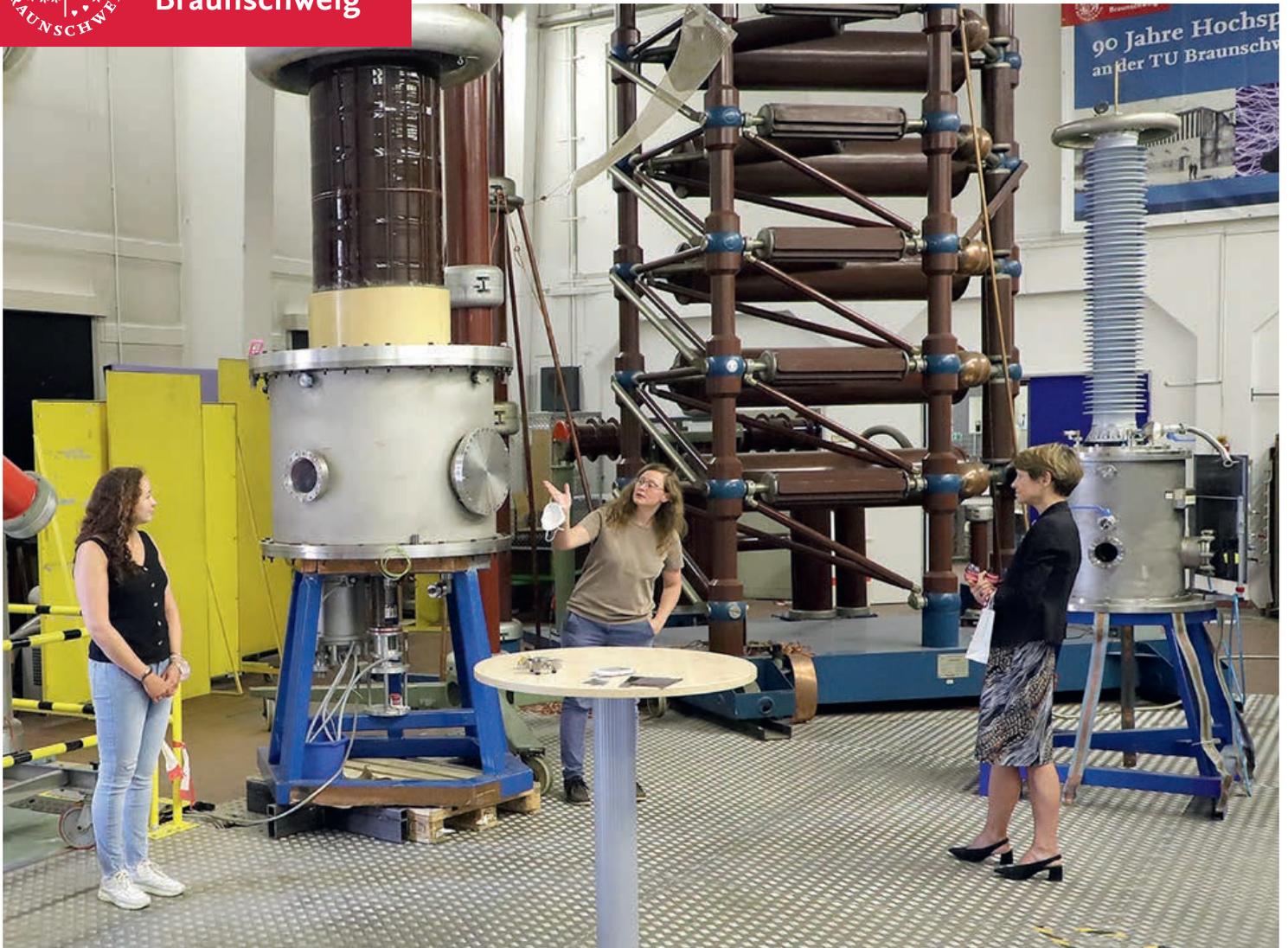




Technische
Universität
Braunschweig

elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Energiesysteme



Jahresbericht 2020/2021

elenia Institut für Hochspannungstechnik
und Energiesysteme

Jahresbericht **2020/2021**

**elena Institut für Hochspannungstechnik
und Energiesysteme**

elenia

Jahresrückblick	10
Aktuelle Besetzung	12
Ehemalige Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter	17
Studentische Hilfskräfte 2020/2021	17
Zahlen und Fakten	18
Werte und Ziele	18
Das Jahr in Zahlen	19
Schwerpunkt Komponenten	20
Schwerpunkt Aktives Verteilnetz	23
Schwerpunkt Elektromobilität	26
Wege zum elenia	30



Forschungsberichte

Team Batterietechnik	36
Team DC Systeme und Schaltgeräte	42
Team Hochspannungs- Plasma- und Vakuumtechnik	50
Team Energiewirtschaft und Energiemanagement	56
Team Netzbetrieb und Netzplanung	72
Team Netzdynamik und Systemstabilität	78



Promotionen

Kerstin Ryll	86
Christian Sander	87
Jonas Wussow	88
Julia Seidel	89
Frank Soyck	90
Björn Osterkamp	91
Sönke Rogalla	92
Carola Schierding	93
Christoph Klosinski	94
Benjamin Kühn	95
Olga Pronobis	96
Stephan Passon	97



Labore und Werkstätten

Batterietest-Labore	100
Blitzschutzlabor	103
DC-Demonstrationsnetzlabor	106
Gleichstromprüffelder	109
Hochspannungshalle	112
Isolierstofflabor	115
Kooperationslabor	118
Synthetisches Leistungsprüffeld	121
Energiemanagementlabor	124
Netzdynamlabor	127
Mechanische Werkstatt	132
Elektrotechnische Werkstatt	134
IT-Abteilung	136



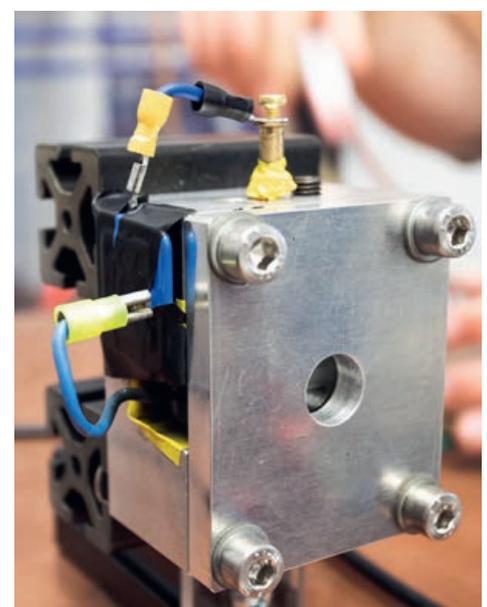
Lehre

Lehrveranstaltungen	140
Hochspannungsversuch Agumented Reality	144
Studentische Arbeiten 2020	146
Studentische Arbeiten 2021	149



Chronologie

Veröffentlichungen 2020	154
Veröffentlichungen 2021	156
Veranstaltungen und Events	158
Beteiligung an der Selbstverwaltung 2020	162
Beteiligung an der Selbstverwaltung 2021	163
Impressum	164



Vorwort

Liebe Leserschaft,

nach zwei Jahren melden wir uns als „elenia Institut für Hochspannungstechnik und Energiesysteme“ wieder. Die vielen positiven Rückmeldungen in den letzten Jahren haben uns ermutigt, den Institutsnamen anzupassen und damit die fast hundertjährige Tradition zu wahren, aber auch die neuen Herausforderungen durch die Systemtechnik zu adressieren. Für den Zweijahresbericht haben wir das neue Format beibehalten und die vielen Informationen mit Hilfe einer Agentur aufbereitet. Im Jahresrückblick beschreiben wir ausführlich die Veränderungen im Institut in den letzten zwei Jahren, die nicht zuletzt auch von der Pandemie beeinflusst wurden.



Michael Kurrat

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



Bernd Engel

Vor allem bieten wir mit dem Bericht wieder eine Austauschplattform für unsere engagierten Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, um ihre Ideen und Ergebnisse mit der Fachwelt und der Gesellschaft teilen zu können. Dabei hinterlegen wir alle Artikel mit Kontakten, um den Gedankenaustausch zu vereinfachen. Wir ermutigen alle, diese Kontakte zu nutzen und nach dem nun absehbar erscheinenden Ende der Pandemie wieder verstärkt in den Dialog einzutreten.

Für den Herbst 2022 planen wir eine Neuauflage unseres Symposiums, damit sich Ehemalige, Freunde und Freundinnen sowie Partnerfirmen im bekannten Rahmen treffen und austauschen können.

Wir wünschen viel Spaß beim Durchblättern unseres Berichts und freuen uns auf ein Wiedersehen in Präsenz in 2022.

Bernd Engel, Michael Kurrat

BRAUNSCHWEIG, IM SEPTEMBER 2021





elenia

Jahresrückblick	10
Aktuelle Besetzung	12
Ehemalige Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter	17
Studentische Hilfskräfte 2020/2021	17
Zahlen und Fakten	18
Werte und Ziele	18
Das Jahr in Zahlen	19
Schwerpunkt Komponenten	20
Schwerpunkt Aktives Verteilnetz	23
Schwerpunkt Elektromobilität	26
Wege zum elenia	30

Jahresrückblick

Zwei Jahre elenia unter dem Einfluss der Pandemie. Von jetzt auf gleich veränderte sich 2020 das Leben, auch an unserem Institut.

Keine Vorlesungen und Übungen mehr in Präsenz. Virtuelle Besprechungen mit den Mitarbeiter*innen und Studierenden über das Internet. Keine Besuche von Projektpartner und keine Konferenzen mehr. Umso erstaunlicher, dass die digitale Welt uns vieles weiterhin ermöglicht hat und wie schnell wir uns alle in der neuen Situation zurechtgefunden haben.

Aber der Aufwand war enorm und wir alle stießen immer wieder an unsere Grenzen. Vorlesungen und Übungen mussten in Zusatzarbeit, am Wochenende und im Urlaub, fristgerecht umgestellt werden. Die Informationstechnik wurde angepasst und erweitert. Die ständige aktuelle Information aller Mitarbeiter*innen und Studierenden stand plötzlich im Mittelpunkt.

Einige haben gehofft, dass nach einem Semester alles wieder beim alten sein würde. Doch unsere Forschenden aus dem Schwerpunkt Infektionen und Wirkstoffe hatten uns früh vor den Infektionswellen gewarnt. Dies auch öffentlich in den Medien.

Die lange Dauer der Einschränkungen hat zu vielen Verwerfungen geführt: Studierende, die neu an der Universität angefangen haben und noch nie das normale studentische Leben kennenlernen konnten oder Mitarbeiter*innen, die nach ihrer Einstellung ein virtuelles Institut vorfinden. Wir alle haben in den letzten Monaten das tägliche Institutsleben und die Gelegenheiten für einen persönlichen Austausch mit Studierenden und Forschungspartnern schmerzlich vermisst.

Zum Glück konnten wir im Sommersemester 2020 auf die neue Teamstruktur mit Teamleiter*innen umstellen. Diese ersetzen thematisch die bisherigen Forschungsgruppen und bilden nun eine flache Organisationsstruktur mit guter organisatorischer Betreuung der Forschenden durch die Teamleiter*innen. Für die Organisation der institutsweiten, gemeinsamen Arbeit und die Interessen der Institutsmitglieder tritt weiterhin unser bewährtes Project Management Office (PMO) ein. Gerade in Pandemiezeiten mit dem hohen Informationsbedarf hat sich diese Struktur aus Institutsleitung, Teamleitungen, und PMO positiv bemerkbar gemacht.

Nach vielen Jahrzehnten hat die TU eine Aktualisierung aller Institutsordnungen eingefordert. Diese Gelegenheit haben wir genutzt zur Darstellung unserer neuen Organisationsstruktur und zukünftigen Aufgaben in Forschung und Lehre.

Aufgrund der positiven Resonanz haben wir das Institut nun offiziell in „elenia Institut für Hochspannungstechnik und Energiesysteme“ umbenannt. Mit der Bezeichnung „Hochspannungstechnik“ wahren wir die fast hundertjährige Tradition und mit „Energiesysteme“ adressieren wir die neu-

»Lösungen für die großen gesellschaftlichen Herausforderungen mit den Möglichkeiten der Digitalisierung

en systemtechnischen Herausforderungen in der Energieversorgung. Wir bilden damit im Energiebereich den Eckpfeiler für die Strategie unserer Fakultät: Lösungen für die großen gesellschaftlichen Herausforderungen mit den Möglichkeiten der Digitalisierung zu erarbeiten und anzubieten.

In der neuen Geschäftsordnung haben wir unsere flache Organisationsstruktur beschrieben. Hervorzuheben ist der Vorstand, der sich aus Vertreter*innen aller Institutsmitglieder zusammensetzt und zukünftig die Geschicke des elenia lenkt. Dazu haben wir uns viel Zeit genommen und in Workshops und Abstimmungsprozessen diese Geschäftsordnung erarbeitet.

Bei allen Kommunikationsprozessen mit den Studierenden und Mitarbeitenden hat in der Pandemie die persönliche Ebene enorm gelitten. Deshalb haben wir die Sommermonate genutzt, um unter Einhaltung der Hygieneregeln unsere Institutsveranstaltungen in Präsenz auf Arbeitsgruppenebene wiederzubeleben.

Forschungsthemen und Zufriedenheit der Institutsmitglieder standen auf der Agenda. Zusätzliche digitale Angebote bieten Gruppenevents für neue Mitarbeiter*innen, um sich gegenseitig kennenzulernen, Forschungsmethoden zu erarbeiten und konkrete Promotionsthemen auszuarbeiten. Trotzdem haben die starke Suche nach Fachkräften und der Ergebnisdruck, unter den erschwerten Bedingungen der Pandemie, auch einige

Doktorand*innen dazu bewegt, unser Institut ohne Promotion verlassen. Wir bedauern das sehr, verstehen aber die Beweggründe und wünschen allen viel Erfolg für den weiteren Lebensweg.

Für die Studierenden bieten wir auf Fakultätsebene verstärkt Mentorentreffen an und ein neues Format zusammen mit dem VDE Braunschweig „Prof.Date“ für das Eintauchen in die Wissenschaftswelt an einer Universität.

Punkten konnten wir auch mit unserer Infrastruktur. Die kontinuierliche Instandhaltung des Mühlenpfordthauses und die Investitionen in neue Labore haben uns auch in dieser Zeit geholfen. Durch die weitsichtige Planung der Laborräume bei der Institutsgründung konnten wir trotz der Hygieneregeln den Laborbetrieb weiter ausbauen und unsere Projekte erfolgreich bedienen. Dazu waren auch zahlreiche Personaleinstellungen erforderlich und unsere neuen Institutsmitglieder stellen wir in der aktuellen Besetzung in diesem Bericht vor. Wir begrüßen alle recht herzlich und wünschen viel Erfolg und Freude. Erfreulicherweise konnte die Energietechnik auch aus den Mitteln der Exzellenzcluster eine Junior Research Group einwerben, die den wissenschaftlichen Karriereweg stärkt. Die zukünftige Gruppe „Wiring Technologies“ erforscht die Möglichkeiten eines elektrischen Bordnetzes für rein elektrisch betriebene Flugzeuge.

Auch das Hochspannungspraktikum konnten wir weiterhin durchführen, denn Sicherheitsabstände sind für Hochspannungstechniker nichts neues. Der Ausbau und die Einrichtung von neuen Räumen für die Elektrotechnische Werkstatt, für die Informationstechnik und von zusätzlichen digitale Lernarbeitsplätze für die Studierende kam gerade richtig und wird dringend benötigt.

Unser Elan der Erneuerung wird finanziell allerdings gebremst. Mit den finanziellen Unterstützungen des Landes für die

Wirtschaft, wurde uns auch früh bewusst gemacht, dass die nächste Einsparwelle die Universitäten in Niedersachsen wieder treffen wird. Die globale Minderausgabe hört sich harmlos an, stellt aber eine drastische Mittelkürzung wie in früheren Jahren dar. Der Reflex, über alle Bereiche zu kürzen, auch in den zukunftsträchtigen, ist in Niedersachsen leider immer noch vorhanden.

Alles in allem waren die beiden zurückliegenden Jahre für die Weiterentwicklung des elenia wichtig. Neben den harten Einschränkungen haben wir auch viele neue Erkenntnisse und Einsichten im Miteinander und in unseren Beziehungen gewonnen. Wir hoffen darauf, dass wir die Pandemie gemeinsam gesund und gestärkt überwinden. Dafür werden wir uns weiter einsetzen und bedanken uns bei allen Mitgliedern von Institut, Fakultät und TU für den Zusammenhalt und das Engagement und bei allen Studierenden und Forschungspartnern für den Zuspruch und die Unterstützung.

»Die nächste Einsparwelle wird die Universitäten in Niedersachsen wieder treffen

Aktuelle Besetzung



Prof. Dr.-Ing. M. Kurrat
Geschäftsführende Leitung



Prof. Dr.-Ing. B. Engel



Dr.-Ing. E. Wilkening



J. Schmidt



P. Thiele



E. Droemer



R. Drees
Teamleitung



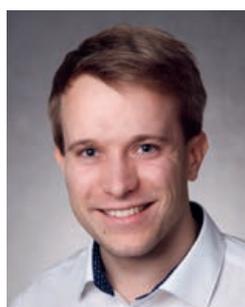
L. Hoffmann



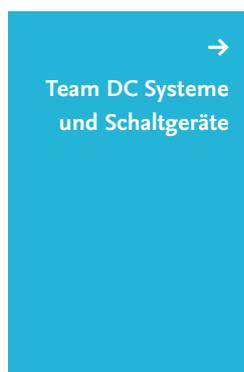
F. Katschewitz



T. Jennert



D. Kehl



M. Hoffmann
Teamleitung



F. Anspach
Teamleitung



D. Bösche



L. Claaßen



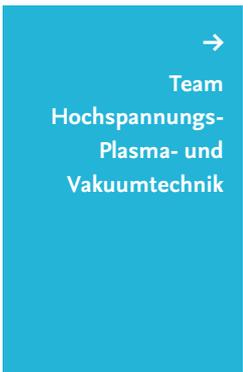
T. Kopp
Arbeitsgruppenleitung



M. R. Lotz



P. Vieth



B. Weber
Teamleitung



E. Peters
Teamleitung



M. Alija



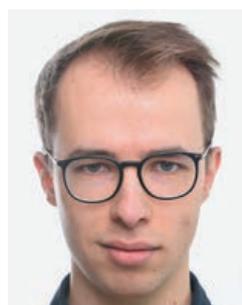
K. Flügel



T. Meyer



M. Kahn



F. Klabunde
Teamleitung



J. Essers



M. Hadlak



L. Kahl



M. Lüdecke



C. Reinhold



J. Ries



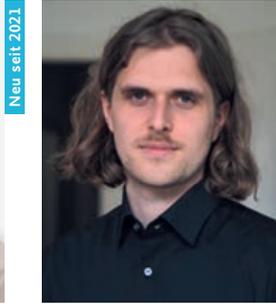
Dr.-Ing. F. Soyck
Arbeitsgruppenleitung



H. Wagner



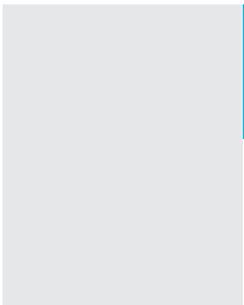
C. Wegkamp



J. Studt



S. Klöpping



E. Nies



Dr.-Ing. J. Wussow
Arbeitsgruppenleitung



C. Biedermann



W.-Y. Choi



L. Ebbert



T. Garn



N. Gräfer



H. Köppe



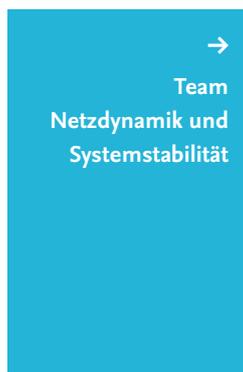
G.-L. Di Modica



M. Schuster



R. Hermann



E. Rebak
Teamleitung



M. Qudaih



F. Rauscher



F. Tiedt



B. O. Winter



T. Sauer



S. Walujski



F. Scholz
IT-Leitung



L. Oppermann
IT-Administration



K. Rach
Werkstattleitung



F. Haake



J. Musebrink

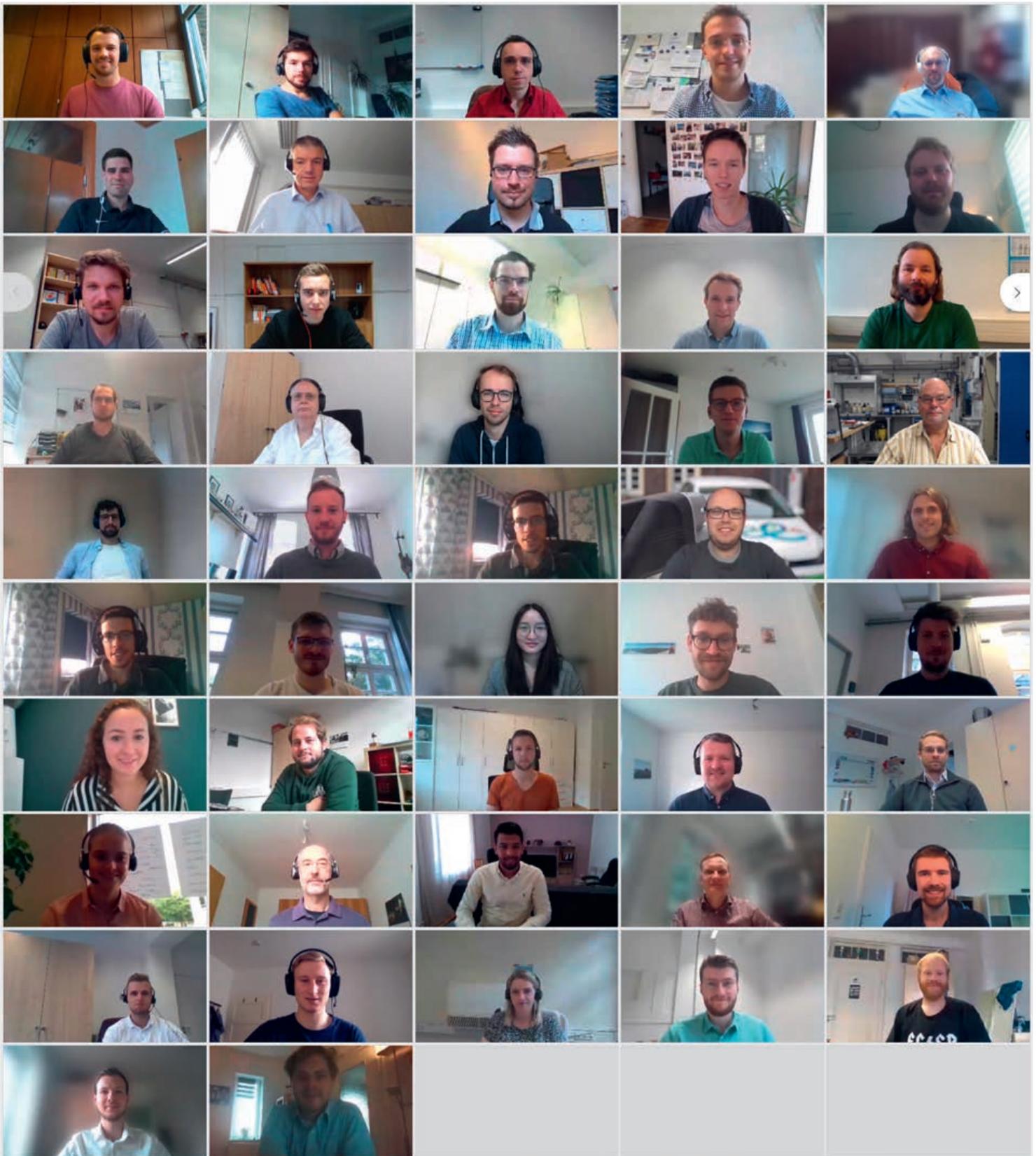


C. Narup



C. Ryll
Werkstattleitung

Statussitzung September 2021



Ehemalige Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter

Vielen Dank für euer Mitwirken und alles Gute auf euren Wegen.

