kleingruppen. Bei den Erläuterungen und Vorführungen zu Laborequipment und Untersuchungen ergaben sich spannende Diskussionen. Abschließend beantworteten wir Fragen zum Alltag eines wissenschaftlichen Mitarbeiters am elenia und ließen den Abend beim gemeinsamen Grillen vor unserer Hochspannungshalle ausklingen.



### NFF-Cup 2019, 24. Juni 2019

Bereits zum fünften Mal fand der NFF-Fußballcup statt und das elenia war in diesem Jahr mit einem sehr großen und sehr starken Team vertreten. In einem spannenden Viertelfinalspiel gegen das IDS kam es in den letzten Minuten zu einem ungültigen Einwurf bzw. Schuss der zu einem gegnerischen Tor führte und somit das Turnier für das „Team elenia“ beendete. Im Finale setzte sich das „Team IWF“ knapp mit 2:1 gegen das „Team IK“ durch.

Auch im fünften Jahr konnte sich damit ein Institut durchsetzen, das den Pokal zuvor noch nicht gewonnen hat. Die Vorbereitungen für das nächste Turnier laufen bereits. Es ist schön, dass das elenia auch außerhalb der Arbeitszeit gerne als Team zusammenarbeitet.

### **Pfingstexkursion, 11. - 13. Juni 2019**

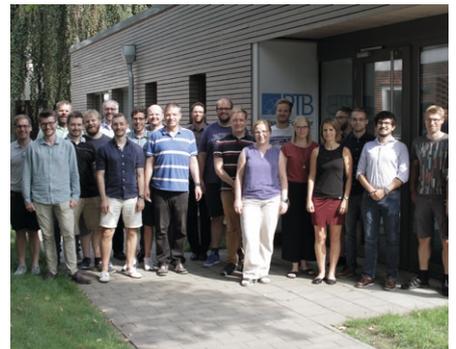
Auch in diesem Jahr sind wir traditionell gemeinsam mit Studierenden und dem Institut für EMV für eine dreitägige Exkursion nach Amsterdam gefahren. Auf der Hinreise haben wir die Kema in Arnheim besucht. Europas größtes Prüfinstitut für Komponenten der Energietechnik hat uns viele Einblicke in seine Testlabore gewährt. Am zweiten Tage durften wir die ESA in Noordwijk besuchen. Das Tagesprogramm bot viele Themen rund um die Raumfahrt. Highlights waren die Präqualifizierung für elektrische Komponenten zum Einsatz im All, sowie eine Vorstellung des Galileo Navigationssystems. Natürlich wurden Einstiegsmöglichkeiten bei der ESA nach dem Studium vorgestellt. Als kulturellen Programmpunkt haben wir am dritten Tag die Amsterdams Museen unsicher gemacht. Insgesamt blicken wir auf eine gelungene Exkursion zurück und freuen uns schon auf die Exkursion 2020.



### **AG-Klausur Arbeitsgruppe Energiesysteme, 30. August 2019**

In diesem Jahr fand der Workshop der AG-Energiesysteme quasi im Vorgarten des Institutes, in den Räumen der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, statt. Dort hatte jeder Wissenschaftler und jede Wissenschaftlerin der AG die Möglichkeit sein/ihr Forschungsprojekt vorzustellen. Anschließend wurden im „World Café“ in kleinen Diskussionsrunden kreative Ideen zu Fragestellungen mit Projektbezug gesammelt, sodass jeder etwas für sein Forschungsprojekt mitnehmen konnte.

Neben dem fachlichen Veranstaltungspunkt wurde bei bestem Wetter auf der Oker Kanu gefahren und gebadet. Der Abend klang auf einem Oker Floß bei Getränken und Ge grillten aus.



### **AG-Workshop Arbeitsgruppe Energietechnologien, 16.-19. September 2019**

Der AG-Workshop Energietechnologien fand in diesem Jahr in der sächsischen Schweiz statt. Daher erfolgten die Teambuildingaktivitäten im Großraum Dresden. Unter anderem waren die Dresdener Altstadt und die bekannte Basteibrücke Orte die gemeinsam entdeckt wurden.

In fachlichen Veranstaltungspunkten wurden individuelle und allgemeine Forschungsfragen von allen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern der AG diskutiert. Dabei sind Methoden eines World Cafés und des Open Space für einen kreativen Austausch zur Anwendung gekommen. Das Ergebnis war ein breites Portfolio von Antworten auf diverse Fragestellungen welche von uns aufgearbeitet und in unserer Wissensdatenbank gespeichert wurden.



### **Institutsworkshop Goslar, 25. September 2019**

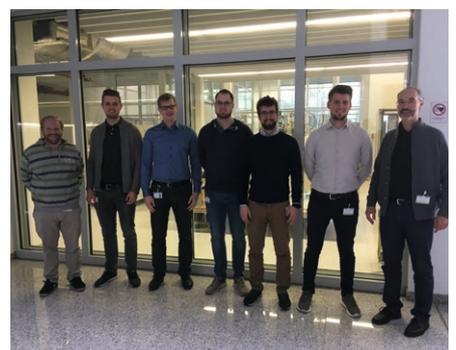
Der diesjährige Institutsworkshop 2019 beinhaltete ein abwechslungsreiches Programm. Am Vormittag stand der Besuch des Energie Campus Goslar inklusive einer Führung durch die Labore des Forschungszentrums an. Darunter fanden sich u.a. die Labore des Aktiven Verteilnetzes, das Batterie- und Sensoriktestzentrum sowie das Speicherlabor.

Das Programm wurde am Nachmittag mit einer Stadtführung unter der Motto "Auf den Spuren der Goslarer Gose" in Goslar fortgesetzt, in der über die traditionelle und alte Braukunst der Goslarer Gose informiert wurde. Der Ausklang der Veranstaltung erfolgte mit einem gemeinsamen Grillen am Fahrzeuglabor des elenias.



### **Workshop Novizen 2019, 27. November 2019**

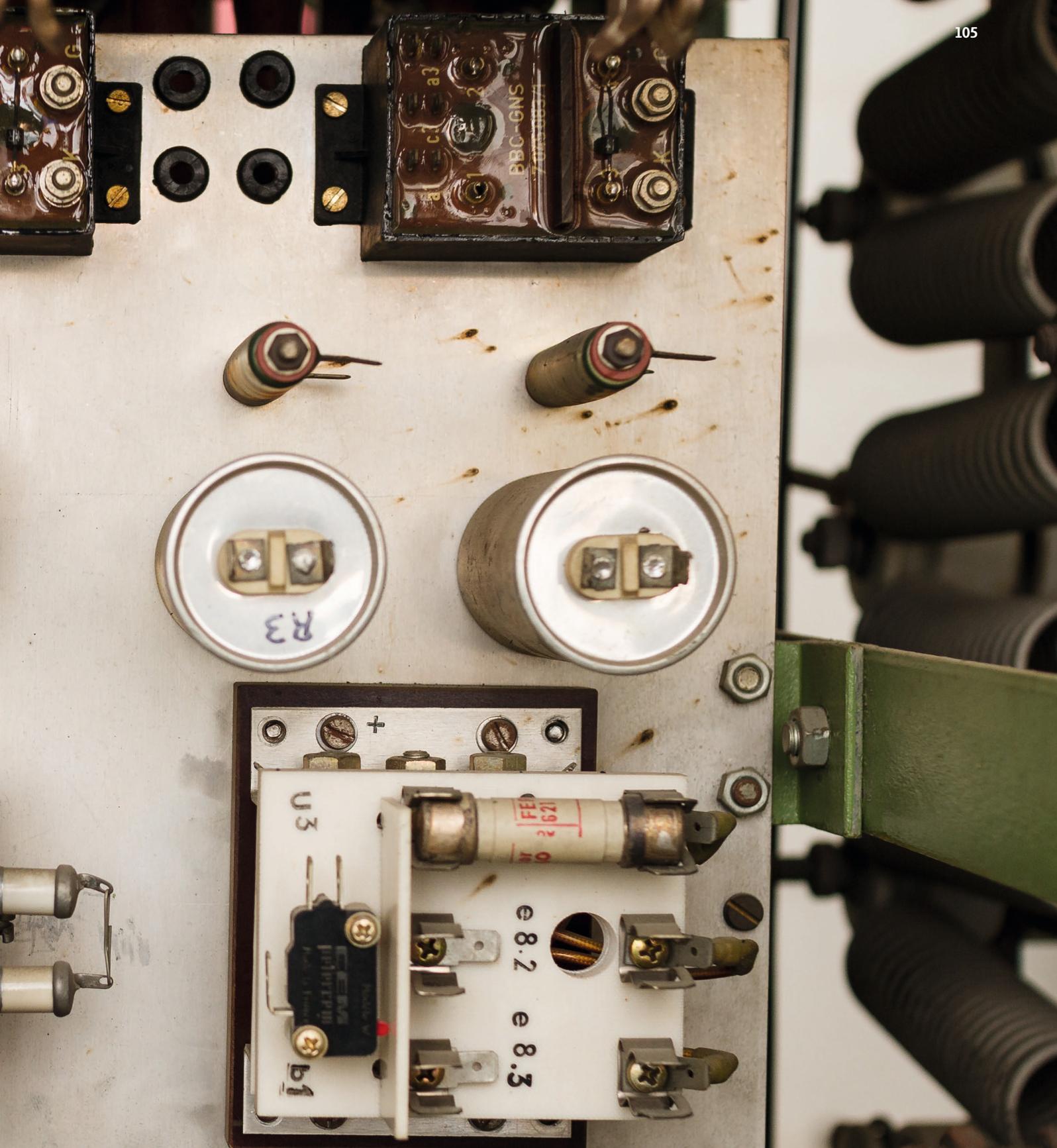
6 neue Doktoranden der AG Energietechnologien haben sich Mitte 2019 zum „Novizen“ Team zusammengeschlossen. Gemeinsam haben sie sich die Frage gestellt, ob es im Team möglich wird, bereits im ersten Jahr die Forschungsfragen der Doktorarbeit auszuarbeiten. Die Novizen organisieren sich selbst und nutzen moderne Managementtools. Sie evaluieren die Ergebnisse selbst und erhalten quartalsweise Feedback und methodische Unterstützung durch den Doktorvater. In der Abschlussphase des ersten Jahres fand im November bei Phoenix Contact in Blomberg ein zweitägiger Workshop statt. Die Novizen präsentierten und diskutierten den aktuellen Stand der einzelnen Promotionsprojekte. Das Exposé und die Grobplanung der Promotion im 1. Jahr erscheint für die Novizen greifbar nah zu sein.