Julia Brockschmidt (2020), Stefanie Čelan (2020), Jan Hegerfeld (2021),
Nicholas Hill (2020), Benjamin Kühn (2020), Sören Meyer (2021),
Olga Pronobis (2021), Kerstin Ryll (2020), Carola Schierding (2021),
Julia Seidel (2020), Alessa Damrath (2020), Reinhard Meyer (2020),
Henrik Herr (2021), Louisa Hoffmann (2021), Fabian Katschewitz (2021),
Oliver Landrath (2021), Daniel Kehl (2021)

Studentische Hilfskräfte 2020/2021

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

Mariam Al Mostarihi, Dmitry Bardachev, Max Brüggemann, Jonas Biniek, Jens Brüggemann, Ahmed Cherni, Gaseng Chung, Steffen Clausen, Ayan Roy Chowdhury, Serkan Cokgün, Wai-Yee Choi, Fatih Demircan, Julien Essers, Lisa Ermer, Robin Eßling, Lenard Faber, Tarek Fansa, Felten Feldt, Kexin Gao, Joel Gerig, Garsan Gengatharan, Ilja Gitin, Hendrik Grafelmann, Timo Haakert, Nick Hammer, Nils Hartau, Franziska Harstrick, Ahmed Hassanin, Luca Himstedt, Robin Herman, Justin Herdegen, Levin Chee Xian Ho, Ian Oswald Jannasch, Jan Jäger, Maik Kahn, Charu Kabbalagerepura Venkatesh, Abdalbaki Kocabasa, Felix Korff, Gloria Krefft, Andrii Kostrytsia, Julius Kohlhepp, Heiko Köhler, Hendrik Kösjan, Demian Kufeld, Jan Krüger, Chris Lütge, Thanh Mai, Nils Menebröker, Kamyab Moayedi, Behrooz Moeilsiahrodkoloai, Johanna Meier, Navilarekal-Rojgopal, Sönke Niemann, Kai Neumann, Frederike Paul, Christopher Prange, Ann-Katrin Rabe, Alexander Rahn, André Rehbock, Nils Reinköster, Anton Ribel, Felix Reimers, Yifan Shi, Siddharth Singh, Mike Skroch, Lei Song, Julian Studt, Rene Schilling-Johnson, Chris Aaron Schneider, Daniel Swientek, Kevin Schiemenz, Victor Schnell, Julian Schwung, Lia Stücke, Alexandros Themelis, Kenan Torunoglu, Nils Van Ohlen, Kristina von Kölln, Patrick Vieth, Vijesh Vidhani, Stefanie Walujski, Arnold Walker, Julian Wehr, Chao Wei, Meng Wang, Stefan Wever, Emil Weymann, Ji Wu, Zexuan Xu, Till Zeumer, Fanke Zeng, Hejie Zhu, Tianshui Yu

Zahlen und Fakten

Werte und Ziele



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

Das Jahr in Zahlen

Menschen

2 Professoren 

1 Akademischer Oberrat 

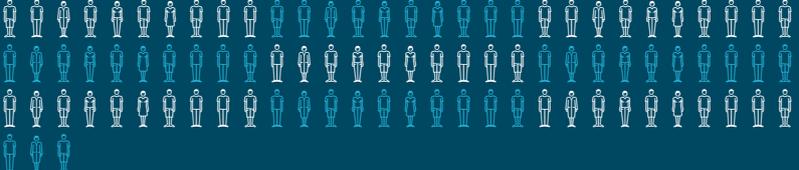
3 Mitarbeitende der Geschäftsstelle 

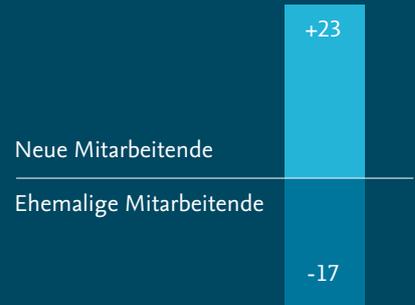
6 Lehrbeauftragte 

5 Mitarbeitende in mech. und elek. Werkstatt 

2 Mitarbeiter in der IT 

49 Wissenschaftliche Mitarbeitende 

93 Studentische Hilfskräfte 



Standort

Braunschweig (Niedersachsen)
seit 1925



Braunschweig

1 Universität
6 Fakultäten
84 Studiengänge
120 Institute
2045 Wissenschaftler
18.566 Studierende

DEUTSCHLAND

Studentische Arbeiten



Bachelor

16 (2020) 

25 (2021) 

Master

31 (2020) 

33 (2021) 

Studienarbeiten

6 (2020) 

4 (2021) 

Lehre



■ Vorlesungen
■ Praktika



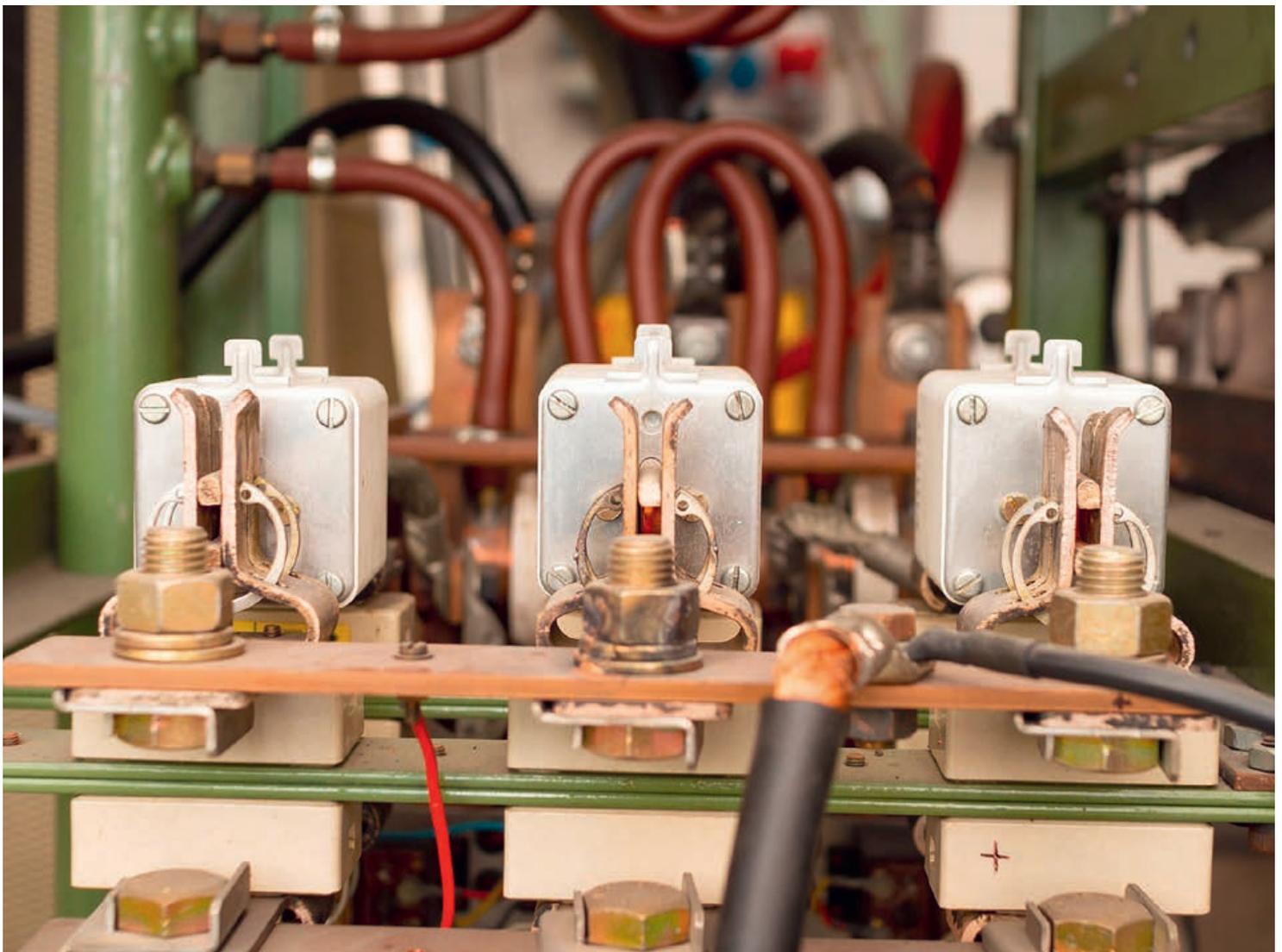
Schwerpunkt Komponenten

Technologien und Methoden für effiziente Energieversorgung und den zuverlässigen Betrieb innovativer AC und DC Systeme

Für die Schwerpunktstrategien der Stadt der Zukunft und deren Mobilität an der TU Braunschweig müssen auch die Technologien der Energietechnik einen Wandel erleben. Das elenia stützt diesen Wandel durch die Entwicklung von Methoden für Komponenten und deren Netzintegration, die die Anforderungen eines flexiblen und klimafreundlichen Energieübertragungssystems erfüllen. Dabei werden in unseren Teams von der Systemebene bis zu den Bauelementen verschiedene Aspekte der Energienetze untersucht.

Auf der Systemebene sind die DC Systeme, deren Aufbau und Schutzsystem im Fokus. Dabei werden auch Isoliersysteme im

Hochvoltbordnetz untersucht. Die Komponentenebene befasst sich mit der Untersuchung von Mittel- und Hochspannungsleistungsschaltern und DC-Schaltern. Dabei werden methodisch die Schaltplasmavorgänge modelliert, um eine Weiterentwicklung durch das Verständnis physikalischer Grundlagen zu ermöglichen. Unsere motivierten Teams verfolgen je nach Ebene individuelle Ziele, die in Projekten gemeinsam mit Partnern in Forschung und Industrie umgesetzt werden.



DC-Systeme

Von den Übertragungsstrecken Nord- und Süd-Link über industrielle Produktionsstraßen bis zum Hausnetz werden DC-Systeme immer populärer. Die Vermaschung mit den benötigten intelligenten Schalt- und Schutzsystemen sind die größten Herausforderungen für die Etablierung dieser Systeme.

Die Schutzsysteme bestehend aus Sensoren und Schaltgeräten sind für sichere DC-Systeme elementar und daher ein wesentlicher Bestandteil gegenwärtiger Forschungsprojekte am elenia. Der treibende Fakt ist die hohe Effizienz und die Zuverlässigkeit der Energieübertragung. Für den Transport von erneuerbaren Energien sind HGÜ-Trassen schon Gegenstand der öffentlichen Diskussion. Aktuelle Forschungen beschäftigen sich mit der optimierten Auslegung von HGÜ-Netzen mittels Model Based Systems Engineering. Am elenia wird zurzeit eine Methode entwickelt, welche die Anforderungen zahlreicher Stakeholder an das System berücksichtigt. Im Bereich Nieder- und Mittelspannung ist ein DC-Demonstratorsystem aufgebaut worden.

Die Untersuchungen konzentrieren sich auf die effiziente Charakterisierung der Fehler im DC-Netz mittels Design of Experiments, sowie intelligente Schutzsysteme und Schaltgeräte. Auf Grund der hohen Transienten von DC-Netzen im Vergleich zu AC sind neue Schutzkonzepte notwendig. Nicht nur die schnelle Fehlerortlokalisierung, sondern auch die zeitnahe Fehlerbeseitigung ist entscheidend. Deshalb werden Methoden erforscht, um intelligente Schaltgeräte, welche auf den Fehlerzustand reagieren, zu entwickeln.

Hochspannungs- und Vakuumtechnik

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 Vakuum-schaltprinzip hervorragend geeignet. Die Entwicklungsziele sind daher auf die Verbesserung der Schaltperformance bei hoher Lebensdauer und kompakter Bauweise

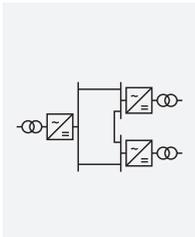
ausgerichtet, dies auch vor dem Hintergrund der Ersatzbestrebungen von SF6-Schaltern in der Hochspannungsebene wegen des hohen Treibhausgaspotentials von SF6. Damit wird das Schaltverhalten im Vakuum für höhere Spannungen und damit bei größeren Schaltstrecken zum aktuellen Untersuchungsgegenstand.

Im Hochvoltbordnetz sind besonders die Isolierstoffe im Forschungsfokus des elenia. Neben der nachhaltigen Produktion und Wiederverwertbarkeit am Lebensdauerende müssen neue Belastungen durch die Anforderungen im Bereich der Elektromobilität erforscht werden. Hierzu steht das elenia in einem regen Austausch mit der PTB und dem Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen (IMAB) mit dem Ziel gemeinsamer Forschungsprojekte für die Digitalisierung in der Isolierstoffforschung.

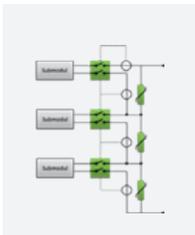
Plasmatechnik

Die Sicherheit der innovativen Systeme hängt von der Zuverlässigkeit der einzelnen Komponenten und deren Fähigkeit auftretende Plasmen zu kontrollieren ab. Die Plasmeeigenschaften werden in verschiedenen Anforderungen im elenia experimentell und simulativ untersucht. Die Plasmasimulationen unterstützen auf höchstem Detailgrad die experimentelle Forschung, um Materialdaten bereitzustellen und Erklärungsansätze für die Modellerstellung zu nutzen. Im Bereich der Blitzschutzforschung können Modell-Funkenstrecken als Blitzschutzgeräte unter Stoßstrombelastung mit angeschlossenem Netz oder synthetischen Schaltungen untersucht werden.

Sowohl für DC-Schaltgeräte als auch für Blitzschutzgeräte liegt aktuell der Fokus auf der Entwicklung von modellbildenden Methoden zur Beschreibung der Wiederverfestigung. Bei den DC-Schaltgeräten steht der Hybridschalter im Mittelpunkt, da sie als zukünftig universelles Schaltergerät ein breites Spektrum an Aufgaben übernehmen können. Die Methodenentwicklung basiert auf der Verknüpfung von experimentellen und optischen Hochgeschwindigkeitsaufnahmen. Hier arbeiten wir interdisziplinär mit allen Teams zusammen, um eine Basis zu schaffen, die visuellen Daten aufzubereiten und zu analysieren.



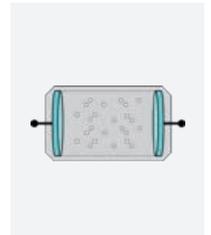
HGÜ Netze



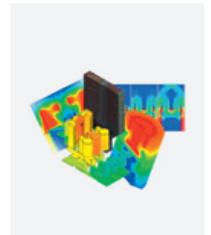
Fehlerdetektion



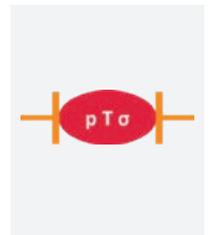
Schalterentwicklung



Isolierstoffcharakterisierung



Modellbildung und Simulation



Modellbildung und Simulation

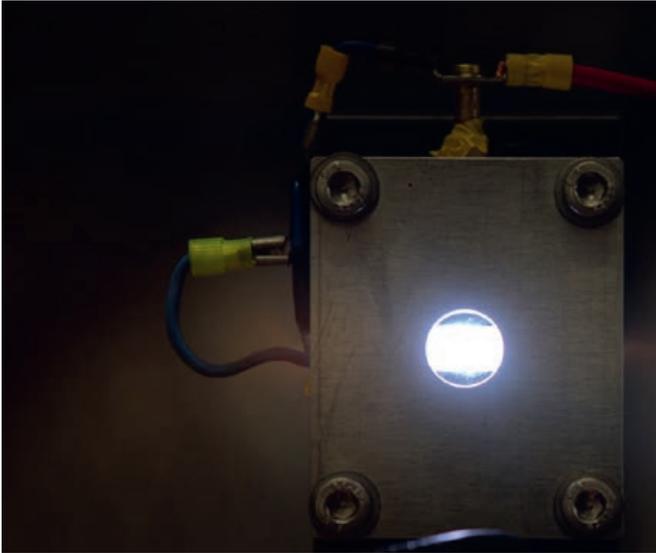


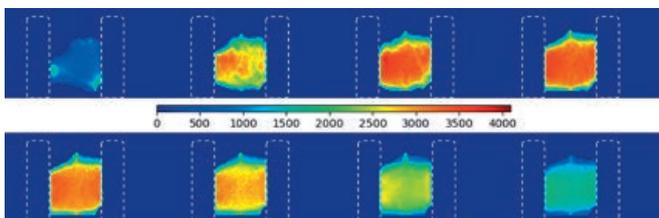
Foto: Max Fuhrmann/TU Braunschweig

Technologien und Digitalisierung

Das elenia entwickelt seit Jahren gesicherte wissenschaftliche Grundlagen für die Forschung an Komponenten der Energieversorgung. Hier wandeln sich die Ansprüche durch die digitale Entwicklung und internationalen Communities. Hochwertige Ergebnisse alleine auszuwerten ist nicht genug, um den Fortschritt und energietechnischen Wandel zu fördern. Deswegen entwickelt sich der Schwerpunkt auch stetig weiter. Neben der bestehenden hochpräzisen Messtechnik und den teils einzigartigen Laboren werden nicht mehr nur Komponenten betrachtet, sondern die Komponenten in ihren Systemen. Dabei werden Methoden des Model Based Systems Engineering angewandt und Labore durch (Power-) Hardware-in-the-Loop-Systeme erweitert.

Dadurch legen wir die Grundsteine für Anforderungsmanagement und Modellierung unserer einzelnen Anwendungsbereiche. Das Ziel ist eine intelligente Datenverarbeitung aus Datenbanksystemen und die Überführung in physikalisch fundierte Modelle. Diese können dann je nach Anwendung als Vorhersage- oder Entscheidungsmodelle verwendet werden. Im Bereich der DC-Systeme können so Fehler durch Online-Sensorik effizienter erkannt werden. Bei der Schaltertechnik werden potentielle Ausfälle frühzeitig erkannt und vermieden (predictive maintenance). Im Bereich der Isolierstoffe und Plasmatechnik werden diese Modelle in einen digitalen Zwilling überführt und sparen somit Entwicklungszyklen durch detaillierte Kenntnisse der prognostizierten Zustände.

Als Beispiel für die Digitalisierung aus der Plasmatechnik dient unser am elenia entwickelter Bildverarbeitungsalgorithmus. Dieser ermöglicht es uns die mittels Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommenen Daten deterministisch und reproduzierbar zu verarbeiten.



Bildserie eines Blitzstoßstromimpulses (10 kA)

Hier dargestellt ist eine ausgewählte Serie einer Funkenstrecken-Modellanordnung, die während eines Blitzstoßimpulses mit einer Stromstärke von 10 kA aufgenommen wurde. Die Aufnahmen sind durch ein Entfernen von Rauschen optimiert. Weiterhin sind die originalen schwarz-weiß Aufnahmen in eine Farbskala entsprechend der Digitalwerte übersetzt. Diese zusätzliche visuelle Möglichkeit der Beobachtung von Schalterplasmen bietet uns viele Möglichkeiten hinsichtlich zukünftiger Datenauswertungen. Es lassen sich beispielsweise Strompfade durch die intensive Leuchterscheinung in DC-Schaltgeräten kenntlich machen oder ein 3D-Bewegungsprofil von Plasmen in Vakuumschaltern erstellen. Dadurch können bestehende Beschreibungs- und Analysemodelle mit zusätzlichen visuellen Daten sinnvoll erweitert werden.

Die Bemühung ist stets neue Modelle zu entwickeln, durch präzise Messungen zu verifizieren und nachhaltig zu verwalten. Damit vereinen wir die grundlagenorientierte Energietechnik mit modernen digitalen Systemen.

SCHWERPUNKTMENTOR



Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat

✉ m.kurrat@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391-7735

SCHWERPUNKTLEITUNG



Benjamin Weber

✉ benjamin.weber@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391-7771

WEBSITE

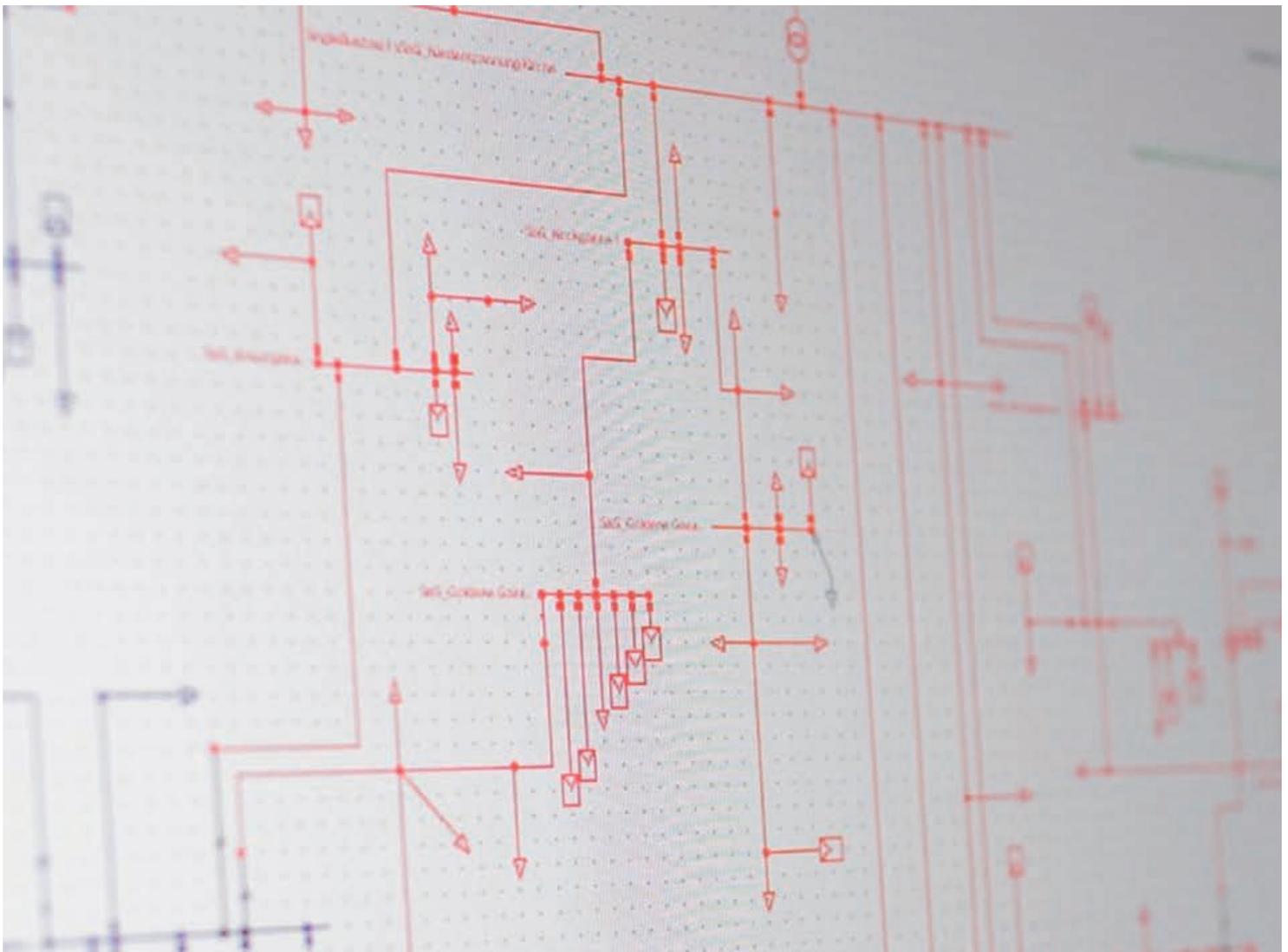
www.tu-braunschweig.de/elenia/forschung/komponenten-der-energieversorgung

Schwerpunkt Aktives Verteilnetz

Innovative technische und wirtschaftliche Lösungen zum stabilen Netzbetrieb und zur Flexibilisierung

Die Energiewende bringt eine Vielzahl von (regelungs)technischen und wirtschaftlichen Herausforderungen mit sich, aus denen ein großer Forschungsbedarf resultiert. Als wesentlicher Erfolgsfaktor der Energiewende kann aus heutiger Sicht ein intelligentes Stromnetz gesehen werden, welches Verbraucher, Erzeuger, Speicher und Netzbetriebsmittel miteinander vernetzt und steuert. Dieses sogenannte „Aktive Verteilnetz“ stellt als einer von drei Schwerpunkten ein zentrales Forschungsfeld des elenia Institutes für Hochspannungstechnik und Energiesysteme der TU Braunschweig dar. Darin werden viele

verschiedene Themen in Bezug auf die zukünftige Rolle des Verteilnetzes bearbeitet. Innerhalb des Schwerpunktes „Aktives Verteilnetz“ werden sowohl technische als auch wirtschaftliche Fragestellungen betrachtet. Dadurch wird die Energiewende vom elenia aktiv mitgestaltet und Empfehlungen zu sinnvollen Gesamtkonzepten entwickelt. Der Schwerpunkt Aktives Verteilnetz setzt sich aus drei Teams mit individuellen Forschungsbereichen zusammen.



Netzdynamik und Systemstabilität

Das Team Netzdynamik und Systemstabilität besteht aus fünf wissenschaftlichen Mitarbeitern und zwei Laboringenieuren, die innerhalb des Teams unterschiedliche Schwerpunktthemen bearbeiten. Zum einen wird an der Integration von spannungseinprägenden Wechselrichtern in das Verteilungsnetz geforscht. In diesem Kontext liegt zum einen der Fokus auf die Bereitstellung von Momentanreserve und deren Wirkungsweise auf die überlagerten Netzebenen mit dem Ziel, den Beitrag dieser Umrichtersysteme zur Stabilisierung des Versorgungsnetzes im Falle schneller Laständerungen in Netzen mit verringertem Anteil von Einspeisung aus Großkraftwerken zu untersuchen. Zum anderen wird sich innerhalb des Teams mit der Fragestellung beschäftigt, wie Komponenten zur Bereitstellung von Flexibilität netzdienlich und wirtschaftlich eingesetzt werden können. Konkret geht es dabei um neuartige Pumpspeicherkraftwerke, die im Flachland eingesetzt werden. Die dadurch gewonnene Speicherflexibilität führt zu der Frage, wie und welche Systemdienstleistungen dadurch bereitgestellt werden können?

Darüber hinaus wird am Thema einer Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) Fall-Back Strategie geforscht. Da im Verteilnetz der Zukunft viele dezentrale Netzteilnehmer wie erneuerbare Energien, Elektrofahrzeuge, Speicher und regelbare Lasten angeschlossen sein werden, bedarf es für einen feingranularen Systemaufbau eine IKT-Schnittstelle, die diese miteinander vernetzt. Die gepoolten Netzteilnehmer übernehmen dabei Systemdienstleistungen, die zu einer sicheren und stabilen Stromversorgung beitragen. Doch was passiert, wenn die IKT der Netzteilnehmer ausfällt? Hier gilt es, eine geeignete Fall-Back Strategie zu entwickeln, bei der diese auch bei einem Kommunikationsausfall zur Netzstabilität beitragen.

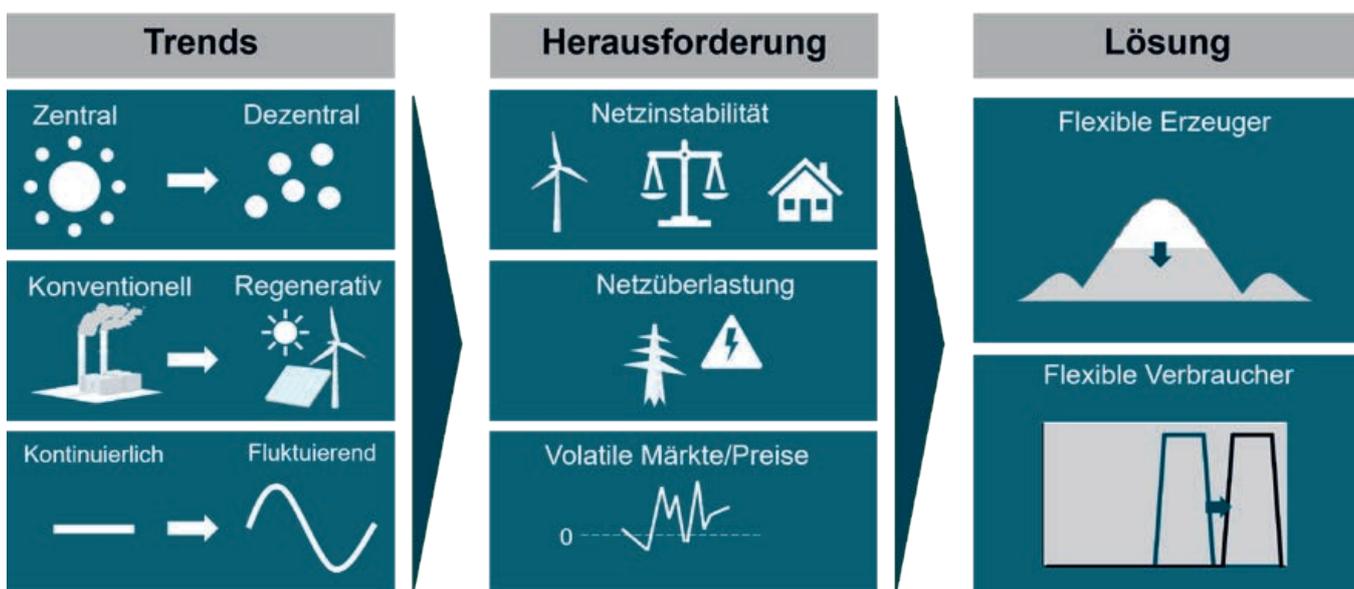
Netzbetrieb und Netzplanung

Das Team Netzbetrieb und Netzplanung hat seinen Fokus auf Spannungshaltung und Spannungsqualität.

Der Bereich der Spannungshaltung umfasst die dezentrale Blindleistungsbereitstellung von einzelnen PV-Anlagen oder Elektrofahrzeugen auf Basis von Netzanschlussbedingungen zur lokalen Spannungshaltung bis hin zu einem aktiven Blindleistungsmanagement, welches spannungsebenen- sowie netzbetreiberübergreifenden Betriebskonzepten umfasst.

Im Vordergrund der Forschung steht die Integration und aktive Steuerung von umrichtergekoppelten erneuerbaren Energieanlagen (EEA) innerhalb von bestehenden Blindleistungsmanagementsystemen. Im BMWi-Forschungsprojekt PV-Wind-Symbiose wurde bereits gezeigt, dass EEA eine Alternative und Ergänzung zur Errichtung von Blindleistungskompensationsanlagen im Blindleistungsmanagement darstellen. Die Forschungsergebnisse zeigen, dass sich mit der aktiven Einbindung von EEA neben den technischen und wirtschaftlichen Vorteilen auch volkswirtschaftliche Vorteile ergeben können. Im Nachfolgeprojekt Q-Integral steht die Schnittstelle zwischen Verteilungs- und Übertragungsnetzen im Fokus der Untersuchungen. Hierfür wird das am elenia entwickelte aktive Blindleistungsmanagement an die neuen Anforderungen der Interoperabilität angepasst und um weitere Module wie z. B. eine Blindleistungsprognose ergänzt. Das Ziel anschließender technischer und wirtschaftlicher Untersuchungen mittels realer Netzmodelle ist Handlungsempfehlungen in Bezug auf betriebliche sowie planerische Aspekte eines zukünftigen Blindleistungsmanagements zu formulieren.

Im Bereich der Spannungsqualität untersucht das Team die Auswirkungen ansteigender Durchdringungen von PV-Systemen, Elektrofahrzeugen, Heimspeichersystemen und Power-to-Heat-Anlagen auf Spannungsqualitätsmerkmale wie schnelle Spannungsänderungen, Flicker, Oberschwingungen, Unsymmetrie etc. im Niederspannungsnetz. Auf Basis von Labormessungen von Geräten wie PV-Wechselrichter und Wärmepumpen sowie Feldversuchen in Kooperation mit Verteilnetzbetreibern verfügen über ein breites Wissen hinsichtlich Unsymmetrien. Auf der anderen Seite werden Regelungen entwickelt, um die Spannungsqualität im Nie-



derspannungsnetz auch bei steigender Zahl von leistungselektronischen Komponenten mit hoher Nennleistung zu erhalten. Diese Regelungen werden zunächst in Laborumgebung an frei-programmierbaren Wechselrichtern getestet und auf Basis dessen optimiert. Anschließend werden die Regelungen in einem Spannungsqualitätsregler implementiert, der in einem Niederspannungsnetz erprobt wird.

Energiewirtschaft und Energiemanagement

Das Team „Energiewirtschaft und Energiemanagement“ besteht aus zehn wissenschaftlichen Mitarbeitern und zwei Laboringenieuren, die sich mit der wirtschaftlich und technisch optimalen Integration von Erneuerbaren Energien in das heutige und zukünftige Energiesystem befassen. Kernpunkt der Forschung ist die Entwicklung und Untersuchung von zukünftigen Geschäfts- und Marktmodellen sowie Energiemanagementsystemen im Kontext einer regenerativ geprägten Stromerzeugung. So wird zum Beispiel untersucht, inwiefern Erzeuger, Verbraucher und Speicher Systemdienstleistungen für das Netz (z. B. Flexibilitäten) bereitstellen können und wie diese vermarktet werden können. Durch computergestützte Simulationen, Labor- und Feldversuchen können verschiedene Markt-, Integrationskonzepte und Betriebsstrategien abgebildet und bewertet werden. Entwickelte Tools dienen dabei als Grundlage vieler Forschungsprojekte und führen zu einer projektübergreifenden Zusammenarbeit.

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

SCHWERPUNKTMENTOR



Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel

✉ bernd.engel@tu-braunschweig.de
☎ +49 531 391-7740

NETZDYNAMIK UND SYSTEMSTABILITÄT



Edwin Rebak

✉ e.rebak@tu-braunschweig.de
☎ +49 531 391-7759

NETZBETRIEB UND NETZPLANUNG



Dr.-Ing. Jonas Wussow

✉ j.wussow@tu-braunschweig.de
☎ +49 531 391-7707

ENERGIEWIRTSCHAFT UND ENERGIEMANAGEMENT



Felix Klabunde

✉ f.klabunde@tu-braunschweig.de
☎ +49 531 391-9720

WEBSITE

www.tu-braunschweig.de/elenia/forschung/aktives-verteilnetz

Schwerpunkt Elektromobilität

Netz- und Systemintegration von batterieelektrischen Fahrzeugen und Batterietechnik

Aus dem Strategieprozess der TU Braunschweig hat sich als ein Schwerpunkt die Mobilität ergeben. Die strategische Ausrichtung innerhalb dieses Themenfeldes wird durch die erstmalige Einführung des Masterstudiengangs „Elektromobilität“ zum WS 14/15 unterstrichen. An der Umsetzung ist das elenia mit einer Reihe von Vorlesungen beteiligt. Durch die Forschungs-

infrastruktur des Niedersächsischen Forschungszentrums Fahrzeugtechnik (NFF) und der Battery LabFactory Braunschweig (BLB) ist das elenia in interdisziplinären Projekten zur Elektromobilitätsforschung aktiv integriert. Die Kompetenzen sind dabei in den Bereichen der System- und Netzintegration von Elektrofahrzeugen und der Batterietechnik.

Foto: Henrik Herr/TU Braunschweig



Netz- und Systemintegration

„Elektromobilität in Deutschland auf der Überholspur“, so betitelte das Kraftfahrt Bundesamt Anfang 2021 eine Pressemitteilung. Gut 200.000 batterieelektrische Fahrzeuge wurden im Jahr 2020 neu zugelassen. Die Gesamtanzahl betrug dadurch am 1. Januar 2021 knapp 330.000 Fahrzeuge. Bezogen auf die Gesamtanzahl aller PKW in Deutschland ist diese Zahl noch sehr gering. Die Entwicklung ist jedoch exponentiell. Aus diesem Grund widmen wir uns am elenia eine Vielzahl von Fragenstellung rund um die zukünftige Netz- und Systemintegration von Elektrofahrzeugen sowie eine aktive Rolle von Elektrofahrzeugen. Diese Fragestellung finden sich insbesondere im Team Netzbetrieb und Netzplanung wieder. Im Rahmen des Forschungsprojektes LI-SA4CL (Laden – induktiv, schnell, autonom für City Logistik) werden Ansätze zu einem erzeugungs- und netzorientierten Laden entwickelt und untersucht. Zusätzlich wird das Elektrofahrzeug im Team Energiewirtschaft und Energiemanagement als wichtige Komponente bei Gesamtsystembetrachtungen berücksichtigt.

Das Forschungsfeld Netzintegration umfasst den Bereich von einfach Netzberechnungen bis hin zu netzdienlichen Ladeansätzen. Im Rahmen von Simulationen werden am elenia insbesondere Niederspannungsnetze hinsichtlich der Aufnahmekapazität für Elektrofahrzeuge untersucht. Dabei sind Erfahrungen hinsichtlich Ladeverhalten und Energiebedarf für unterschiedlichste Szenarien vorhanden. Darauf aufbauend werden Ansätze zur Reduktion der Rückwirkungen durch Ladevorgänge auf das Energieversorgungsnetz, die in der Vergangenheit bereits erarbeitet wurden, weiterentwickelt.

Neben der Netzintegration von Elektrofahrzeugen wird am elenia auch an erzeugungsorientierten Ladealgorithmen gearbeitet. Diese sind nötig, um den Verbrauch anhand der dezentralen Erzeugung zu steuern. Hierzu eignen sich Elektrofahrzeuge besonders, da es sich hierbei um große Verbraucher mit einem großen Flexibilitätspotenzial handelt. Die entwickelten Algorithmen werden sowohl in Simulationen, im Labor und am realen Fahrzeug erprobt und validiert.

Die Kommunikation zwischen Elektrofahrzeugen, Ladeinfrastruktur und einem übergeordneten Backend nimmt eine wichtige Rolle im Bereich der Netz- und Systemintegration ein. Diese ist z. B. für Ladeleistungssteuerung zur Netzstützung oder für die Umsetzung von Ladeplänen beim erzeugungsorientierten Laden notwendig.

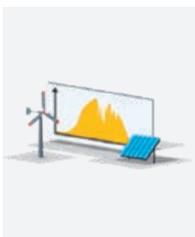
Für die Forschungsarbeiten rund um die Elektromobilität und damit verbunden Netzfragen kann das elenia auf eine gut ausgestattete Infrastruktur zurückgreifen. Neben den Laboren verfügt das Institut über mehrere Ladesäulen.



Kommunikation



Netzintegration



Erzeugungsorientiertes Laden

Batterietechnik

Ein wichtiges Forschungszentrum für die Batterietechnik am elenia stellt die BLB dar. Das Forschungsspektrum umfasst den gesamten Wertschöpfungskreislauf von der Material- und Elektrodenherstellung über die Zellfertigung bis hin zur Systeminteg-

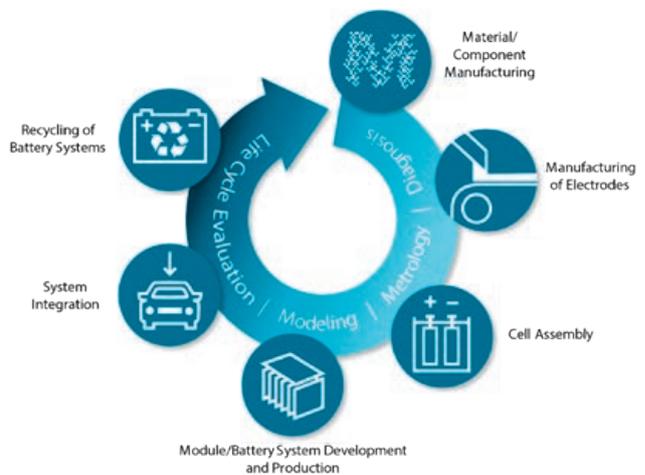
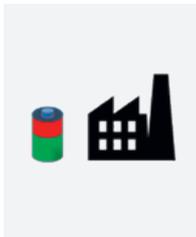


Abbildung 1: Battery LabFactory Braunschweig (BLB)

ration und zum Recycling zur Schließung des Materialkreislaufes (vgl. Abb. 1). Die BLB bündelt die Kompetenzen von 9 Instituten der TU Braunschweig, der TU Clausthal, der Leibniz Universität Hannover, des Fraunhofer Instituts für Schicht- und Oberflächentechnik IST sowie der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt Braunschweig (PTB). Diese Zusammenarbeit eines transdisziplinären Konsortiums in einem Joint Lab ist einzigartig in der deutschen Forschungslandschaft.

Als aktives Mitglied der BLB und hauptverantwortliches Institut für die Formierung, Alterung und Charakterisierung

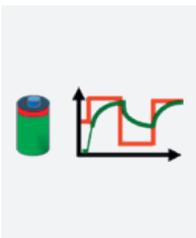
forschen wir am elenia an entsprechenden Fragestellungen und erweitern unsere Expertise. In Zusammenarbeit mit der PTB sind Forschungsaktivitäten im Bereich der Alterungsuntersuchungen an Batteriemodulen sowie elektrische und thermische Sicherheitstests im Fokus. Das Team Batterietechnik beschäftigt sich mit einem breiten Spektrum an Forschungsthemen auf Zell- sowie Modulebene. Die erzielten Forschungsergebnisse fließen als aktuelle Inhalte in die Mitgestaltung der Lehre ein. Die Forschungsfelder lassen sich in vier Bereiche kategorisieren: Batterieproduktion, Batterienutzungs- und -alterung, Batteriediagnose- und -sicherheit sowie 2nd Life und Recycling.



Batterieproduktion

Innerhalb der Produktionskette von Batteriezellen repräsentiert die Formierung den Flaschenhals eben dieser, da der Schritt zeit- und damit kostenintensiv ist. Die Formierung bezeichnet den finalen Produktionsschritt und dient der elektrischen Aktivierung der Batteriezellen. Aktuelle Forschungsarbeiten in den Projekten DaLion4.0 und FormEL beschäftigen sich mit der modellgestützten sowie experimentellen Optimierung der Formierung, der Identifikation von sensitiven Einflussparametern und der Ermittlung von Quality Gates zur Bewertung der Zellqualität.

Nach der Formierung und damit dem BoL (Begin of Life) der Batterien werden experimentelle Langzeitzyklisierungen durchgeführt, um die elektrochemische Performance der Zellen im Betrieb zu charakterisieren und Rückschlüsse auf Alterungsmechanismen zu schließen. Ziel im Forschungsprojekt FastChargeLongLife ist eine alterungsadaptive Schnellladestrategie zu entwickeln, die den Batteriezellen gleichzeitig eine lange Lebensdauer zusichert.



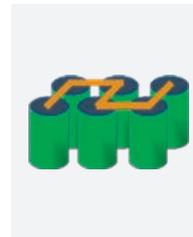
Batteriediagnose und -sicherheit

Ein vielseitiges und übergeordnetes Forschungsfeld stellt die Batteriediagnose und -sicherheit dar. In den Batterielaboren werden verschiedene messtechnische Untersuchungen an Batteriemodulen und -zellen durchgeführt, um die Qualität sowie den Zustand kenngrößenbasiert zu bewerten. So werden u. a. die elektrischen Eigenschaften durch Belastung mit verschiedenen Strom- und Spannungsprofilen sowie die energetischen Eigenschaften durch konstante Strombelastung ermittelt. Mittels Strom-, Innenwiderstands- und Impedanzmessungen kann die elektrische Leistungsfähigkeit sowie der Batteriezustand bestimmt werden. Im Projekt BaSS werden zur Klassifizierung von Sicherheitstests Untersuchungen zur Identifikation von kritischen thermischen und elektrischen Lastfällen durchgeführt. Die experimentellen Arbeiten werden durch Batteriemodelle gestützt und somit das elektro-thermische Batterieverhalten simuliert, um Batteriesysteme zu entwickeln und Betriebsgrenzen auszulegen. Die Batteriesystemauslegung mit Verschaltungs-, Zellbetriebs- und diagnosestrategien zählt ebenfalls zu den Forschungsaktivitäten.

Mit Hilfe von speziellen Methoden, wie den Impedanzmessungen kann die Alterungshistorie von Batteriemodulen charakterisiert werden. Ziel des Projektes NetProSum2030 ist damit die Module hinsichtlich der Wiederverwertbarkeit in einer 2nd Life Anwendung zu bewerten.