# Chronologie

# 6





Am Ende eines jeden Jahres blicken viele auf die vergangenen zwölf Monate zurück und lassen sie Revue passieren. Zum Ende unseres Jahresberichts möchten wir genau dies auch gemeinsam mit Ihnen aus der Perspektive des elenia machen. Auf den letzten Seiten haben Sie bereits viel über das Jahr 2019 am elenia erfahren: neue Mitarbeiter,

abgeschlossene und laufende Forschungsprojekte, Laborauf- und -umbauten, Neuigkeiten aus der Lehre und vieles mehr. Da ein ganzes Jahr häufig so viele Ereignisse mit sich bringt, die nicht alle im Detail darstellbar sind, zeigt die abschließende Chronologie noch einmal die wichtigsten Geschehnisse im Überblick.

# Das Jahr 2019 am elenia

**17.01.2019**

acatech AG-Sitzung (De-)zentrale Energieversorgung, Frankfurt  
Prof. Engel

**18.01.2019**

Exkursion Systemtechnik der Photovoltaik zu SMA Solar Technology, Kassel  
Prof. Engel, Winter, Studierende

**23.01.2019**

VDE Neujahrsempfang, Braunschweig  
Prof. Kurrat

**23.-25.01.2019**

Konferenz Batterieforum Deutschland, Berlin  
Brockschmidt, L.Hoffmann

**28.01.2019**

FKR (Fakultätsrat), Braunschweig  
Prof. Kurrat

**29.01.2019**

Mentorentreffen, Braunschweig  
Prof. Kurrat, Pronobis

**30.-31.01.2019**

Konferenz Zukünftige Stromnetze, Berlin  
Prof. Engel



**31.01.2019**

Niedersachsenteknikum, Braunschweig  
Wissenschaftliche Mitarbeitende

**08.02.2019**

BWG, Braunschweig  
Prof. Kurrat

**11.02.2019**

Promotion Marco Lindner, TU München, München  
Prof. Engel

**12.02.2019**

PV-Regel Abschlussworkshop, Kassel  
Osterkamp, Seidel, Prof. Engel, Rauscher, Reinhold