2nd Life und Recycling



Batterienutzung und -alterung

SCHWERPUNKTMENTOR



Dr.-Ing. Frank Lienesch (PTB)

✉ Frank.Lienesch@ptb.de

☎ +49 531 592-9090

NETZ- UND SYSTEMINTEGRATION



Dr.-Ing. Jonas Wussow

✉ j.wussow@tu-bs.de

☎ +49 531 391-7707

BATTERIETECHNIK



Robin Drees

✉ r.drees@tu-bs.de

☎ +49 531 391-9730

WEBSITE

www.tu-braunschweig.de/elenia/forschung/elektromobilitaet

Foto: Robin Drees/TU Braunschweig



Wege zum elenia

Patrick Vieth

Mein Weg vom Studenten zum wissenschaftlichen Mitarbeiter in der Arbeitsgruppe Energietechnologien

Moin. Ich heiße Patrick Vieth, bin 25 Jahre alt und wurde gebeten meinen Weg zum elenia zu beschreiben.

Womit alles anfing:

Nach meinem Abitur habe ich ein Duales Studium an der Hochschule Osnabrück begonnen. Auch damals gings schon um die Energietechnik. Glücklicherweise konnte ich nach meinem Studium bei meinem Unternehmen in der Kraftwerksbranche bleiben und dort erste Praxiserfahrungen sammeln. Mir war allerdings bewusst, dass ich mein Wissen im Rahmen eines Masterstudiums in Elektrotechnik vertiefen möchte. Deswegen kündigte ich zum Wintersemester 2018. Aufgrund des ansprechenden Lehrangebotes fiel die Wahl auf die TU-Braunschweig.

Die Zeit während meines

Masterstudiums:

Im ersten Semester musste ich mich erst einmal an der neuen Uni in der neuen Stadt zurechtfinden. Ich habe mir verschiedene Vorlesungen angesehen, mich beim Sportkurs angemeldet, ein paar Kommilitonen

kennengelernt und mich so langsam an der TU zurechtgefunden. Gegen Ende des ersten Semesters gings dann auch schon los mit der ersten Prüfungsphase. Bei der mündlichen Prüfung in „Elektrische Energieanlagen I“ kam ich zum ersten Mal bewusst mit dem elenia in Kontakt. Die Prüfung lief gut und mir wurde im Gespräch danach eine Stelle als Hilfswissenschaftler (HiWi) angeboten, welche ich aus zeitlichen Gründen aber ablehnen musste.

Während des zweiten Semesters konnte ich fleißig Credits sammeln, sodass ich im kommenden Semester Zeit für eine HiWi-Stelle hatte. Außerdem konnte ich die Dozenten und Wissenschaftlichen Mitarbeiter (WiMi) des elenia während weiterer Vorlesungen besser kennenlernen.

Gesagt, getan, und ich wurde als HiWi im Bereich der Schaltgertetechnik angestellt. Ich wurde herzlich in das Team aufgenommen und konnte direkt an der Weihnachtsfeier teilnehmen. Ich habe Versuche im Labor aufgebaut, durchgeführt und ausgewertet. Dies war auch eines der ersten Male an der Uni, dass ich von meinen handwerklichen Erfahrungen aus der Aus-

bildung profitieren konnte. Durch die ersten Berührungspunkte mit Schaltgeräten stand auch schnell ein Thema für meine Masterarbeit fest.

Während der Masterarbeit habe ich unzhliche Stunden im Labor verbracht und mit den WiMIs die Ergebnisse diskutiert. Dabei konnte ich auch die weiteren Mitarbeitenden, deren Arbeitsweise und das Arbeitsumfeld kennenlernen. Gegen Ende der Masterarbeit wurde mir dann die weitere Zusammenarbeit als WiMi angeboten.

Rückblick:

Nun bin ich seit Anfang des Jahres am Institut und bearbeite verschiedenste Aufgaben und spannende Projekte. Es ist tatsächlich so wie ich mir das vorgestellt hatte und wie mir die Kollegen den Job im Vorfeld beschrieben haben. Der Job ist sicherlich nicht für jeden gemacht, aber durch eine Tätigkeit als HiWi und eine Abschlussarbeit am Institut kann man einen guten Einblick bekommen, ob eine Anstellung als WiMi (beiderseits) passt.



Patrick Vieth, M.Sc.
am elenia seit Februar 2021

Foto: Patrick Vieth/TU Braunschweig



Wai-Yee Choi

Mein Weg von einer Vollzeitstudentin zur Teilzeitmitarbeiterin

Vorgeschichte

Während dem Abitur stellte ich mir die Frage, wie ich meine berufliche Karriere nach der Schulzeit gestalten möchte. Ich hatte immer viel Spaß an Mathe und Naturwissenschaften, aber ich fand die Prozesse der Wirtschaft ebenfalls interessant. Folglich entschied ich mich für den Hybridstudiengang „Wirtschaftsingenieurwesen“. Bei der Suche nach der passenden Universität sah ich, dass an der TU Braunschweig bereits im Bachelorstudiengang eine Fachrichtung gewählt wird, was mir gefiel. Also habe ich mich schließlich für die Fachrichtung Elektrotechnik entschieden, da ich das Energienetz und die Herausforderungen der Integration von nachhaltigen Energieträgern schon damals spannend fand.

Das elenia habe ich im Studium zunächst in einer Grundlagenvorlesung kennengelernt. Bereits dort hat mir die Thematik gefallen. Im vierten Semester habe ich folglich meine Vertiefungsrichtung in die Energietechnik gelegt. So hatte ich u. a. eine weitere Vertiefungsvorlesung am elenia belegt.

Zusammenarbeit am elenia

Bei der Suche nach einem Thema für meine Bachelorarbeit war mir wichtig, dass die

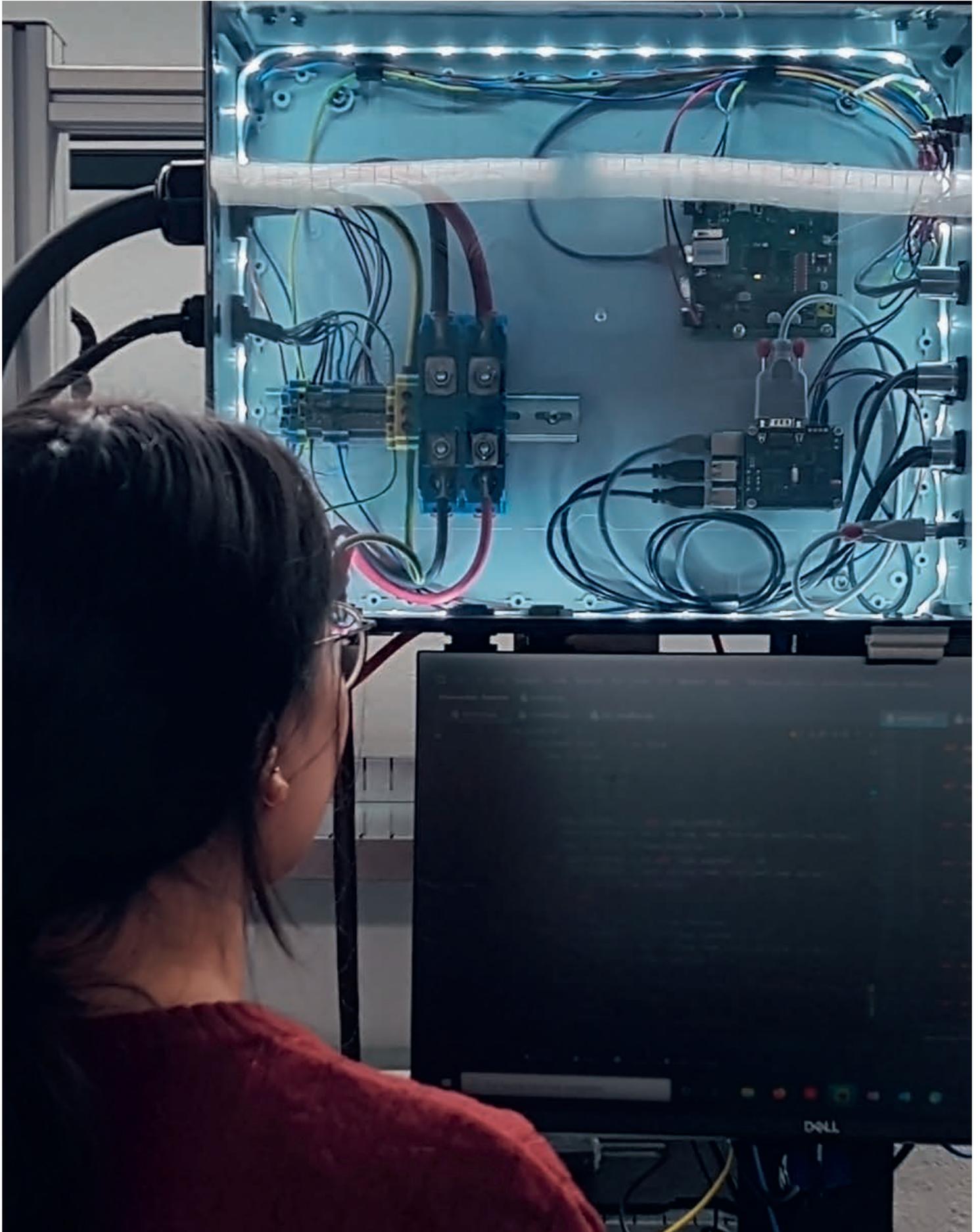
Fragestellung im Bereich der Elektromobilität liegen soll. Da ich vom elenia auch schon zuvor einen sehr guten Eindruck durch die besuchten Vorlesungen hatte und dort immer an hochaktuellen Fragestellungen geforscht wird, habe ich auf deren Internetseite eine passende Ausschreibung gefunden und die zugehörige Betreuerin kontaktiert. Während der Bachelorarbeit wurde bereits viel Wert auf eine enge Zusammenarbeit gelegt. Es gab wöchentliche Absprachen und bei weiteren Fragen konnte ich meine Betreuerin jederzeit kontaktieren. Nach meiner Abschlussarbeit begann ich als HiWi weiterzuarbeiten. Zusätzlich durfte ich am elenia mein Bachelorindustriepraktikum absolvieren, da mein ursprüngliches Industriepraktikum kurzfristig durch die Coronapandemie abgesagt wurde. In dieser Zeit habe ich sechs Wochen in Vollzeit gearbeitet und bereits einen kleinen Einblick in die Arbeitswelt vom elenia erhalten. Im Laufe des Praktikums wurde mir vorgeschlagen, während des Masters etwa 20 Stunden die Woche als Teilzeitmitarbeiterin am elenia zu arbeiten. Da mir die Arbeit am elenia sehr gefallen hat und dazu ich gerne einen praktischen Bezug während des Studiums wollte, habe ich mich schließlich entschlossen als Laboringenieur zu bewerben.

Ein tiefer Einblick in die Forschung

Die Arbeit am elenia begann ich schließlich am Februar 2021. Besonders an der Arbeit gefällt mir die enge Einbindung in das Forschungsprojekt LISA4CL. Durch die Mitarbeit konnte ich bereits einen tiefen Einblick in die Forschung erhalten, neues Wissen sammeln und vertiefen, was durch ein alleiniges Studium wahrscheinlich nicht möglich gewesen wäre. Einen Eindruck von der Zusammenarbeit mit anderen Instituten und Industriepartnern habe ich ebenfalls erhalten können. Darüber hinaus konnte ich auch die Arbeitsabläufe, die hinter den Kulissen „des Studiums“ laufen, kennenlernen. So durfte ich u. a. ein Laborversuch von der Planung bis zur Durchführung begleiten. Auch wenn die zusätzliche Arbeitszeit neben dem Studium zunächst beanspruchend klingen mag, ist die Arbeit am elenia durch ihre hohe Flexibilität gut mit dem Studium vereinbar. Ich empfehle jedem interessierten Studierenden, die Chance als Laboringenieur/-in zu arbeiten zu nutzen, denn die gesammelten Erfahrungen sind sehr bereichernd für die berufliche als auch die persönliche Entwicklung.



Wai-Yee Choi, B.Sc.
am elenia seit Februar 2021





Forschungsberichte

Team Batterietechnik

DaLion 4.0	36
FormEL	38
Adaptive Schnellladestrategien	40

Team DC Systeme und Schaltgeräte

Netzsysteme der Zukunft	42
Schutzsysteme in Verteilnetzen	44
Universal Power Switch	46
SE ² A	48

Team Hochspannungs- Plasma- und Vakuumtechnik

Hochspannungsvakuumschalter	50
Experimentelle und theoretische Untersuchungen von Lichtbogenplasmen in Luft	52

Team Energiewirtschaft und Energiemanagement

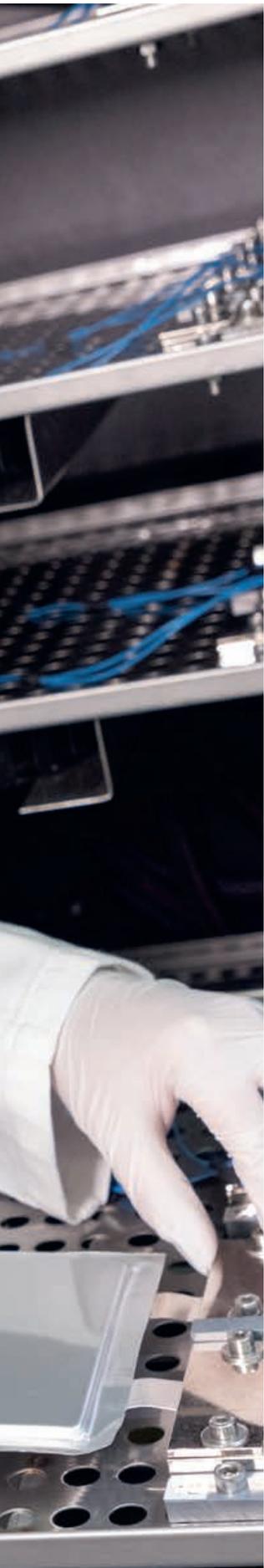
flexess	56
Innovative Prosumerhaushalte	58
Digitalisierte Energiesysteme	60
Netzdienliche Prosumer	62
Elektrische Feldbewirtschaftung	64
Grünstrom für MieterInnen	66
MoZuBi	68
Wasserstoff-Kompetenzzentrum	71

Team Netzbetrieb und Netzplanung

Forschungsprojekt LISA4CL	72
Spannungsqualität verbessern	74
Blindleistungsmanagement	76

Team Netzdynamik und Systemstabilität

Netzregelung 2.0	78
Robuster Netzbetrieb	80
ALPHEUS	82





DaLion 4.0

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

Projektziel

Das Projekt DaLion 4.0 hat das Ziel die Batterieproduktion zur Planung und zielgerichteten Regelung in cyber-physischen Systemen abzubilden, um Batteriezellen effizienter und produktiver zu gestalten. Ebenso liegt ein Schwerpunkt auf der Entwicklung geeigneter Qualitätsmanagementstrategien u. a. im Kontext verbessertem Tracking & Tracing sowie der Festlegung von Quality Gates.

Ziel des Forschungsvorhaben ist es ein tiefgreifendes Verständnis unterschiedlicher Schritte in der Batteriezellproduktionskette zu erlangen und wechselseitige Beziehungen aus Prozessparametern und den resultierenden Eigenschaften des Produktes Batteriezelle zu identifizieren (vgl. Abb. 1). Hierzu dient auch die Integration zusätzlicher und neuartiger Messtechnik in die Produktion als Basis der Datenanalyse. Die so gewonnenen Erkenntnisse sollen genutzt werden, konkrete Prozessverbesserungen abzuleiten und Strategien

zur Prozessführung zu entwickeln. Eine wettbewerbsfähige Batteriezellfertigung steht im Fokus des Projektvorhabens DaLion4.0, da sie für den Erfolg der Elektromobilität und dem Wirtschaftsstandort Deutschland von höchster Wichtigkeit ist.

Ergebnisse und Diskussion

Im Fokus der Forschungsaktivitäten am elenia steht die Formierung, welche einen Schlüsselprozess in der Produktion zur gezielten Einstellung von Batterizeleigenschaften repräsentiert. Dabei erfolgt die elektrische Aktivierung der Batteriezelle durch initiale Lade- und Entladezyklen. Durch Zersetzungsprodukte des Elektrolyten bilden sich Oberflächenschichten auf den Elektroden aus, die Einfluss auf die Kenngrößen, das Langzeit- und Sicherheitsverhalten der Batteriezellen nehmen. Entlang der gesamten Produktionskette ist dieser Prozessschritt gleichzeitig aber auch der Zeit- und Kostenintensivste. Daher ist das Bestreben ein detailliertes Prozessverständnis durch eine Sensitivitätsanalyse aufzubauen und Optimierungspotential abzuleiten, um die Formierung bei mindestens gleichbleibender Zellqualität zu beschleunigen. Dazu wurden zunächst experimentelle Parameterstudien hinsichtlich der elektrischen Kenngrößen an der Referenzzelle NMC 622 I Graphit, (großformatige Pouchzelle < 9 Ah, Elektrodentyp Hochleistungszelle) durchgeführt. Dabei wurde eine Referenzformierung aus dem Vorgängerprojekt DaLion festgelegt, welche aus zwei symmetrischen Formierzyklen (C/10; C/2) besteht und ca. 24 h dauert.

Abbildung 2 zeigt den Vergleich der Referenzformierung mit zwei entwickelten Dual-Current (DC)-Protokollen hinsichtlich der Kenngrößen relative Entladekapazität (SoH) und der C-Ratenperformance. Die Formierprotokolle der DC-Varianten unterscheiden sich im 1. Zyklus. Bei 03 DC erfolgt die Ladung mit C/10 bis 3,6 V

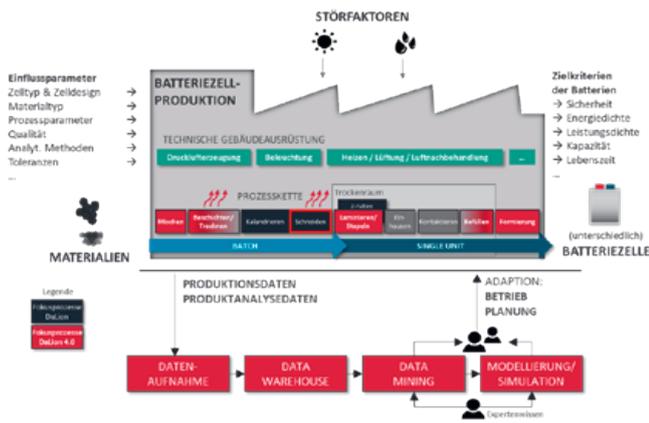


Abbildung 1: Projektübersicht.

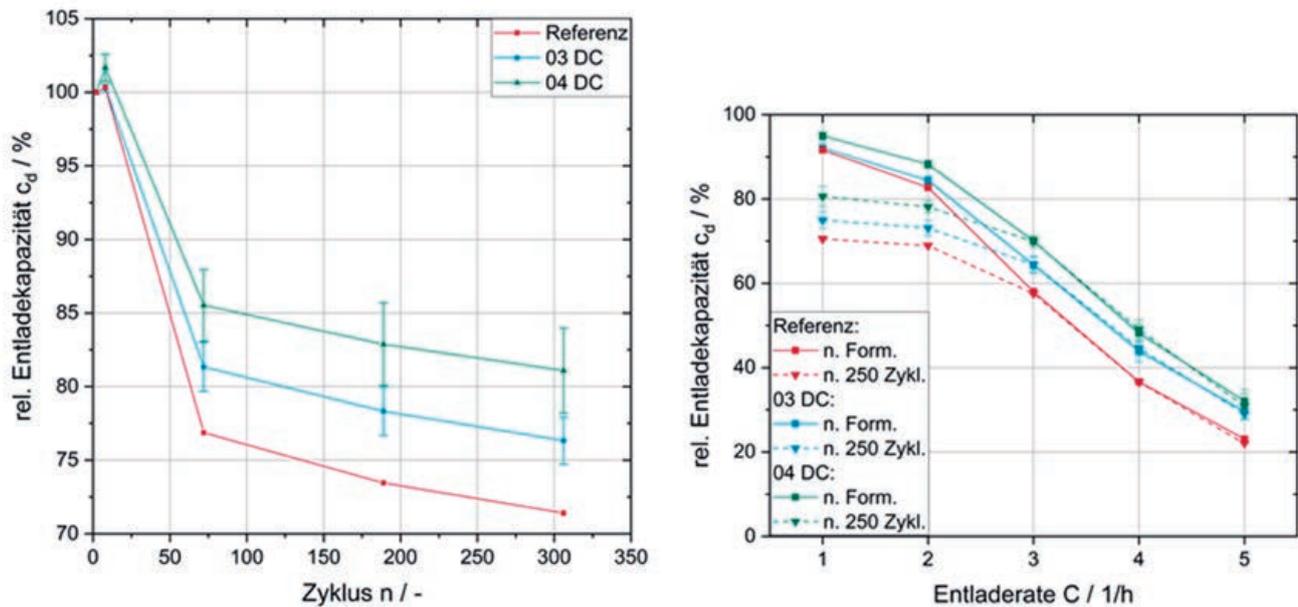


Abbildung 2: Vergleich der Dual-Current(DC)-Formiervariationen hinsichtlich der relativen Entladekapazität bei $C/10$ bezogen auf die Nennkapazität nach der Formierung (links) und der relativen Entladekapazität aus dem C-Ratentest nach der Formierung und nach 250 Zyklen (rechts).

und anschließend mit $1C$ bis zum Erreichen der Ladeschlussspannung von $4,2\text{ V}$. Die vollständige Entladung erfolgt bei $C/2$. Die Variante 04 DC unterscheidet sich lediglich durch eine erhöhte Laderate von $C/5$ im niedrigen Spannungsbereich der Vollzelle. Wird die Prozesszeit mit der Referenzformierung verglichen, kann eine zeitliche Reduzierung von ca. 15 % (03 DC) oder sogar knapp 50 % (04 DC) erzielt werden. Hinsichtlich ihrer energetischen Eigenschaften, lässt sich feststellen, dass die Nennkapazität nach der Formierung bei der Referenz um 3 % (vgl. 03 DC) bis 6 % (04 DC) höher liegt. Nach der ersten Charakterisierungssequenz, welche aus einem sym. C-Ratentest bis $5C$ und 50 Zyklen mit $2C$ (Zykl.) besteht, nimmt die nutzbare Kapazität bei allen drei Messreihen rapide ab. Die Zellen werden gezielt stark beansprucht, um die Parameterstudie in der Formierung schnell bewerten zu können. Nach 300 Zyklen liegt der SoH der DC-Variationen bei 76 % (03 DC) und 81 % (04 DC), wohingegen die Referenzzelle einen SoH von 71 % aufweist. Die schnellere Alterung der Referenz lässt sich auf unterschiedliche SEI-Zusammensetzungen zurückführen, die eine Langzeitstabilität begünstigen.

Der C-Ratentest erfolgt symmetrisch bei fünf verschiedenen C-Raten direkt nach der Formierung und nach 250 Zyklen, um die elektrische Leistungsfähigkeit der Zellen

zu beurteilen. Die Zellen, die mit dem DC-Verfahren formiert wurden haben eine höhere Entladekapazität bei gleicher C-Rate im Vergleich zur Referenz nach der Formierung sowie nach 250 Zyklen. Es zeigt sich, dass diejenigen Zellen, die mit einer höheren C-Rate formiert wurden ebenfalls eine bessere C-Ratenstabilität im höheren Bereich aufweisen. Insgesamt wurde mit dem Dual-Current-Verfahren eine Formierstrategie entwickelt, die die Prozesszeit deutlich reduziert und eine vergleichbare Zellperformance wie bei der Referenz erzielt.

Ausblick

Im letzten Projekthalbjahr wird die bereits begonnene experimentell basierte Untersuchung zur Formierung des neuen Elektrodentyps Hochenergie finalisiert und mit den Ergebnissen der Hochleistungszellen verglichen. Die experimentellen Untersuchungen werden schließlich mit den Simulationen sowie den Post-Mortem Analysen zur Charakterisierung der SEI-Struktur und -Zusammensetzung mittels REM und Ramanpektroskopie der Projektpartner korreliert, um Lithium-Plating auszuschließen. Dadurch wird ein modellbasiertes Konzept zur Identifikation zellspezifisch optimaler Formierprozeduren entwickelt und implementiert, welches schnell auf neue Elektrodenstrukturen und Zellchemien reagiert.

PROJEKTNAME

DaLion 4.0

LAUFZEIT

Januar 2019 – Dezember 2021

PROJEKTLOGO



ANSPRECHPARTNER / KONTAKT

Robin Drees

✉ r.drees@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391-9730

PROJEKTPARTNER

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

GEFÖRDERT DURCH



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages



Foto: Battery LabFactory Braunschweig

FormEL

Ermittlung von Prozess-Qualitäts-Beziehungen der Formierung und des End-of-Line Tests zur funktionsintegrierten Gesamtprozessoptimierung

Projektziel

Das Ziel des Forschungsvorhabens FormEL ist die Optimierung und Zusammenführung der finalen Produktionsschritte (Formierung und Qualitätsprüfung) von Lithium-Ionen-Batteriezellen. Die ersten Lade- und Entladezyklen einer Lithium-Ionen-Batterie (Formierung) haben entscheidenden Einfluss auf die Performance, Alterung und Sicherheit der Batteriezelle. Während des ersten Ladevorgangs wird der Elektrolyt aufgrund des niedrigen Anodenpotentials zersetzt und bildet die Solid-Electrolyte-Interphase (SEI) aus, welche den Elektrolyten vor der weiteren Zersetzung schützt. Um eine homogene SEI-Schicht zu gewährleisten, werden mehrere Formierungszyklen durchgeführt. Diese Formierzyklen können dabei bis zu 48 h dauern. Im Anschluss erfolgt der End-of-Line Test (EOL-Test), um die Kapazität, den Innenwiderstand und die Selbstentladung zu quantifizieren. Insbesondere der Selbstentladestest

dauert bis zu 30 Tage, um verlässliche Aussagen über die Zellgüte treffen zu können.

Durch das Projekt sollen die Wechselwirkungen zwischen der Formierprozedur und dem EOL-Test in Bezug zur resultierenden und diagnostizierten Zellqualität ermittelt werden. Diese Prozess-Qualitäts-Beziehungen werden zur Entwicklung detaillierter Modelle und Optimierung der beiden Prozessschritte, mit dem Ziel einer funktionsintegrierten Zusammenführung, genutzt. Durch die optimierte Formierung inklusive EOL-Test soll die Zellqualität gesteigert und sowohl die Prozesszeit als auch –kosten verringert werden (siehe Abbildung 1).

Bisherige Ergebnisse

Zum Projektbeginn wurde zunächst eine Referenzprozedur für die Formierung und den EOL-Test definiert. Die Formierprozedur dauert in etwa 21 h und besteht dabei aus einer 0,05 C Ladung und 1 C Entladung mit anschließender Entgasung. Der EOL-Test orientiert sich an der Norm on IEC 62660 und dauert in etwa 31 Tage, wovon 28 Tage auf den Selbstentladetest zurückzuführen sind. Die restlichen 2 Tage bestehen aus mehreren Kapazitätstests und Pulsstromtests zur Ermittlung des Innenwiderstands bei verschiedenen Ladezuständen. Basierend auf diesen Referenzprozeduren wurden bereits erste experimentelle Variationen durchgeführt, um die Prozesszeit zu verringern ohne die Qualität oder Diagnosegüte des EOL-Tests zu beeinträchtigen. Das elenia fokussiert sich dabei auf Schnelllademethoden, welche Lithium-Plating (Li-Plating) vermeiden. Li-Plating ist die Folge einer unerwünschter Nebenreaktion der negativen Elektrode bei zu hohem Ladestrom. Das Li-Plating reduziert die verfügbare Kapazität und kann interne Kurzschlüsse

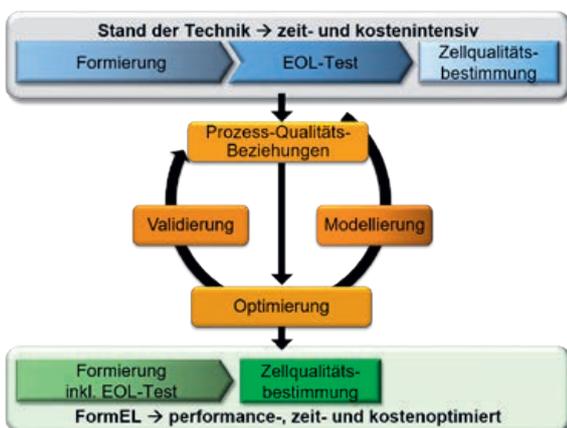
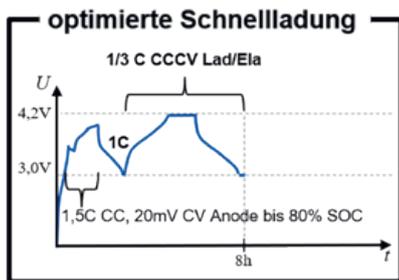
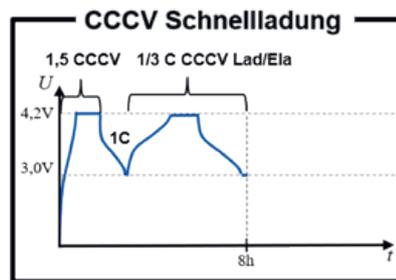


Abbildung 1: Projektübersicht



EOL-Kapazität @ 1/3 C
160 +/- 0,2 mAh/g



EOL-Kapazität @ 1/3 C
155,3 +/- 0,1 mAh/g

verursachen. Deshalb muss darauf geachtet werden kein Li-Plating während der Formierung zu verursachen.

Mithilfe von modellbasierten Methoden und Simulationsmodellen konnten bereits erste vielversprechende Optimierungsergebnisse erzielt werden. Durch spezielle kleinformatige 3-Elektroden-Zellen wird dabei die Spannung der negativen Elektrode überwacht und stets oberhalb von 20 mV gehalten, um Li-Plating zu vermeiden. Insbesondere bei Spannungen unterhalb von 0 V der negativen Elektroden wird das Li-Plating begünstigt. Im Gegensatz zu einer klassischen CCCV-Ladung (constant current, constant voltage) konnte so bei gleicher Formierzeit (8 h) eine höhere Kapazität erzielt werden ohne Li-Plating zu verursachen (siehe Abbildung 2). Nach der Formierung wurden sogenannte Post-Mortem Analysen durchgeführt, um festzustellen, ob Li-Plating aufgetreten ist. Dazu werden die Zellen unter Inertgasatmosphäre geöffnet. Anschließend werden die negativen Elektroden mittels Mikroskopie untersucht. Das Li-Plating ist metallisches Lithium und kann durch helle Ablagerungen auf der Elektrode erkannt werden (siehe Abbildung 2, rechts unten).

Ausblick

Durch weitere experimentelle und simulative Sensitivitätsanalysen wird versucht die Formierzeit noch weiter zu reduzieren. Parallel zu diesen Untersuchungen werden Elemente des EOL-Tests in die Formierpro-

zedur integriert, um die Gesamtprozesszeit zu reduzieren. Durch Synergien zwischen optimierten Formierprozeduren und EOL-Tests soll ein funktionsintegrierter Prozess entwickelt werden. Beispielsweise können definierte Strompulse oder Relaxationsvorgänge aus dem EOL-Test in die Formierprozedur integriert werden. Die resultierende Charakteristik des Spannungsverlaufs kann mit Simulationsmodellen korreliert werden, um Zelleigenschaften (z. B. Innenwiderstand oder Selbstentladung) zu bestimmen oder Produktionsfehler zu diagnostizieren. Durch die Funktionsintegration soll eine Prozesszeitsenkung um mind. 30 % gegenüber der Summe aus Referenzformierprozedur und EOL-Referenztestung erzielt werden.

Im weiteren Projektverlauf werden verschiedene optimierte Prozeduren auf großformatige Pouchzellen übertragen. Die Besonderheit bei großformatigen Zellen besteht darin, dass mehrere Elektroden übereinandergestapelt werden. Dies erschwert insbesondere eine gleichmäßige Benetzung der Elektroden mit dem Elektrolyt. Schlecht benetzte Stellen führen zu inhomogenen Stromdichteverteilungen, welche das Li-Plating begünstigen. Daher wird mithilfe von verschiedenen Temperaturzyklen und mechanischer Verspannung versucht eine möglichst gleichmäßige Benetzung zu realisieren. Außerdem werden die entwickelten Methoden auch auf verschiedene Materialsysteme (z. B. verschiedene Aktivmaterialien, Elektrolyte oder Separatoren)

Abbildung 2: Vergleich der Dual-Current(DC)-Formiervariationen hinsichtlich der relativen Entladekapazität bei C/10 bezogen auf die Nennkapazität nach der Formierung (links) und der relativen Entladekapazität aus dem C-Ratentest nach der Formierung und nach 250 Zyklen (rechts).

Diagramme: Robin Drees

übertragen, um Unterschiede zwischen den Eigenschaften dieser Materialsysteme zu ermitteln.

PROJEKTNAME

FormEL

LAUFZEIT

August 2020 – Juli 2023

PROJEKTLOGO



ANSPRECHPARTNER / KONTAKT

Robin Drees

✉ r.drees@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391-9730

PROJEKTPARTNER

MEET (WWU Münster), PEM (RWTH Aachen), MBM (Uni Bayreuth), EES (TU München)

WEBSITE

www.prozell-cluster.de

GEFÖRDERT DURCH



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Foto: Fabian Katschewitz/TU Braunschweig

Adaptive Schnellladestrategien

Modellbasierte Bewertung der Betriebsgrenzen verschiedener Zellsysteme zur Auslegung alterungsadaptiver Schnellladestrategien

Eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst die Verbraucherakzeptanz der Elektromobilität. Die Begriffe Kosten, Energieeffizienz, Sicherheit, Nachhaltigkeit, Reichweite und Leistungsfähigkeit fallen in diesem Zusammenhang immer wieder. Darüber hinaus ist eine lange Lebensdauer von Lithium-Ionen-Batteriezellen sowie eine kurze Ladezeit dieser im Betrieb für den Erfolg von Elektrofahrzeugen entscheidend. Die Anforderungen an die Schnellladefähigkeit kommen dabei aus der jeweiligen Anwendung,

werden aber häufig durch das Materialsystem und Zelldesign limitiert. Hinzu kommt, dass sich die Zelleigenschaften durch die Batteriealterung verschlechtern. Insbesondere Schnellladevorgänge können dabei zu einer beschleunigten Alterung führen. Deshalb werden die Betriebsgrenzen häufig sehr pessimistisch ausgelegt, um sicherheitskritische Prozesse und beschleunigte Alterungsvorgänge wie das Lithium-Plating zu vermeiden. Eine vielversprechende Alternative ist die Bestimmung von al-

terungsabhängigen Betriebsgrenzen zur entsprechenden Anpassung der Schnellladestrategie. Dieser Ansatz ist jedoch mit Herausforderungen verknüpft, weil eine alterungsbedingte Anpassung der Betriebsgrenzen von nicht unmittelbar messbaren Zuständen des Material- und Zellsystems abhängt.

Projektziel

Das Projekt FastChargeLongLife adressiert diese Herausforderung und entwickelt eine

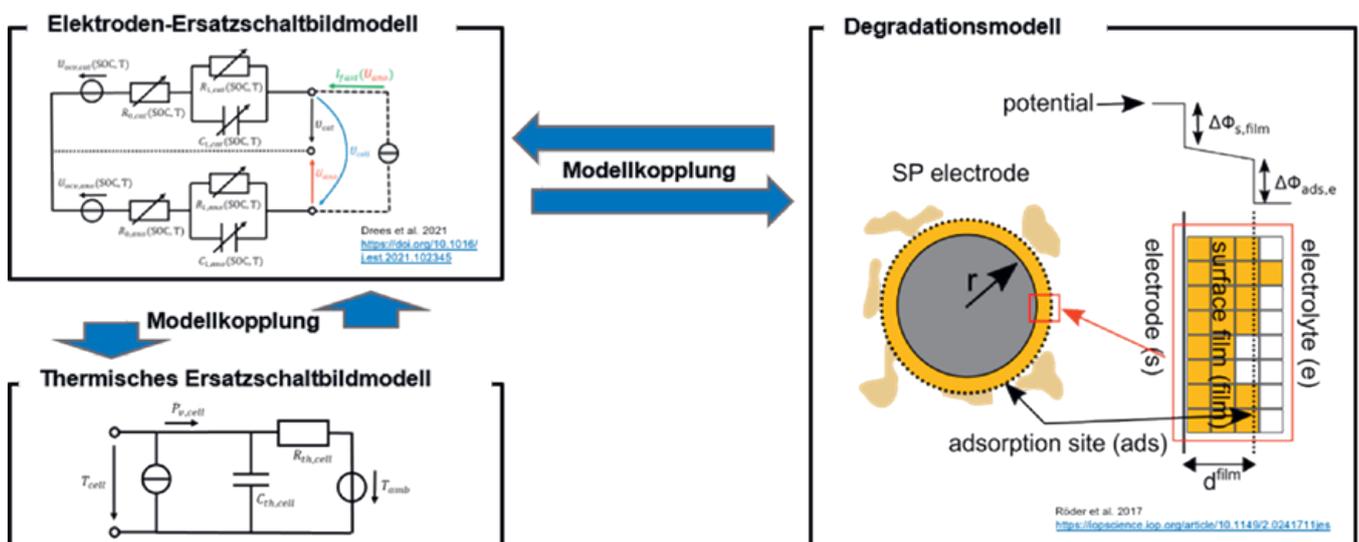


Abbildung 1: Modellkopplung von elektro-thermischen und physiko-chemischen Modellen.

Methodik für die modellgestützte Bewertung verschiedener Zellmaterialsysteme in Bezug auf die maximalen Lade-Betriebsgrenzen in Abhängigkeit des Alterungszustands. Zu diesem Ziel wird ein gekoppelter Modellansatz verwendet, welcher echtzeitfähige Ersatzschaltbild-Modelle und detaillierte physiko-chemische Degradationsmodelle miteinander verbindet (vgl. Abb. 1). Durch die alterungsabhängige und kontinuierliche Modellparametrierung während der gesamten Nutzungsphase können Schnellladestrategien angepasst werden, um materialbedingte Veränderungen der Zelleigenschaften während der Alterung adäquat zu berücksichtigen. Zudem ermöglicht dieser holistische Ansatz eine direkte Verbindung zwischen gegebenen Anwendungsprofilen und dem Zelldesign herzustellen. Somit eignet sich diese modellbasierte Methodik zur beschleunigten Anforderungsbewertung hinsichtlich Schnellladestrategien für verschiedene Zellmaterialsysteme entlang der gesamten Nutzungsphase in 1st- und 2nd-use. Dabei wird eine modellbasierte Skalierbarkeit der Materialdaten vorgesehen, um die Modellparameter von kleinen Zellformaten im 3-Elektroden-Format auf großformatige Pouchzellen zu übertragen. Auf Basis der modellbasiert ermittelten Betriebsgrenzen werden alterungs-adaptive Schnellladestrategien abgeleitet, welche sicherheitskritische Degradationseffekte vermeiden. Dies wird für verschiedene Zellmaterialsysteme vorgenommen, welche dadurch hinsichtlich der alterungsabhängigen Schnellladefähigkeit miteinander verglichen werden können.

Durch die optimierten Schnellladestrategien sollen die Ladezeit und Lebensdauer, um mindestens 10 % im Vergleich zu state-of-the-art Schnellladestrategien ohne alterungsabhängige Anpassung verbessert werden.

Auslegung der Referenzschnellladestrategien

Die Auslegung der state-of-the-art Referenzschnellladestrategien für verschiedene Zellmaterialsysteme dient als Grundlage für eine spätere alterungsabhängige Optimierung der Schnellladestrategien. Die Basis der Referenzschnellladestrategien bietet ein am Institut entwickeltes Elektroden-Ersatzschaltbildmodell, welches die Elektroden separat voneinander betrachtet und somit die Steuerung der Anodenspannung ermöglicht. Über die Festlegung einer minimalen Anodenspannung oberhalb von 0 V während der Schnellladung kann somit Lithium-Plating vermieden und eine beschleunigte Alterung reduziert werden. Zur Parametrierung und Validierung des Modells werden verschiedene Charakterisierungsverfahren wie Kapazitätstests, Current-Interrupt-Tests bei verschiedenen Ladezuständen (SOC) und C-Raten-Tests an kleinformatischen Zellen im 3-Elektroden-Format angewandt. Der Zelltyp ist eine PAT-Cell der EL-Cell GmbH mit ca. 8 mAh und einer Lithium-Referenzelektrode am Separator, die es erlaubt, die Elektrodenpotentiale zu bestimmen. In Abhängigkeit der Vorgabe des maximalen Ladestroms, der minimalen Anodenspannung und des zu erreichenden SOC nach der Schnellladung gibt das Modell eine entsprechende Ladestrategie vor. Insgesamt werden je Zellmaterialsystem zwei Referenzschnellladestrategien definiert. Die erste Ladestrategie (Ref A) ergibt sich für eine Ladung von 0 – 80 % SOC, einer minimalen Anodenspannung in Höhe von 10 mV sowie einem maximalen Ladestrom in Höhe von 3C. Die zweite Referenzladestrategie (Ref B) fundiert ebenfalls auf diesen Randbedingungen, wird jedoch auf Basis eines um 50 % höheren Innenwiderstands der Zelle dimensioniert. Die drei Liniendiagramme (vgl. Abb. 2) zeigen den Zell- und Anodenspannungsverlauf für eine gemessene Schnellladung mit

3C CCCV (Maximale Zellspannung = 4,2 V) sowie für die simulierten Profile Ref A und Ref B. Das betrachtete Zellmaterialsystem beruht auf der Zellchemie NMC622/G, die Umgebungstemperatur beträgt 20 °C. Bei der 3C CCCV-Schnellladung beträgt die Ladezeit 19 min, jedoch sinkt die Anodenspannung auf bis zu 50 mV, wodurch Lithium-Plating, während des Ladevorgangs auftritt und die Zellalterung bei einer Zyklisierung mit dieser Ladestrategie deutlich beschleunigt wird. Ref A und Ref B weisen Ladezeiten in Höhe von 29 min bzw. 42 min bei gleichzeitiger Vermeidung von Lithium-Plating und somit einer langsameren Zellalterung auf. Erste Zyklisierungstests mit anschließenden Zellcharakterisierungstests und Post-Mortem-Analysen konnten die Schlussfolgerungen hinsichtlich des Alterungsverhaltens bereits bestätigen. Als nächster Schritt werden die Referenzschnellladestrategien für weitere Zellsysteme ausgelegt, um die Bedeutung der Zellsystemabhängigkeit von Ladebetriebsgrenzen analysieren zu können.