**13.-14.02.2019**

Klausur der Fakultät EITP, Wöltingerode  
Prof. Kurrat, Prof. Engel

**15.02.2019**

ETG-Vorstandssitzung, Frankfurt  
Prof. Engel

**18.02.2019**

Sonder-FKR, Braunschweig  
Prof. Kurrat



**19.02.2019**

EFZN-Forschungstag, Braunschweig  
Gesamtes Institut

**19.02.2019**

EFK Mitgliederversammlung, Braunschweig  
Prof. Kurrat

**20.02.2019**

HEV 2019 – Hybrid- und Elektrofahrzeuge, Braunschweig  
Prof. Engel

**20.02.2019**

Senat, Braunschweig  
Prof. Kurrat

**21.02.2019**

FNN-Infotags zur VDE-AR-N 4105, Kassel  
Prof. Engel, Marggraf, Biedermann

**22.02.2019**

EFZN-Aufsichtsrat/Beiratsitzung, LUH  
Prof. Kurrat

**25.-26.02.2019**

Erfahrungsaustausch Niederspannungsprüffelder, Braunschweig  
Peters, Klosinski, Prof. Kurrat



**26.02.2019**

Erfahrungsaustausch Prüffelder, Braunschweig  
Prof. Kurrat, B. Weber

**26.02.2019**

Kick-off-Meeting Neuausrichtung ETG-Fachbereich V1, Frankfurt  
Prof. Engel

**27.02.2019**

Externes Young Docs Treffen, Braunschweig  
Prof. Kurrat, Young Docs

**28.02.2019**

DFG-Rundgespräch: Elektr. Fliegen, Aachen  
Prof. Kurrat

**05.-15.03.2019**

Mitarbeiter-Feedback, Braunschweig  
Prof. Kurrat

**11.03.2019**

BMWi-Blindleistungskommission 3. Sitzung, Berlin  
Prof. Engel

**13.-14.03.2019**

DaLion 4.0 Kick-Off, Braunschweig  
Prof. Kurrat, L.Hoffmann

**14.03.2019**

Hauptstadtkonferenz Elektromobilität, Berlin  
Pronobis, Wussow

**14.03.2019**

NEDS-Quartalstreffen, Hannover  
Prof. Engel, Seidel, Reinhold

**18.03.2019**

Women of Wind Energy Deutschland Round Table, Braunschweig  
MHoffmann, Seidel, Brockschmidt, Pronobis

**18.-20.03.2019**PV-Symposium, Bad Staffelstein  
Prof. Engel**19.03.2019**Doktorprüfung O. Binder, Braunschweig  
Prof. Kurrat**21.03.2019**FNN Netzcamp, Berlin  
Prof. Engel**26.03.2019**NEDS Projektabschluss Symposium, Hannover  
Prof. Engel, Reinhold, Kahl, Herr, Seidel, Osterkamp**26.03.2019**EFZN-Vorstandssitzung, Hannover  
Prof. Kurrat**27.-28.03.2019**5. ProZell Forschungskolloquium, München  
Prof. Kurrat, Drees, LHoffmann**02.-04.04.2019**Konferenz Kraftwerk Batterie, Aachen  
Lienesch, Brockschmidt, Drees, LHoffmann**04.04.2019**BMWi-Blindleistungskommission, Sondertreffen Netzbetreiber, Berlin  
Prof. Engel**05.04.2019**Doktorprüfung Nijan Yogal, Braunschweig  
Prof. Kurrat**12.04.2019**IKTfree: KickOff, Oldenburg  
Prof. Engel, Rebak, Osterkamp**15.04.2019**FKR, Braunschweig  
Prof. Kurrat**02.05.2019**acatech AG-Sitzung (De-)zentrale Energieversorgung, Berlin  
Prof. Engel**04.05.2019**Feierliche Eröffnung des Megawatt-Leistungslabors des Fraunhofer ISE, Freiburg  
Prof. Engel**07.-08.05.2019**ETG Kongress, Stuttgart - Esslingen  
Prof. Engel, Pronobis, Reinhold, Ries, Biedermann, Di Modica, Wussow**14.05.2019**Schwerpunkttag, Braunschweig  
Prof. Kurrat, Prof. Engel, WiMi**20.05.2019**Q-Integral: KickOff, Braunschweig  
Prof. Engel, Merten Schuster, Hartmudt Köppe**21.05.2019**Exkursion zur BLB (Aufbau und Funktion von Speichersystemen), Braunschweig  
LHoffmann, Pronobis, div. Studierende**23.05.2019**elenia Open Research Day, Braunschweig  
Wiss. Mitarbeitende und Studierende**23.-24.05.2019**FNN-Fördererkreissitzung, Berlin  
Prof. Engel**27.05.2019**FKR, Braunschweig  
Prof. Kurrat**28.05.2019**BMWi-Blindleistungskommission, Berlin  
Köppe, Wussow**03.06.2019**BMWi-AG Systemsicherheit, Berlin  
Prof. Engel**04.06.2019**dena-Workshop Must-Run & Gesicherte Leistung, Berlin  
Prof. Engel**05.06.2019**6. Sitzung dena-Plattform Systemdienstleistungen, Berlin  
Prof. Engel**06.06.2019**BMWi-Blindleistungskommission, Berlin  
Prof. Engel**11.-13.06.2019**Pfungstexkursion, Amsterdam  
Kühn, Prof. Kurrat, Weber**17.06.2019**3. Doktorandentag der Battery LabFactory Braunschweig (BLB), Niedersächsisches Forschungszentrum Fahrzeugtechnik (NFF), Braunschweig  
Brockschmidt, Drees, LHoffmann, Rusanto**18.06.2019**Tagung Wissensaustausch PxC, Blomberg  
Prof. Kurrat**19.06.2019**Exkursion Elektrische Bahnen zu Dinghan SMART Railway Technology und Bombardier Lokomotivenwerk, Kassel  
Prof. Engel**19.06.2019**BLB Vollversammlung, Braunschweig  
Prof. Kurrat, Drees, LHoffmann**21.06.2019**NFF-Cup, Braunschweig  
Wissenschaftliche Mitarbeiter und Studierende**25.06.2019**Exkursion Energylabs (Aufbau und Funktion von Speichersystemen), Braunschweig  
Pronobis, LHoffmann, div. Studierende