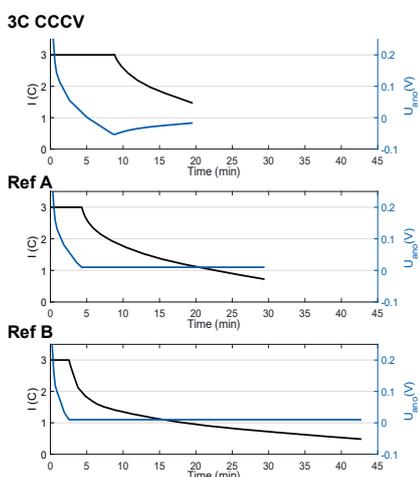


Abbildung 2: Vergleich zwischen drei Schnellladestrategien

PROJEKTNAME
FastChargeLongLife

LAUFZEIT
Oktober 2020 – September 2023

PROJEKTLOGO

ANSPRECHPARTNER / KONTAKT
Fabian Katschewitz
 ✉ f.katschewitz@tu-braunschweig.de
 ☎ +49 531 391-9723

PROJEKTPARTNER
InES (TU Braunschweig)
IPAT (TU Braunschweig)

GEFÖRDERT DURCH

 aufgrund eines Beschlusses
 des Deutschen Bundestages

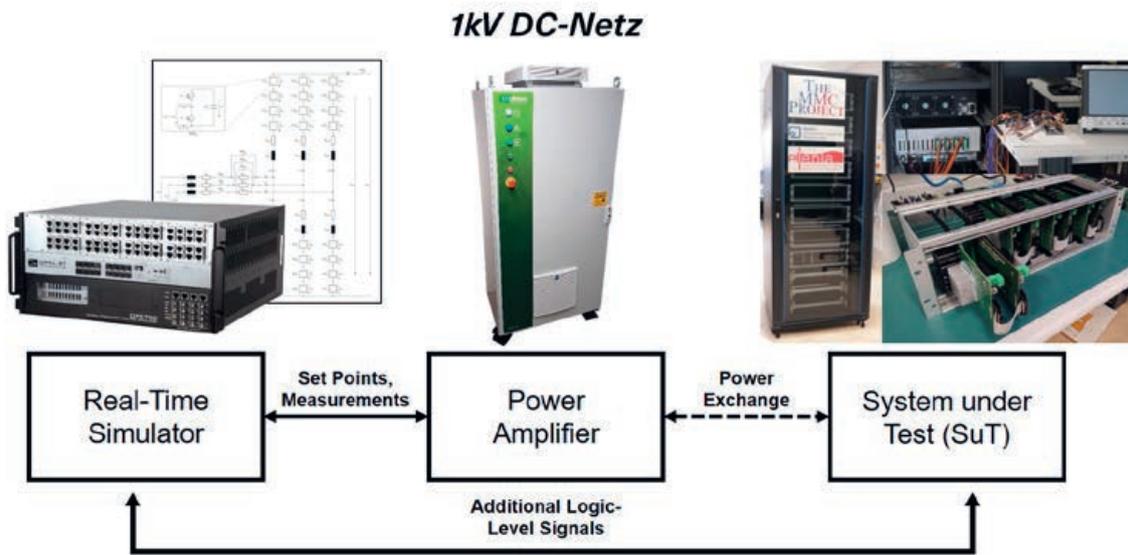


Foto: opal-rt.com, Frederik Anspach/TU Braunschweig

Netzsysteme der Zukunft

DC-Multispannungsebene Demonstrator zur Netzcharakterisierung, Entwicklung von Schutzsystemen und Intelligenten Technologien

Einleitung

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

Aktueller Projektstand

Das Projekt SMS-II ist mit einer Laufzeit von vier Jahren geplant. In diesem Jahr wird das dritte Projektjahr abgeschlossen. In der ers-

ten Projekthälfte (2019-2020) wurden diverse Fragestellungen und Entwicklungen im Bereich 1 kV bearbeitet. Folgende Meilensteine und Forschungsergebnisse sind erzielt worden:

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

In der zweiten Projekthälfte (2021-2022) liegt der Fokus auf der Erweiterung des Demonstrationsnetzes und der Ertüchtigung sämtlicher Peripherie für die 3 kV-Ebene. Im drit-

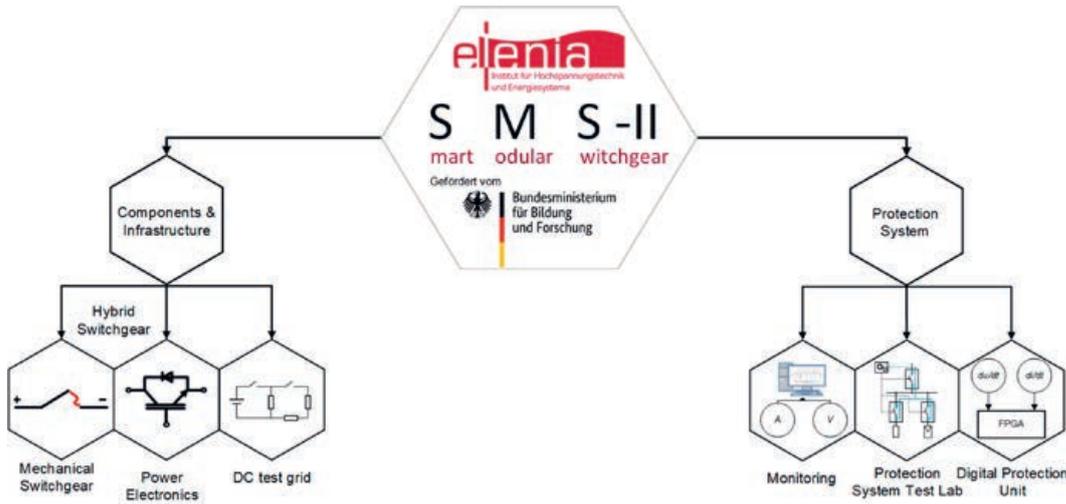
ten Projektjahr wurden bisher folgende Ziele erreicht:

- 1.) Definition von Schaltgerätetopologien für MVDC Netze
- 2.) Definition einer MVDC-Netztopologie mittels simulativ gestützter Voruntersuchungen
- 3.) Entwurf, Aufbau und Untersuchung eines 3 kV-Hybridschaltgerätes

Der Aufbau des 3 kV-Netzes, sowie die Anpassung der Messtechnik werden bis zum Ende des Projektes abgeschlossen sein. Die Erkenntnisse der erfüllten Teilarbeitsgebiete werden in den nachfolgenden Teilabschnitten detaillierter erläutert.

Schutztechnik

Im bisherigen Projektverlauf wurde ein modulares Schutzkonzept zur Identifizierung, Lokalisierung, Klassifizierung und selektiven Abschaltung von Stromfehlern in DC-Netzen bei Nennspannungen bis 1 kV und untersucht und stetig weiterentwickelt. Dabei wurden verschiedene Netztopologien betrachtet, welche sich bspw. auch durch unterschiedliche Spannungsebenen und Kopplung mittels DC-DC-Wandlern auszeichnen. Das Konzept des Schutzsystems beruht auf der permanenten Überwachung des Systemzustandes mittels Spannungs- und Stromsen-



soren, welche an den im Netz verwendeten Schaltgeräten installiert werden. Die Daten der Sensoren werden in einer zentralen Schutzeinheit zusammengeführt bevor dort über einen FPGA-Controller weitere, abgeleitete Größen aus den Messwerten berechnet werden. Die gemessenen und berechneten Größen dienen der Entscheidungsfindung des Schutzalgorithmus. Abhängig von der dynamischen Zustandsänderung des Demonstrationsnetzes, werden unterschiedliche Einschätzungen des aktuellen Status durch die Schutzeinheit vorgenommen und ggf. Handlungsanweisungen in Form von Schaltbefehlen an die Schaltgeräte weitergeleitet, um möglichst selektiv eine Fehlerklärung durchzuführen.

Die dezentrale Anwendung des Schutzalgorithmus auf verteilten Controllern war ein wesentlicher Meilenstein der ersten Projekthälfte. Im späteren Verlauf wird das System auch für die 3 kV-Ebene weiterentwickelt.

Demonstrationsnetz

Der multispannungslevel-DC-Demonstrator ist modular und bidirektional aufgebaut (Tabelle 1). Durch eine variables Stecksystem können sämtliche Netzstrukturen erzeugt werden. Für die Qualifizierung des genannten Schutzsystems für die höheren Spannungsebenen ist eine Anforderungsanalyse notwendig. Hierfür werden ausgewählte Systemzustände untersucht, um eine effiziente (Design of Experiments) Parametrisierung des Schutzsystems vorzunehmen. Ziel ist es nicht das Schutzsystem für eine bestimmte Netzstruktur zu parametrisieren, sondern der Fokus liegt auf der Entwicklung einer Methode, welche es erlaubt das Schutzsystem effizient auf diverse Netztopologien zu einzustellen.

Parameter	Wert
Spannungsebenen	380 V, 1000 V, 3000 V
Leistung	220 kW
Netztopologie	Industriernetze, Serverfarmen, Gebäudeversorgungen
Schaltgerätetyp	Hybrid
Lastfluss	Bidirektional
Lasten	Ohmsch, induktiv, kapazitiv, elektronisch
Verbindung zu anderen Netzeinheiten	Bidirektionale Kopplung zum AC-Netz

Tabelle 1: Kenndaten Demonstrationsnetz

Power-Hardware-in-the-Loop

Mittels Power-Hardware-in-the-Loop (PHIL) können weitere DC-Netzabschnitte und Betriebsmittel modelliert und in Echtzeitsimulationen ausgelagert werden.

Ein Leistungsverstärker bildet die Schnittstelle, so dass simulierte Strom- und Spannungssignale in Signale großer Leistung umgewandelt werden, die einen Leistungsaustausch mit dem Demonstrationsnetz ermöglichen. Dadurch können Interaktionen des DC-Netz-Demonstrators mit den modellierten Elementen analysiert werden. Diese Flexibilität erhöht die Zahl beobachtbarer Betriebs- und Fehlerzustände, so dass die Performance des Demonstrators mit weiteren Konfigurationen validiert werden kann.

Zusammenfassung

Der gegenwärtige Forschungsstand erlaubt bereits eine umfassende Analyse der zukünftigen DC-Netzstrukturen. Durch die Berücksichtigung der Schaltgerätektechnik und der Sensorik in der Systemanalyse wird ein weitreichendes Spektrum an Interaktionen zwischen Netzkomponenten bereits betrachtet. Der Blick in die Zukunft ist ausgerichtet, die Anwendbarkeit der Forschungsergebnisse in höheren Netzebenen soll mittels Power Hardware in the Loop im skalierten Maßstab untersucht werden.

tigen DC-Netzstrukturen. Durch die Berücksichtigung der Schaltgerätektechnik und der Sensorik in der Systemanalyse wird ein weitreichendes Spektrum an Interaktionen zwischen Netzkomponenten bereits betrachtet. Der Blick in die Zukunft ist ausgerichtet, die Anwendbarkeit der Forschungsergebnisse in höheren Netzebenen soll mittels Power Hardware in the Loop im skalierten Maßstab untersucht werden.

MITARBEITER



Frederik Anspach

✉ f.anspach@tu-bs.de
☎ +49 531 391-9736
🏠 R226



Lars Claaßen

✉ l.claassen@tu-bs.de
☎ +49 531 391-9715
🏠 R226



Patrick Vieth

✉ p.vieth@tu-bs.de
☎ +49 531 391-9725
🏠 R226



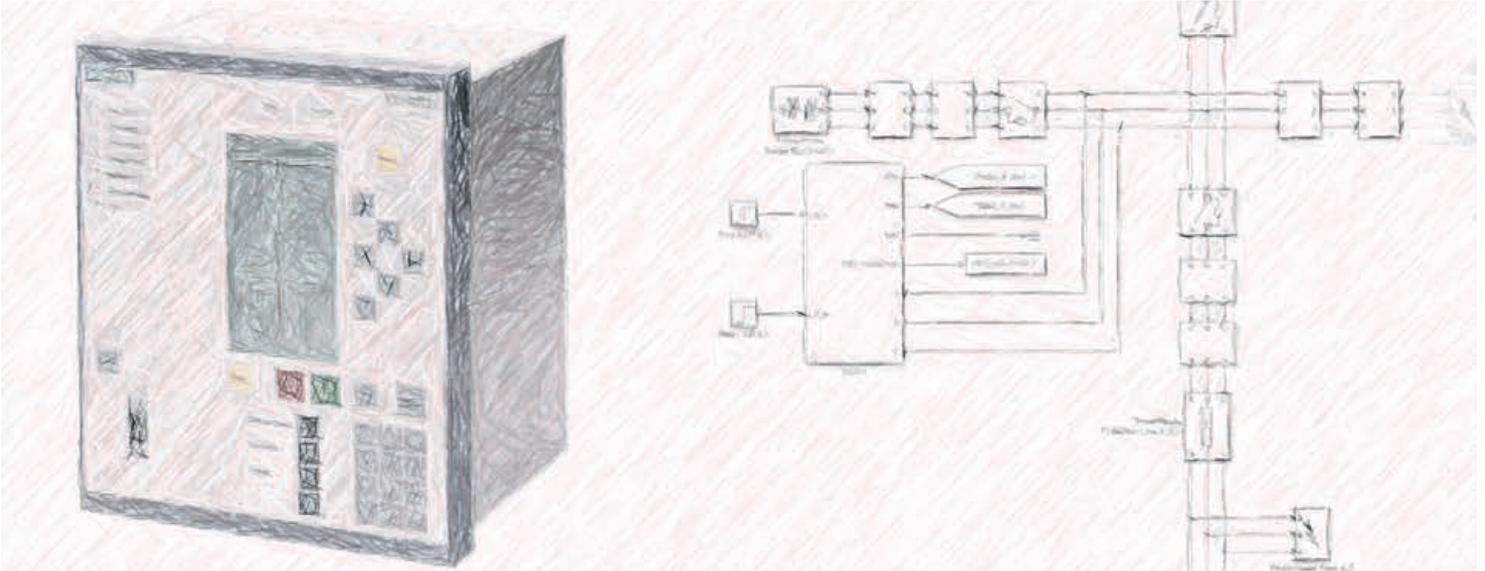
Marc René Lotz

✉ m.lotz@tu-bs.de
☎ +49 531 939 43 22 0
🏠 R249

GEFÖRDERT DURCH



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages



Schutzsysteme in Verteilnetzen

Model-Based Systems Engineering zur Auslegung von Schutzsystemen für umrichterdominierte Mittelspannungsnetze

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

Herausforderungen für Schutzsysteme

Konventionelle Schutzsysteme sind für den Netzbetrieb mit klassischer Leistungsflussrichtung von einer zentralen Einspeisung zum Verbraucher konzipiert. Die Integration dezentraler, erneuerbarer Energien im Verteilnetz sorgt dafür, dass sich die Richtung des Leistungsflusses ändert, es kommt zu Zwischeneinspeisungen. In Kombination mit der Charakteristik umrichterbasierter Anlagen entstehen Effekte, welche die Funktionalität der Schutzsysteme negativ beeinflussen. Variierende Kurzschlussstromlevel und Einspeisesituationen, sowie die Umrichterndynamik sorgen für negative Einflüsse hinsichtlich Selektivität und Schnelligkeit der Schutzsysteme, und können sogar Fehlauflösungen verursachen.

Ziele des Projekts

Innerhalb des Projekts werden die Herausforderungen für konventionelle Schutzsysteme zuerst mit Hilfe von Referenznetzen simulativ analysiert, um daraus Anforderungen an moderne Schutzsysteme in Netzen mit verteilten Umrichtern für einen sicheren und zuverlässigen Betrieb abzuleiten. Mit Hilfe dieser Anforderungen werden im Rahmen des Model-Based Systems Engineering (MBSE) Schutzsysteme und Algorithmen entwickelt. Anschließend wird das Schutzsystem mit Hilfe von Referenznetzen verifiziert und validiert.

MBSE zur Auslegung von Schutzsystemen

Ein Schutzsystem ist ein komplexes System mit vielen Anforderungen, Schnittstellen und Gestaltungsmöglichkeiten, was die modellbasierte Systementwicklung zu einem wertvollen Werkzeug für die Entwicklung von Schutzsystemen macht. Insbesondere mit dem Wandel zu einem Netz, das geprägt ist von erneuerbarer und dezentraler Energieeinspeisung, die auf Leistungselektronik basiert, muss das Schutzsystem angepasst werden. Die MBSE-Methodik basiert auf dem V-Modell, das in Abbildung 1 dargestellt ist.

Schutzsystems mit Hilfe des MBSE Mehrere Design-Ebenen gewährleisten ein strukturiertes Vorgehen und eine systematische Um-

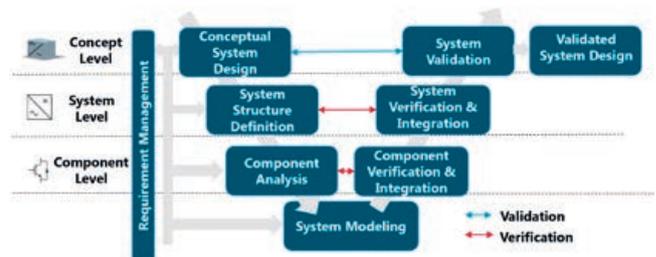


Abbildung 1: Schutzsystems mit Hilfe des MBSE

setzung der ursprünglich definierten Anforderungen. Der konzeptionelle Entwurf beschreibt das Systemziel, die Randbedingungen und die Systemstruktur, das erwartete Verhalten und die Funktionalität. Dies wird im nächsten Schritt auf die Systemebene übertragen, wo die am besten geeignete Schutzsystemstruktur auf der Grundlage einer Bewertungsmethodik ermittelt wird. Verifikation und Validierung sind beim MBSE von entscheidender Bedeutung, um sicherzustellen, dass das System entsprechend der Anforderungen entworfen wird und das richtige Systemdesign entwickelt wird. Für die Definition der Sys-

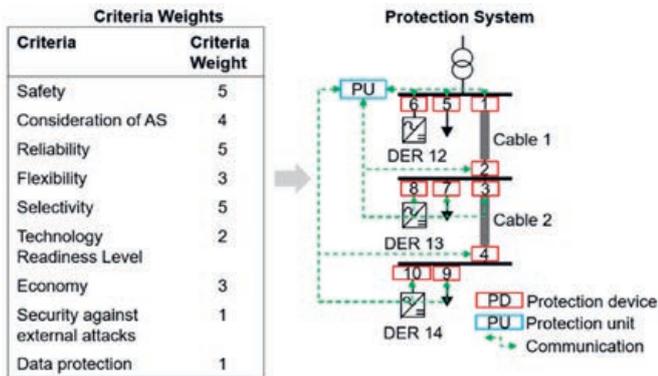


Abbildung 2: Kriteriengewichtung (1: geringer Einfluss bis 5: hoher Einfluss) und Schutzsystem Design

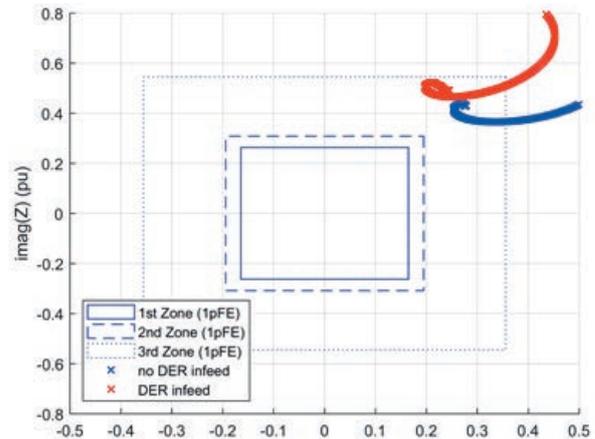


Abbildung 3: Beispielhafte Fehlmessung der Impedanz durch Umrichtereinspeisung

temstruktur wurden verschiedene Entwurfselemente wie der Standort eines Schutzgeräts, das Vorhandensein einer zentralen Schutzzeitheit und die Kommunikationsart herangezogen. Darüber hinaus wurden die in Abbildung 2 aufgeführten Kriterien angewendet. Diese Kriterien zusammen mit der Kriteriengewichtung führten zu dem am besten geeigneten Schutzsystem. Die Systemstruktur dieses Schutzsystems ist in Abbildung 2 dargestellt. Nachdem die Systemstruktur identifiziert wurde, besteht der nächste Schritt darin, weitere Details zum Schutzsystementwurf auf Komponentenebene gemäß des V-Modells hinzuzufügen, bevor mit der Systemmodellierung und -validierung fortgefahren wird.

Definition des Referenznetzes

Das als Basis dienende Referenznetz ist ein vereinfachter Ausschnitt eines deutschen Mittelspannungsnetzes. Das Netz wird in MATLAB/Simulink implementiert. Als relevante Schutzfunktionen werden Überstromschutz und Distanzschutz betrachtet. Die Erzeugungsanlagen werden mit ihrer Umrichtercharakteristiken, wie die dynamische Blindstromeinspeisung oder das Fault-Ride-Through-Vermögen, modelliert. An jedem Knoten im Referenznetz wird zudem die maximal zulässige Einspeiseleistung ermittelt, um die Anlagen zu parametrieren.

Analyse von Fehlerszenarien

Im Referenznetz werden Einspeiseorte, Fehlerarten und Fehlerorte kombiniert, um Fehlerszenarien zu definieren. Diese werden simuliert und anschließend ausgewertet. Bei der Auswertung wird die Funktionalität der Schutzsysteme ohne umrichterbasierte Anla-

gen mit der Funktionalität der Systeme mit den entsprechenden Anlagen im Netz verglichen. Dadurch kann analysiert werden, welche Effekte hinsichtlich der Performance von Schutzsystemen durch die Einspeisung mit Umrichtern hervorgerufen werden, und welche Auswirkungen diese besitzen.

Auswertung

Durch die Simulation der Fehlerszenarien kann gezeigt werden, dass die Funktionalität der Schutzsysteme durch vermehrte Einspeisung von umrichterbasierten Anlagen in mehreren Aspekten eingeschränkt ist. Es ist möglich, dass der Überstromschutz unselektiv wirkt, wenn keine richtungsabhängige Charakteristik verwendet wird. Zudem kann die Schnelligkeit, vor allem bei zeitabhängiger Charakteristik, beeinträchtigt sein. Beim Distanzschutz führen vor allem Fehlmessungen zu einer Einschränkung der Funktionalität. Dies äußert sich in einer Über- oder Unterreichweite, wobei die Schnelligkeit negativ beeinflusst wird. Zusätzlich können Fehler durch Fehlmessungen in gesunde Schutz-zonen hineinreichen, wodurch unselektive Auslösungen möglich sind. Die folgende Abbildung 3 zeigt ein Beispiel für eine Fehlmessung bei einem einpoligen Erdschluss.

Ausblick

Im weiteren Verlauf werden die Ergebnisse der Szenariensimulationen analysiert, um Anforderungen an moderne Schutzsysteme und deren Funktionalitäten abzuleiten. Der Entwurf des Schutzsystems wird dann auf Komponentenebene fortgeführt, um das Gesamtdesign zu implementieren und mit entsprechenden Simulationen im Referenznetz zu validieren.

PROJEKTNAME

SiNED

LAUFZEIT

November 2019–Oktober 2022

PROJEKTLOGO



ANSPRECHPARTNER / KONTAKT

Melanie Hoffmann

✉ melanie.hoffmann@tu-braunschweig.de

Marc René Lotz

✉ m.lotz@tu-braunschweig.de

PROJEKTPARTNER

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Leibniz Universität Hannover, TU Clausthal

WEBSITE

www.efzn.de/de/forschung/efzn-forschungslinien-und-querschnittsforschungsbereiche/efzn-forschungsverbuende-und-kompetenznetzwerke/sined/

GEFÖRDERT DURCH



Niedersächsisches Ministerium für Wissenschaft und Kultur

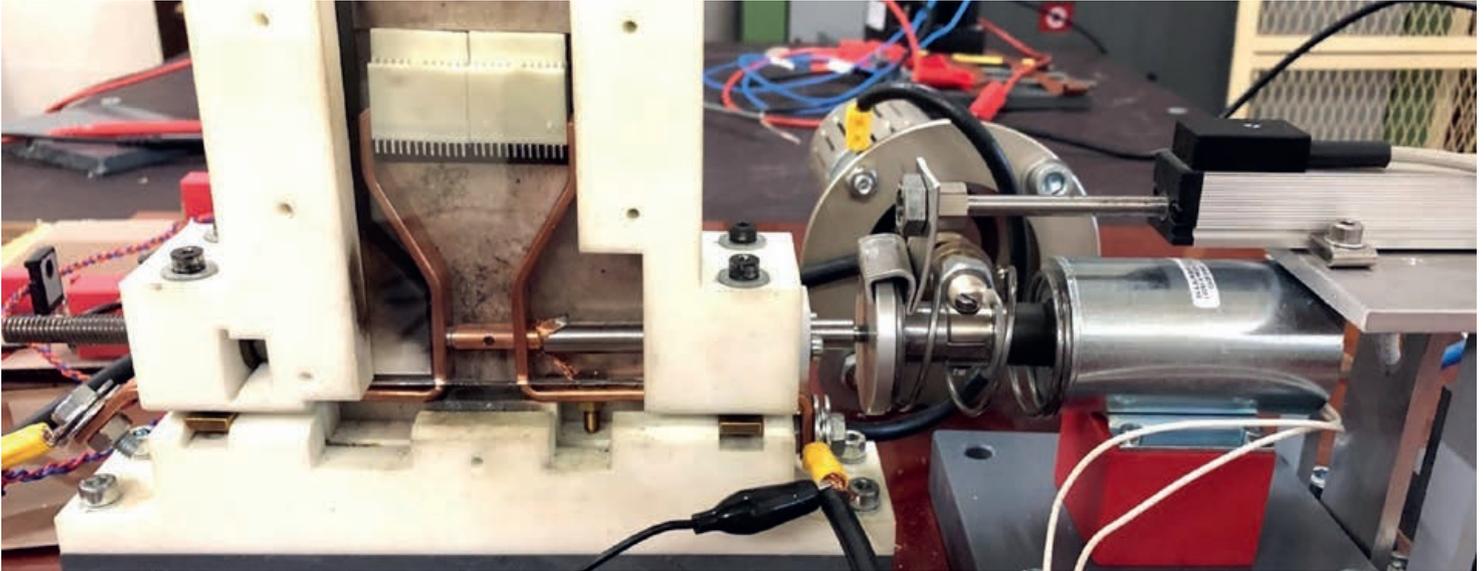


Foto und Grafiken: Patrick Vieth/TU Braunschweig

Universal Power Switch

Untersuchung und Optimierung von Hybridschaltgeräten

Der Anteil an Gleichstromnetzen nimmt immer mehr zu. Einsatzgebiete sind unter anderem Bordnetze in Elektrofahrzeugen, Schiffen oder Flugzeugen. Durch die Energiewende ist ein weiterer Anstieg mit der Nutzung von erneuerbaren Energien wie Photovoltaiksystemen, Batteriespeichern, oder der Netzanbindung von Offshore-Windparks zu erwarten. Um Fehlerfälle in diesen Netzstrukturen sicher Schalten 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 technologisch vielversprechende 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 – Universal Power Switch ein solcher Leistungsschalter entwickelt.

Schaltgeräteuntersuchungen

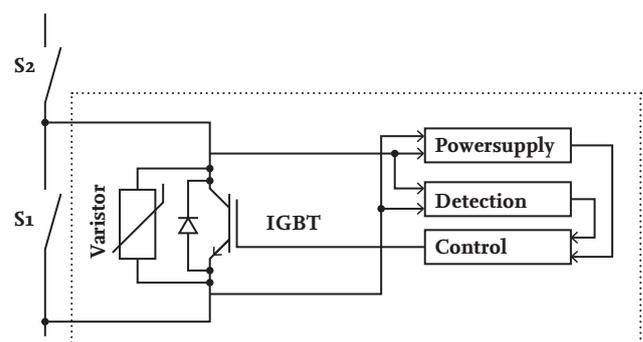
Für einen stabilen und sicheren Netzbetrieb sind Schaltgeräte notwendig, die Nenn-, Überlast- und Kurzschlussfälle in wenigen Millisekunden abschalten können. Aufbauend auf vorherigen Untersuchungen erweisen sich Hybridschaltgeräte hier als geeignete und herkömmlichen Schaltgeräten überlegene Technologie. Die Funktion der Hybridschalter wird in unseren Institutseigenen Prüffeldern (Laborbericht Gleichstromprüffelder) verifiziert und validiert.

Der Hybridschalter der im Projekt untersucht wird besteht aus einem pneumatisch angetriebenen mechanischen Schaltgerät, dem ein elektronisches Schaltgerät bestehend aus IGBTs mit Ansteuerungselektronik und einem Varistor parallelgeschaltet ist (siehe Abbildung). In den vergangenen beiden Projektjahren wurden die Untersuchungen mit dem Hybridschaltgerät für den Niederspannungs-Gleichstrombereich vertieft. Es sind verschiedene Optimierungspotenziale untersucht und bewertet worden. Insbesondere die

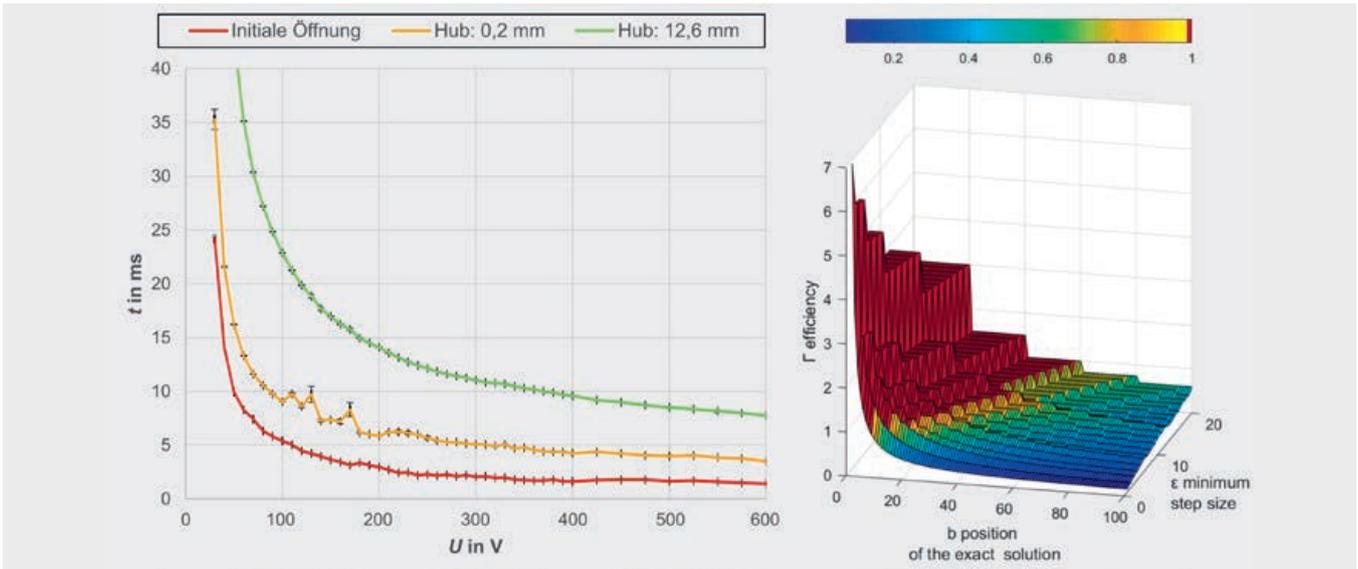
Schaltphasen beim Ausschalten sind in verschiedenen Veröffentlichungen analysiert worden. Den größten Einfluss auf die Ausschaltzeit zeigt die Schaltverzugszeit und die Bewegungsgeschwindigkeit der Kontakte. Beide Parameter sind abhängig vom verwendeten Aktuator. Weiterhin zeigt sich, dass Optimierungspotenzial bei der Einschaltdauer der IGBTs vorhanden ist und diese auf das Ausschaltverhalten abgestimmt werden muss. Dies lässt sich durch Anpassungen der Elektronik optimieren. Im Folgenden wird auf die Umsetzung der Optimierungspotenziale eingegangen.

Anpassung der Mechanik

Sowohl bei der Kontaktgeschwindigkeit, als auch der Verzugszeit zeigt sich der Einfluss des pneumatischen Antriebs auf die Ausschaltzeit. Die Antriebsgeschwindigkeit wurde bereits im Modellschalter durch die Verwendung einer angepassten Verklüpfung erhöht. Dies führte jedoch auch dazu, dass die Verzugszeit anstieg. Eine Änderung des Antriebskonzepts wird daher aktuell untersucht. Aufgrund der hohen Geschwindigkeit werden hierfür Thomson-Coil Aktuatoren als mögliches Konzept für Hybridschaltgeräte untersucht. Im HVDC-Bereich finden die Aktuatoren bereits erste



Schaltbild des untersuchten Hybridschaltgerätes



Links: Öffnungsverhalten des Hubmagneten; Rechts: Effizienz (blau) von Intervallhalbierung vs. Linearem Verfahren

Anwendungen. Aufgrund der geringen Verfügbarkeit und hohen Kosten wurde versucht, das Prinzip von Thomson-Coil Aktuatoren auf andere elektromagnetische Antriebskonzepte zu übertragen. Die grundlegende Funktion eines Thomson-Coil Aktuators beruht auf der kurzzeitigen Überlastung eines magnetischen Antriebs zur Erzeugung hoher Kräfte. Untersuchungen an verschiedenen Antrieben zeigen, dass Hubmagneten durch kurzzeitige Überlastungen deutliche Geschwindigkeitssteigerungen erzielen können. Anhand dieser Erfahrung wurde ein 24 V Hubmagnet mit einer maximalen Spannungsfestigkeit von 1000 V untersucht. Die Antriebsspannung wurde inkremental bis 600 V erhöht und das Öffnungsverhalten aufgenommen (siehe Bild oben). Je höher die Antriebsspannung eingestellt wird, desto geringer ist die Verzugszeit und desto höher ist die Bewegungsgeschwindigkeit. Der Hubmagnet wird im Impulsbetrieb thermisch belastet, es kommt allerdings nicht zum Erreichen der Curie-Temperatur. Die Anwendbarkeit des Thomson-Coil-Prinzips auf Hubmagnetantriebe konnte nachgewiesen werden. Die Antriebsverzugszeiten konnte von etwa 28 ms bei einer verklinten Pneumatik auf 1,5 ms reduziert werden. Die Durchschnittsgeschwindigkeit ist verdoppelt worden.

Anpassung der Elektronik

Neben der Antrieboptimierung wurde auch die Optimierung der Einschaltdauer der IGBTs als zielführende Verbesserung identifiziert. Die Einschaltdauer der IGBTs wird durch die Spannungsfestigkeit der Schaltstrecke nach Löschen des Lichtbogens beeinflusst. Die genauen Zusammenhänge werden am elenia im Rahmen mehrerer Dissertationen untersucht und sind aktuell noch nicht vollständig geklärt. Wird die Einschaltdauer der IGBTs zu kurz gewählt, kommt es zum Rückzünden des Lichtbogens. Wird die Zeit zu lang gewählt, steigt die thermische Belastung der Leistungshalbleiter und die Ausschaltzeit nimmt zu. Um eine schnelle Bestimmung der optimalen Einschaltdauer zu ermöglichen, wurden neue Methoden wie das Intervallhalbierungsverfahren verwendet. Dies erlaubt eine hinreichend genaue Ermittlung der minimal notwendigen Einschaltdauer der Elektronik durch verkürzte experimentelle Untersuchungen (siehe Bild oben). Die Ausschaltzeit für ohmsch-

induktive Überlastfälle bis 600 A konnte auf durchschnittlich 6 ms reduziert werden. Im Falle eines Kurzschlusses kann das mechanische Schaltgerät Ströme bis 3 kA schalten. Die Funktion des Schaltgerätes kann damit für alle Betriebsbereiche sichergestellt werden. In Kombination mit dem beim Projekt SMS-II entwickelten Schutzsystem können Fehler innerhalb von 7 ms erkannt und abgeschaltet werden. Mit Fertigstellung des im Projekt entwickelten Prüffeldes können höhere Betriebsgrenzen ermittelt und getestet werden.

PROJEKTNAME
Universal Power Switch

LAUFZEIT
Juli 2016–Dezember 2021

ANSPRECHPARTNER / KONTAKT
Dirk Bösche
 ✉ d.boesche@tu-braunschweig.de
 ☎ +49 531 391-7745

PROJEKTPARTNER
**E-T-A, Rockwell Automation, PTB, TU Braunschweig
 OFFIS e.V. – Institut für Informatik Oldenburg**

GEFÖRDERT DURCH



Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages



Bildmontage: SE²A/TU Braunschweig

SE²A

Sustainable and Energy-Efficient Aviation

Seit 2019 partizipiert das elenia aktiv am Exzellenzcluster SE²A – EXC 2163 (Sustainable and Energy-Efficient Aviation). In diesem Projekt arbeiten eine Vielzahl an Instituten der TU Braunschweig, der LUH, des DLR, der HBK und der PTB zusammen, um multidisziplinär eine neue Ära des Luftverkehrs proaktiv mitzugestalten.

Grundsätzlich ist der SE²A-Cluster in drei Forschungsschwerpunkte unterteilt:

- ICA A Assessment of the Air Transport System
- ICA B Flight Physics and Vehicle Systems
- ICA C Energy Storage and Conversion

Als Teil des Forschungsschwerpunktes ICA C untersucht das elenia in der Arbeitsgruppe „C4.2 – Power Supply System for All Electric Aircraft“ zusammen mit dem IMAB aus Braunschweig und dem IAL aus Hannover, Möglichkeiten zur Entwicklung eines elektrischen Bordnetzes für rein elektrisch betriebene Flugzeuge. Insbesondere die Grundlagen für Umrichter, Leistungselektronik, Schaltgeräte und Isiersysteme sind dabei im Fokus von ICA C 4.2.

Zu Beginn verschafften wir uns daher einen Überblick über die notwendigen technischen und normativen Randbedingungen. Die Umweltbedingungen in der Avionik, insbesondere Druck und Temperatur, stellen für Systeme mit hohen Versorgungsspannungen technologische Herausforderungen dar. Bei Konzepten wie den All-Electric-Aircraft sind höhere Versorgungsspannungen eine Grundvoraussetzung für die Funktionsfähigkeit, da die Masse des Bordnetzes so gering wie möglich gehalten werden muss. Die Erkenntnisse aus den Anforderungen hat die gesamte Arbeitsgruppe C 4.2 in einer umfangreichen Diskussion im multidisziplinären open access Journal „IEEE Access“ gemeinsam veröffentlicht. Das elenia ist hier unter anderem vertiefend auf die Anforderungen an Schaltgeräte und Versorgungsleitungen für All-Electric-Aircraft eingegangen.

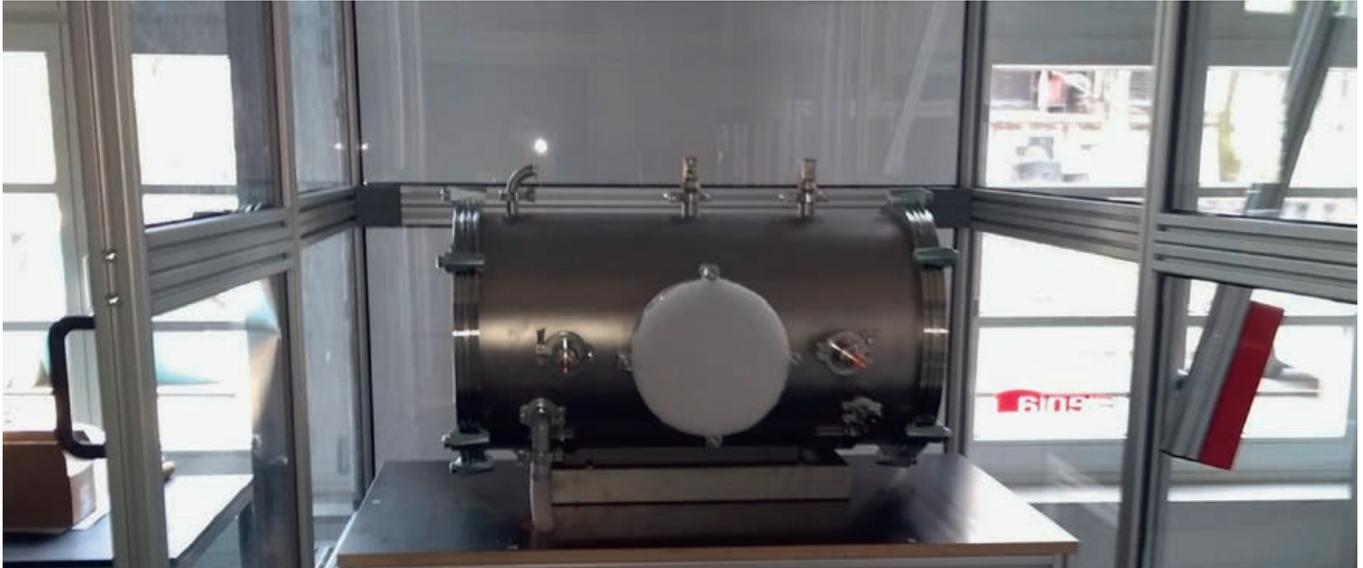
Die Entwicklung ganz neuer Luftfahrzeugtechnologien ist nur in einem methodisch sehr gut strukturierten Forschungsprojekt möglich. Konventionelle Forschungs- und Entwicklungsstrategien, die sich detailliert auf die jeweilige Komponente konzentrieren müssen mit Hilfe des Systems Engineerings in das Gesamtsystem integriert werden. Um während des Forschungsprozesses auf sich ändernde Anforderungen seitens unterschiedlicher Stakeholder reagieren können, verwenden wir den Ansatz des Model Based Systems Engineerings.

Für andere Partner stellen wir hier gravi- und volumetrische Modelle für Leitungen und Schaltgeräte zur Verfügung um andere Systemauslegungsprozesse zu unterstützen.

Zur Durchführung unserer Forschung ist eine Niederdruckkammer beschafft worden, welche es uns ermöglicht bei für die Avionik bedeutsamen Drücken (bis zu einigen mbar) Geometrien und Komponenten mit den aktuellen Verfahren der Hochspannungstechnik (Blitzstoss, DC- und AC-Prüfverfahren mit Spannungen bis zu 10 kV) in einem großen Volumen zu untersuchen.



Struktur des Exzellenzclusters



Niederdruckkammer für Hochspannungsuntersuchungen

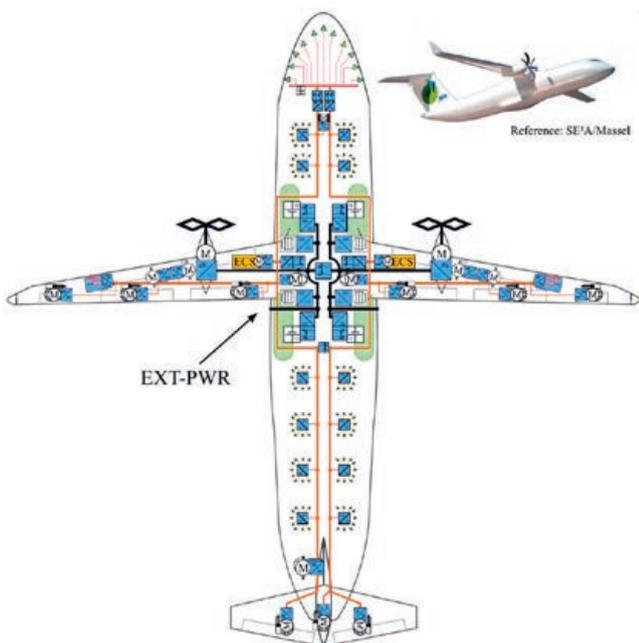
Foto: Tobias Hartmut Kopp/TU Braunschweig

Aktuell wird die Technik in und um die Prüfkammer automatisiert, sodass bei unterschiedlichen Abständen, Umgebungsdrücken, Spannungen und Spannungsformen vorgegebenen Prüfungen automatisiert gefahren werden können. Im Fokus stehen bei den geplanten Untersuchungen grundlegende Geometrieanordnungen mit einer geringen Messunsicherheit sowie unterschiedliche PCB-Anordnungen, die für höhere Spannungen und geringe Drücke qualifiziert werden sollen. In diesem Teilprojekt kooperiert das elenia zusammen mit dem IMAB aus Braunschweig.

Darüber hinaus entwickelt und untersucht das elenia mit Kollegen der TU Clausthal mögliche neue Bordnetz-Topologien. Durch

die Kombination des Model-Based Systems Engineering mit elektrotechnischer Simulationssoftware werden auftretende Lastflüsse und transiente Fehlerfälle in unterschiedlichen Topologien untersucht. Die Ergebnisse liefern wichtige Parameter zur Anforderungsdefinition an Komponenten. Die Auslegung der Komponenten bildet zusammen mit der Definition möglicher Systemarchitekturen die Grundlage zur Entwicklung eines geeigneten Bordnetz Designs für All-Electric-Aircrafts.

Durch die beschriebenen Forschungsaktivitäten hofft das elenia einen Teil zur Umsetzung der EU Strategie Flightpath 2050 beitragen zu können.



Bordnetzentwurf AEA (~30 x 30 m) Grafik: Hendrik Schefer/TU Braunschweig

PROJEKTNAME

Sustainable and Energy-Efficient Aviation

LAUFZEIT

Januar 2019 – Dezember 2025

PROJEKTLOGO



ANSPRECHPARTNER / KONTAKT

Tobias Hartmut Kopp

✉ t.kopp@tu-braunschweig.de

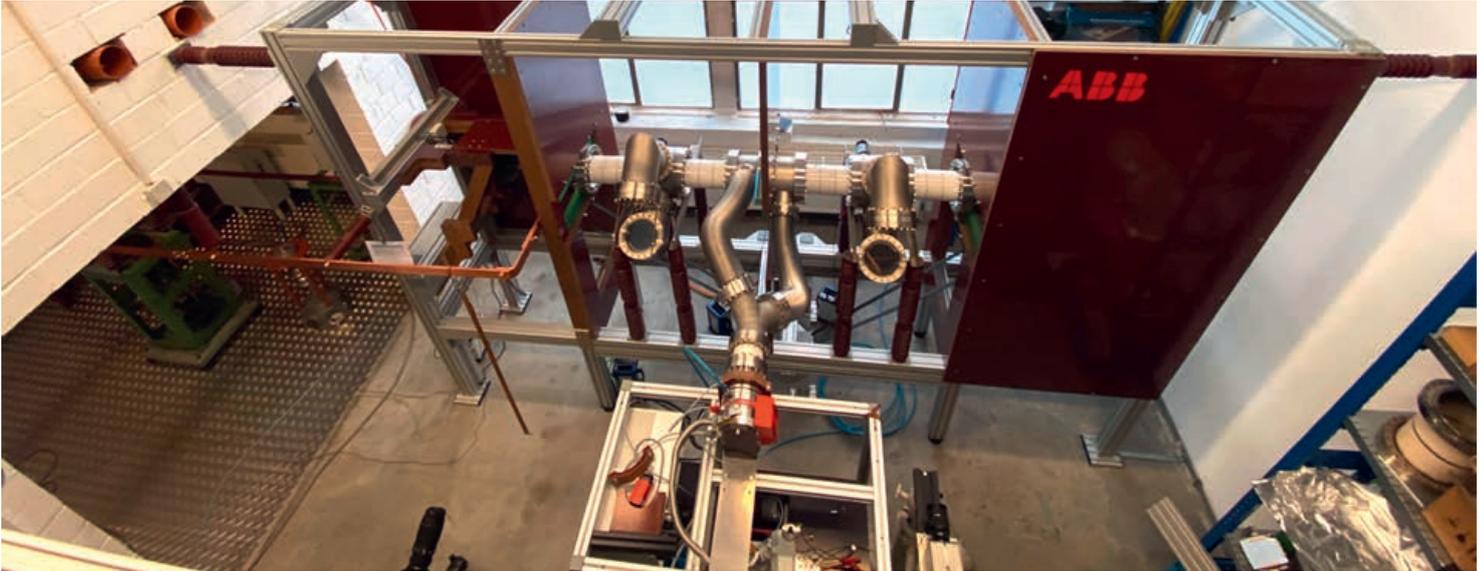
Melanie Hoffmann

✉ melanie.hoffmann@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391-7703

GEFÖRDERT DURCH





Hochspannungsvakuumschalter

Ökologische Lösungen für Leistungsschalter in der Energieübertragung

Um Vakuumleistungsschalter neben dem Mittelspannungsbereich auch im Hochspannungsbereich verwenden zu können, werden verschiedene Ansätze verfolgt: Zum einen die Verwendung langer Schalthübe und zum anderen die Reihenschaltung mehrerer Vakuumleistungsschalter. Um die Energieübertragung nachhaltiger mitzugestalten, sollen durch Vakuumschalter Treibhausgase aus den Netzen gedrängt werden bei gleichzeitiger Energieeinsparung durch geringere Übergangswiderstände. In den Projekten zu Vakuumleistungsschaltern am elenia werden die relevanten Vorgänge systematisch untersucht. Um auch im Hochspannungsbereich einsetzbar zu sein, muss ein Leistungsschalter im Extremfall Kurzschlussströme sicher ausschalten und der folgende Netzspannung standhalten. Die geöffnete Schaltstrecke muss außerdem die galvanische Trennung, während Blitzstoßbelastungen gewährleisten. Diese Belastungen sind nach Phasen aufgeteilt und in der Abbildung zu sehen. Die Kontakttrennung kann zu einem beliebigen Zeitpunkt bei Netzfrequenz starten. Die Trennung ist erfolgreich, sobald die leitfähige Verbindung aus abbrennendem Kontaktmaterial bei dem nächsten Stromnulldurchgang erlischt. Die sich wiederverfestigende Schaltstrecke mit den noch aufgeheizten Kontakten muss die anliegende Netzspannung halten ohne einen Durchschlag zuzulassen. Der geöff-

neten Schalter mit kalten Kontakten muss seinen isolierenden Zustand auch während eines Blitzeinschlags beibehalten.