**25.-26.06.2019**

2. Braunschweiger Energieseminare (10. Supraleiterseminar 2. Gleichstromseminar), Braunschweig  
MHoffmann, Hill

**26.06.2019**

Sitzung ETG FB V1 Zentrale und dezentrale Erzeugung, Frankfurt  
Prof. Engel

**28.06.2019**

VDE-Deligiertenversammlung, Kassel  
Prof. Engel

**29.06.2019**

TU-Night, Braunschweig  
Weber

**01.07.2019**

FKR, Braunschweig  
Prof. Kurrat

**02.07.2019**

Exkursion zur PTB (Aufbau und Funktion von Speichersystemen), Braunschweig  
Lienesch, LHoffmann, Pronobis, div. Studierende

**02.07.2019**

ETG/ITG-Vorstandsitzung, Frankfurt  
Prof. Engel

**03.07.2019**

Signing Cooperation: IDA Adm, Braunschweig  
Prof. Kurrat

**05.07.2019**

PV-Wind-Symbiose: Abschlusstreffen, Freiburg  
Prof. Engel, Hartmudt Köppe

**05.07.2019**

Studienseminar, Braunschweig  
Prof. Kurrat, Alija

**09.07.2019**

ETG-Fachbereichssitzung Q2, Frankfurt  
Prof. Kurrat

**10.07.2019**

ABB-Forschungszentrum, Schweiz  
Prof. Kurrat, Kühn

**12.07.2019**

50. Promotionsjubiläum, Braunschweig  
Prof. Kurrat

**17.07.2019**

Doktorprüfung Tobias Marseille, Braunschweig  
Prof. Kurrat

**14.08.2019**

FNN-Workshop Zielbild System 2030, Dortmund  
Prof. Engel

**19.08.2019**

Promotion Stephan Diekmann; Braunschweig, Prof. Engel

**26.-31.08.2019**

ISH Konferenz, Ungarn  
Kühn

**29.-30.08.2019**

AG-Klausur Energiesysteme, Braunschweig  
Arbeitsgruppe Energiesysteme

**04.09.2019**

7. Sitzung dena-Plattform Systemdienstleistungen, Berlin  
Prof. Engel

**04.09.2019**

Behördenstaffelmarathon, Braunschweig  
Wissenschaftliche Mitarbeiter

**05.09.2019**

U-Quality: KickOff, Braunschweig  
Prof. Engel, Cornelius Biedermann, Gian-Luca Di Modica, Till Garn

**09.-13.09.2019**

Symposium on Physics of Switching Arc, Nove Mesto na Morave, Czech Republic  
Alija, Peters, Weber

**11.09.2019**

KickOff DCind2, Lemgo  
Hill

**11.-12.09.2019**

6. ProZell Abschlusskolloquium, Braunschweig  
Prof. Kurrat, Drees, LHoffmann

**13.09.2019**

Promotion Wolfram Kruschel, Uni Kassel Kassel, Prof. Engel

**16.-19.09.2019**

AG Workshop Energietechnologien, Sächsische Schweiz  
Prof. Kurrat + AG ET

**18.09.2019**

EFZN: Vorstands- und Aufsichtsratssitzung, Hannover  
Prof. Engel

**19.09.2019**

FVV EIT, Braunschweig  
Prof. Kurrat

**23.09.2019**

IKT-Free: FNN-Expertenworkshop, Berlin  
Prof. Engel, Rebak

**25.09.2019**

Institutsworkshop am Energiecampus Goslar, Goslar  
Gesamtes Institut

**05.-10.10.2019**

International School on Low Temperature Plasma Physics: Basics and Applications, Bad Honnef  
Alija, Peters

**08.10.2019**

Doktorprüfung N. Hill, Braunschweig  
Prof. Kurrat

**11.10.2019**

BWG (Braunschweigische Wissenschaftl. Gesellschaft)-Plenarversammlung, Klassensitzung, Braunschweig  
Prof. Kurrat

**14.10.2019**

EMOB Integration Symposium, Dublin  
Prof. Engel, Wussow

**15.-16.10.2019**

Solar Integration Workshop, Dublin  
Prof. Engel

**16.-17.10.2019**

Grid integration Week, Dublin  
Prof. Engel

**21.-22.10.2019**

SDZ-Klausurtagung, Wöltingerode  
Prof. Kurrat

**21.-22.10.2019**

SE2A Research Conference,  
Kopp

**25.10.2019**

Absolventenfeier der Fakultät,  
Braunschweig  
Prof. Kurrat, Prof. Engel, Absolventen

**30.10.2019**

Promotion Daniel Unger; Braunschweig, Prof. Engel

**04.11.2019**

Digital Solar & Storage , Brüssel  
Prof. Engel

**04.-06.11.2019**

IBPC 2019 (International Battery Production Conference) ,  
Prof. Kurrat, Brockschmidt, Drees,  
LHoffmann, KRyll

**05.-06.11.2019**

Österreichische Fachtagung für Photovoltaik und Stromspeicherung, Wien  
Wussow

**06.11.2019**

FNN Forumssitzung, Berlin  
Prof. Engel

**06.-07.11.2019**

DaLion4.0 Projekttreffen , Braunschweig  
Prof. Kurrat, LHoffmann

**07.11.2019**

Doktorprüfung Martin Wunsch, RWTH Aachen  
Prof. Kurrat

**07.11.2019**

Promotion Georg Agenendt; RWTH, Aachen  
Prof. Engel

**11.11.2019**

FKR, Braunschweig  
Prof. Kurrat

**11.-12.11.2019**

NFF-Strategieworkshop, Wöltingerode  
Prof. Kurrat

**13.11.2019**

BMW-AG Systemsicherheit, Berlin  
Prof. Engel

**13.-15.11.2019**

Projekttreffen Netzregelung 2.0, Kassel  
Prof. Engel, Rauscher, Winter

**15.11.2019**

Besuch MPS Göttingen, Göttingen  
Prof. Kurrat, Präsidentin

**19.-20.11.2019**

Energietage, Wien  
Wussow

**21.11.2019**

Prof@Turntables, Braunschweig  
Prof. Engel, Diverse

**22.11.2019**

ETG-Vorstandsitzung, Frankfurt  
Prof. Engel

**25.11.2019**

Doktorprüfung Roesky, Braunschweig  
Prof. Kurrat

**26.-27.11.2019**

Fortbildung Novizen, Blomberg  
Prof. Kurrat, Anspach, Claaßen, T. Meyer, Peters

**26.11.2019**

FNN-Workshop Grid Booster - Multitool für die integrierte Energiewende, Berlin  
Prof. Engel, Winter

**29.11.2019**

Promotion Ole Marggraf; Braunschweig, Prof. Engel

**03.12.2019**

Q2 Hautversammlung, Frankfurt  
Prof. Kurrat

**03.-04.12.2019**

FNN-Kongress Netze, Nürnberg  
Prof. Engel

**05.12.2019**

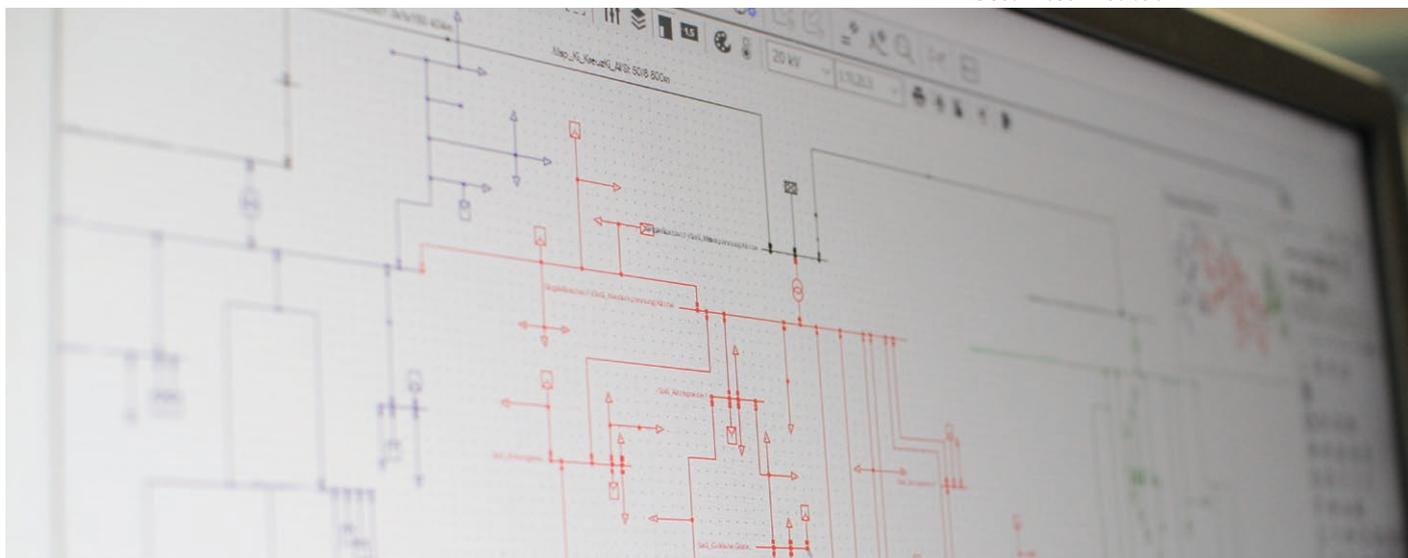
ETG/IZBE-Symposium Elektrische Ausrüstung von Schienenfahrzeugen, Dresden  
Prof. Engel

**16.12.2019**

FKR, Braunschweig  
Prof. Kurrat

**19.12.2019**

Weihnachtsfeier 2019, Braunschweig  
Gesamtes Institut



# Forschung



# Labore

# Portrait

# Chronologie

## Lehre



## Veranstaltungen

# Impressum

## Herausgeber



Technische Universität Braunschweig  
Institut für Hochspannungstechnik und Elektrische Energieanlagen - elenia  
Mühlenfordthaus 2.OG  
Schleinitzstraße 23  
38106 Braunschweig

Tel.: +49 (531) 391-7700

Fax.: +49 (531) 391-8106

E-Mail: [elenia@tu-braunschweig.de](mailto:elenia@tu-braunschweig.de)

Internet: [www.elenia.tu-bs.de](http://www.elenia.tu-bs.de)

## Redaktion

Henrik Herr, Julia Seidel, Florian Rauscher

## Layout und Gestaltung

Henrik Herr

## Bildnachweise

Seite 2-3, 6-7, 16-17, 60, 72-73, 88-89, 90 - Jonas Vogel (TU Braunschweig)

Seite 2, 14-15, 22, 24, 28, 36, 44, 46, 48-49, 54, 70-71, 74-76, 78 (rechts), 80, 82, 84-87, 91 (Cover),  
92-97, 100-101, 104-105 - Henrik Herr

Seite 77, 78 (links), 79 - Frederik Tiedt

Seite 3 (Einweihung eelabs) - Glassermann (TU Braunschweig)

Stand: 12/2019

Alle Rechte vorbehalten.

Die Nutzung steht unter dem Zustimmungsvorbehalt des elenia.