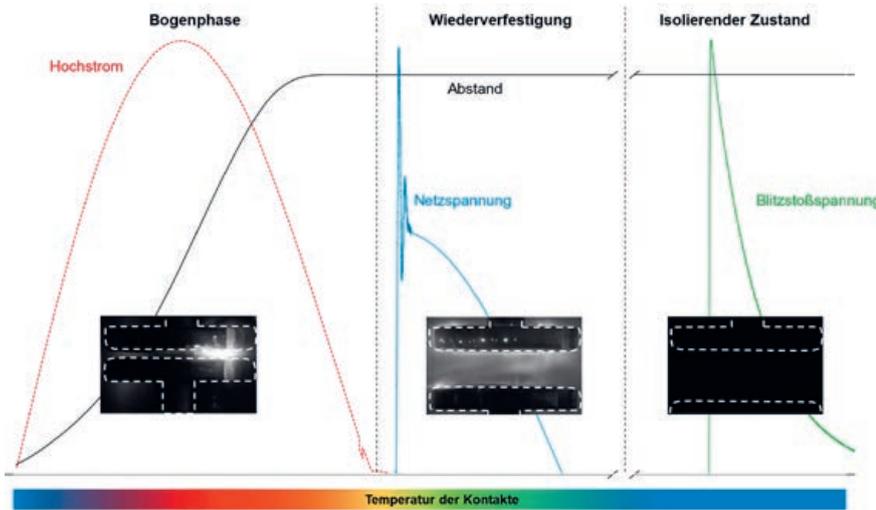
Untersuchung während der Bogenphase

Um Nenn- oder Kurzschlussströme abzuschalten wird ein beweglicher Kontakt von einem feststehenden Kontakt über einen Antrieb entfernt. Der Kurzschlussfall stellt dabei die größtmögliche Belastung dar und wird daher zur Prüfung im Forschungskontext herangezogen. Von der Kontakttrennung wird innerhalb von 10 ms der benötigte Abstand zur sicheren galvanischen Trennung erreicht. Der größere wachsende Abstand ist in der Abbildung dargestellt. Bei der Trennung wird durch ein Aufschmelzen der Kontaktoberfläche eine leitende Verbindung erzeugt, die im nächsten Nulldurchgang erlischt. Um die Schaltperformance eines Vakuumschalters zu verbessern muss die Energie dieses leitfähigen Plasmas möglichst gleichzeitig verteilt werden; nicht nur bei bekannten Abständen (15 mm), sondern auch bei größeren Abständen bis 30 mm. Um die Verteilung der Energie besser zu verstehen, werden aufwendig optische Beobachtungen durch Hochgeschwindigkeitskamera benutzt und kombiniert mit automatisierten, optischen Auswertungsverfahren. Das Ziel ist basierend auf den Erkenntnissen dieser Bogen-

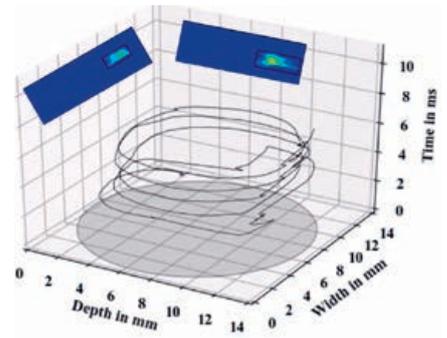
phase, möglichst optimal belastete Kontakte in die Wiederverfestigung zu übergeben.

Beschreibung der Wiederverfestigung

Nach dem Stromnulldurchgang und dem Erlöschen des Plasmas, wird die Schaltstrecke ihre dielektrische Festigkeit wiedererlangen. Diese Phase ist gekennzeichnet durch die vorherige Hochstromphase, in der der Vakuumbogen durch Kontaktabbrand leitfähige Partikel in der Schaltstrecke erzeugt. Diese leitfähigen Partikel werden während der Wiederverfestigungsphase zu der Kathode und Anode abgesaugt. Dieser Absaugmechanismus wird durch eine schnell ansteigende Wiederkehrspannung hervorgerufen. Das Abfließen der Partikel wird durch eine Nachstrommessung visualisiert. Das elenia erforscht das Plasmaverhalten in der Wiederverfestigungsphase durch methodische Auswertungsverfahren mit Hilfe von statistischen Versuchsplänen. Aus Nachstrommessungen werden Modelle entwickelt, die das Plasma beschreiben und durch optische Untersuchungen verifiziert werden können. Ziel ist es, Beschreibung des Plasmaverhalten zu ermöglichen und mit diesen Erkenntnissen eine erfolgreiche Ausschaltung für höhere Spannungsebenen zu generieren, somit wird eine erfolgreiche isolierende Phase eingeleitet. Weitere Schaltertechnologien wie eine Reihenschal-



Anforderungen an Leistungsschalter während und nach Ausschaltvorgängen (a.u.)



Rekonstruierte Bogenbewegung

Die Untersuchung von Vakuumleistungsschaltern können mit diesem Modell untersucht werden.

Untersuchung der elektrischen Festigkeit

Der Ansatz einer modularen Reihenschaltung von Vakuumleistungsschaltern bietet besonders für große Spannungsbelastungen einige Vorteile. Beim Einbau einer Reihenschaltung mehrerer Vakuumleistungsschalter z. B. in eine Schaltanlage kommt es jedoch durch die räumliche Nähe von geerdeten Oberflächen wie Absperrgittern oder Gehäusen zu einer Beeinflussung der Spannungsaufteilung über den einzelnen Vakuumleistungsschaltern. Um trotz dieses Einflusses eine symmetrische Spannungsaufteilung zu gewährleisten, ist eine Schirm- und Steueranordnung entwickelt worden, die über kapazitive Verkopplung der Schirme miteinander und mit den Metaldampfkondensationsschirmen der Vakuumleistungsschalter äußere Felder abschirmt und die Schaltstrecken symmetrisch steuert. Die Schirmanordnung besteht aus drei Aluminiumschirmen, die in der institutseigenen Werkstatt gefertigt wurden. Der obere und der untere Schirm sind rotationssymmetrische, einseitig geschlossene Zylinder mit einem Außendurchmesser von 21 cm. Der mittlere Schirm besteht aus einem rotationssymmetrischen Zylinder mit aufgesetztem Sockelring. Zur äußeren Isolation der Schirmanordnung wird wie im Innern

der Leistungsschalter Vakuum verwendet, hierzu erfolgt der Einbau in den Vakuumrezipienten in der Hochspannungshalle. Eine Pumpenkombination aus Drehschieber- und Turbomolekularpumpe ermöglicht Untersuchungen im Druckbereich von 10⁵ mbar bei Spannungen bis zu 400 kV. Die Versuche mit Blitzstoßspannung nach der up-and-down-Methode können mit dem Transienten-Recorder hochaufgelöst aufgezeichnet werden.

Neben der Untersuchung der elektrischen Festigkeit der Doppelunterbrechung mit Schirmanordnung ist die Symmetrie zur Beurteilung der Spannungsaufteilung wichtig. Hierfür steht die Entwicklung eines Messsystems für das Potential des isolierten Mittelschirms im Fokus der praktischen Tätigkeit. Das aufgebaute System aus in den Prüfling integriertem Zaengl-Teiler ermöglicht die Detektion von Teildurchschlägen in der Schirmanordnung und Doppelunterbrechung. Für die Optimierung der Schirmanordnung werden in diesem Projekt Simulationen und praktische Versuche kombiniert.

Auszeichnung

Im Rahmen der ISDEIV 2020 wurden die Beiträge der Vakuumtechnik mit großem Interesse verfolgt. Dies wurde durch die Organisatoren mit dem Best Video Award für die Arbeit von Benjamin Weber gewürdigt.

PROJEKTNAME

MoLiboA

LAUFZEIT

Januar 2019 – Dezember 2021

PROJEKTPARTNER

HST TU Darmstadt

GEFÖRDERT DURCH



PROJEKTNAME

EUDo & EUlaS

LAUFZEIT

EUDo: Jan. 2021 – Dez. 2022
EUlaS: Jan. 2020 – Dez. 2022

PROJEKTPARTNER



ANSPRECHPARTNER / KONTAKT

Benjamin Weber

✉ benjamin.weber@tu-braunschweig.de
☎ +49 531 391-7771

Timo Meyer

✉ timo.meyer@tu-braunschweig.de
☎ +49 531 391-9739

Karen Flügel

✉ k.fluegel@tu-braunschweig.de
☎ +49 531 391-7785

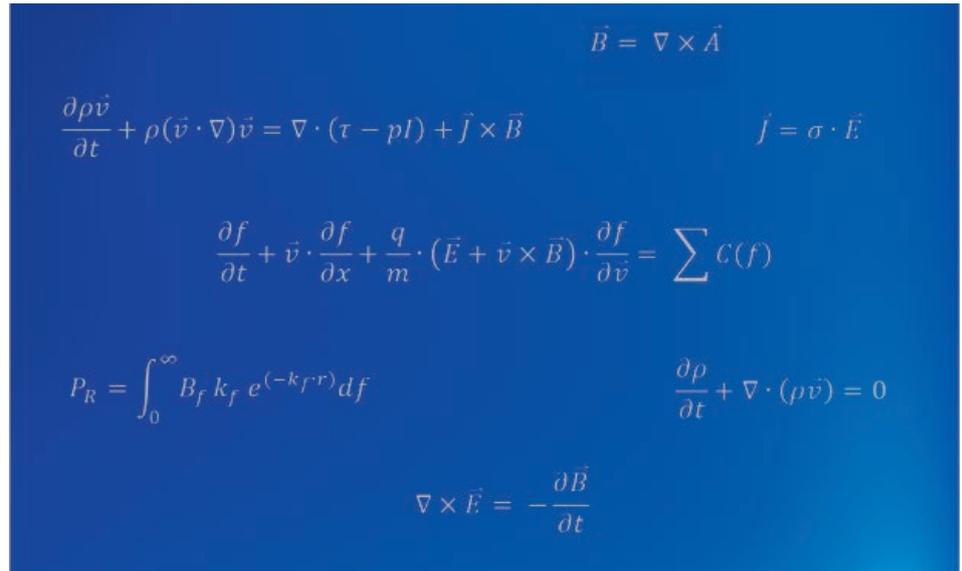
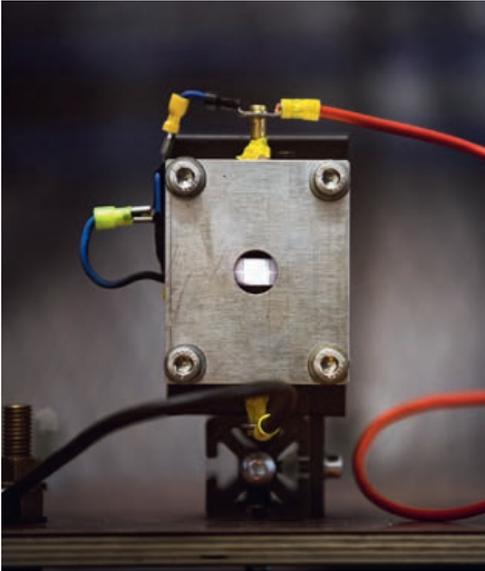


Foto: Max Fuhrmann/TU Braunschweig, Grafik: Muhamet Alija/TU Braunschweig

Experimentelle und theoretische Untersuchungen von Lichtbogenplasmen in Luft

Teil 1: Untersuchung des Verhaltens von Funkenstrecken nach Stoßstrombelastung

Einführung

Wir forschen am Institut im Team Plasmatechnik an Möglichkeiten Blitzschutzgeräte weiterzuentwickeln. Dazu verwenden wir ein Modell eines Blitzstromableiters auf Basis einer Funkenstrecke. Neben den praktischen Arbeiten im Blitzschutzlabor sind die theoretischen Untersuchungen ein sehr wichtiger Bestandteil. Hierzu beschäftigen wir uns ebenfalls mit der Entwicklung von umfangreichen Computermodellen und Plasmasimulationen, um ein noch tieferes Verständnis der Prozesse erlangen zu können. Dazu stehen die Berechnungen der thermodynamischen Eigenschaften, Transporteigenschaften und Strahlungsvorgänge für höhere Drücke von bis zu 500 bar und einem weiten Temperaturbereich von bis zu 150 kK im Vordergrund.

Einordnung der Forschung

Blitzschutzgeräte sind sogenannte Typ-1 Ableiter und sorgen in Verteilnetzen dafür, dass transiente Ergebnisse wie Blitzeinschläge sicher und störungsfrei geklärt werden. Die dabei entstehenden hohen Energien können durch die von der Funkenstrecke geschaffene Verbindung zum Schutzlei-

ter hin abgeleitet werden ohne dass angeschlossene Geräte beschädigt werden.

Prüfaufbau zur Untersuchung der Wiederkehrspannung

Zur Untersuchung der Blitzimpulse und deren Auswirkungen in dem Modellableiter steht im Blitzschutzlabor ein Stoßstromgenerator zur Verfügung. Die Stoßstromform ($8/20 \mu\text{s}$) bei den Prüfungen ist nach internationalen Normen standardisiert. Ziel der Untersuchung ist es, das entstehende Plasma zwischen den Kontakten der Funkenstrecke zu erforschen. In vorangegangenen Arbeiten wurde die Hochstromphase, der Zeitraum während der Stoßstrom fließt, untersucht. Weiterführend ist der Bereich nach dem Stoßstromnulldurchgang im Fokus. Da die Untersuchungen mit einem Niederspannungstransformator aufgrund der hohen Parametervielfältigkeit sehr komplex sind, wurde eine spezielle Schaltung entwickelt.



Abbildung 1: Prüfkreis zur Untersuchung des Netzfolgestromverhaltens von Funkenstrecken

Durch das Ersetzen des Transformators kann das Netzfolgestromverhalten mittels konstanter DC-Quelle untersucht werden. Der Prüfaufbau ist in Abbildung 1 dargestellt. Weiterhin kann dieses Verfahren dadurch motiviert werden, weil während der extrem kurzen Zeitdauer eines Blitzimpulses die sinusförmige Netzspannung als konstant angesehen werden kann. Die linke Masche des Prüfaufbaus in Abbildung 1 ist der Stoßkreis über den ein Stoßimpuls in die Modell-Funkenstrecke eingepreßt wird. Diese wird über eine am Institut entwickelte Zündvorrichtung zeitgenau getriggert, so dass der Stoßstrom fließen kann. Aufgrund des Widerstandes $R_{\text{prüf}}$ in der rechten Masche wird die Hochstromphase nicht beeinflusst. Nachdem sich die Energie des Stoßgenerators entladen hat, wird die Funkenstrecke mit einer Spannung U_{DC} belas-

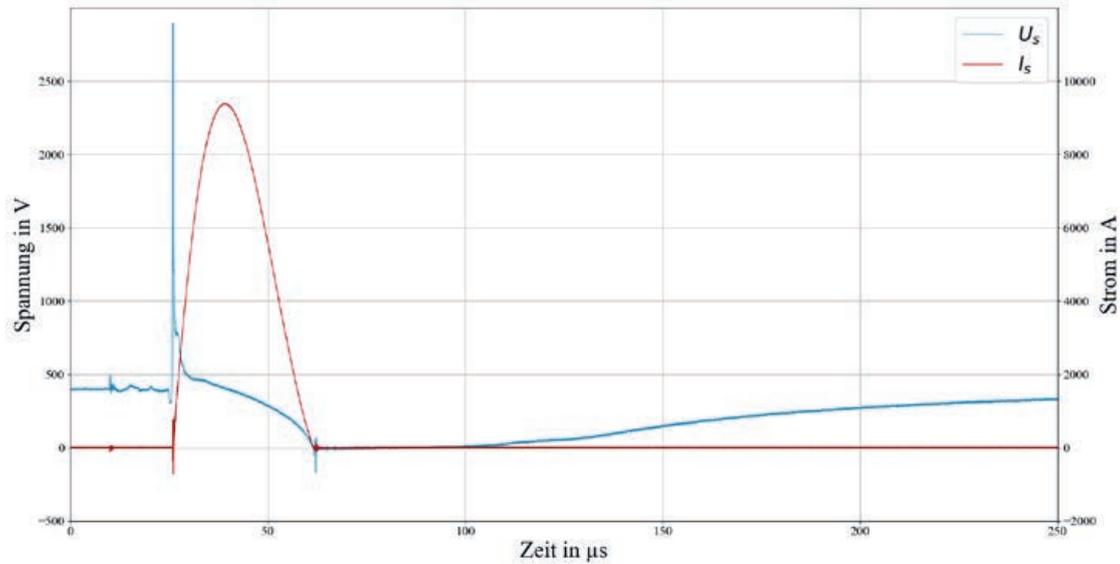


Abbildung 2: Messung der wiederkehrenden Spannung der Modell-FS mit Prüfkreis

Abbildungen: Enno Peters/TU Braunschweig

tet. Dabei werden die Klemmgrößen Strom und Spannung sowie interne Größen wie die Plasmaeigenschaften Plasmadruck gemessen. Außerdem wird über eine Hochgeschwindigkeitskamera (Zur Verfügung gestellt von der DFG – im Projekt „Magneto-Optische Lichtbogen-Analyse – MO-LiBoA“) die Hochstromphase mit visuellen Daten abgetastet werden.

Über ein Bildauswertungstool lässt sich die Ausbreitung des strahlenden Plasmas visualisieren. Weiterhin wird daran gearbeitet aus den Aufnahmen eine lokale Beschreibung in Form von Stromdichten zu erhalten, welche Aufschluss über Hotspots und damit erhöhtem Materialabbrand geben. Diese Hotspots können das zeitliche Verhalten nach dem Stoßstromnulldurchgang beeinflussen und ist daher Gegenstand aktueller Forschung.

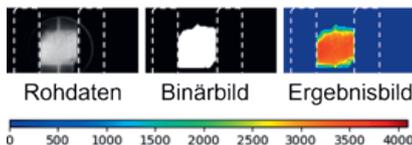


Abbildung 3: Bildverarbeitung zum Zeitpunkt des Strommaximums eines 10 kA

Auswertung

Grundsätzlich wird die Schaltstrecke hinsichtlich des Leitwertverhaltens unter verschiedenen Rahmenbedingungen, wie z. B. unterschiedliche Spannungsbelastungen, untersucht. Zielführend ist daher der Einsatz der neuen Zündbeschaltung, welche den folgenden Vorteil für Forschungszwe-

cke erfüllt. Sie ist zeitlich steuerbar und arbeitet unabhängig von dem Stoßkreis. Dadurch wird ein konstanter und reproduzierbarer Energieeintrag während der Zündung erzeugt, was die Vergleichbarkeit der Untersuchungen steigert. Weiterhin gibt es kein paralleles Element neben der Funkenstrecke, welches den Entionisierungsprozess unter Netzbelastung beeinflussen könnte, was eine gezielte Untersuchung ermöglicht.

Die Abbildung 2 zeigt die ersten Ergebnisse mit dem Prüfkreis zur Untersuchung des Entionisierungsverhaltens. Dabei ist zu erkennen, dass direkt nach der Zündung (Spannungsspeak) der Stoßstrom zu fließen beginnt. Nachdem der Stoßstrom abgeklungen ist, ist auch die Spannung an der Schaltstrecke wieder auf null zurückgegangen. Anschließend baut sich die Zahl der Ladungsträger ab, sodass sich die Spannung über der Strecke wiederaufbaut. In diesem Zeitbereich ist die rechte Masche aus Abbildung 1 aktiv.

Ausblick

Für zukünftige Untersuchungen ist es geplant die Komponenten des Prüfkreises und deren Wechselwirkungen im Zeitlichen Bereich ab dem Stoßstromnulldurchgang abzuschätzen. Damit ist eine Bewertung der gewählten Versuchsparameter, wie unterschiedliche Stoßstromamplituden und geometrische Änderungen der Modell-FS, möglich.

PROJEKTNAME

Lichtbogentechnologie

PROJEKTPARTNER



Phoenix Contact GmbH & Co. KG

ANSPRECHPARTNER / KONTAKT



Enno Peters

✉ e.peters@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391-7707

Teil 2: Computermodelle für thermische Plasmen

Einführung

Mit einem erfolgreichen Forschungsaufenthalt am Laplace-Forschungslabor der Université Toulouse III – Paul Sabatier in Frankreich konnte eine erfolgreiche Zusammenarbeit im Forschungsbereich der Plasmen aufgebaut werden. Während des Forschungsaufenthaltes wurden die theoretischen Modelle für die Plasmaeigenschaften vertieft und der Berechnungsrahmen für Plasmaeigenschaften für verschiedene Gasmischungen entwickelt. Die Plasmaeigenschaften sind für verschiedene Drücke und für höhere Temperaturen berechnet. Mit den Plasmaeigenschaften erfolgt die weitere Entwicklung des Berechnungsmodells für ein thermisches Plasma. In Abbildung 1 ist das Plasmalabor im Laplace Forschungszentrum dargestellt.

Ausgangspunkt für das Computermodell ist eine allgemeine physikalische Beschreibung des Plasmas. Dieses Modell eignet sich für eine räumliche und zeitaufgelöste Analyse des Plasmaverhaltens. Von der Einzelteilchenbeschreibung werden die grundlegenden Modellierungsgleichungen bis zur Beschreibung des Plasmas als Flüssigkeit entwickelt. Das Plasma wird als eine Flüssigkeit betrachtet, in der alle Spezies im Plasma die gleiche Temperatur haben.

Die Plasmaeigenschaften sind der Eingangsdatensatz für die grundlegenden Modellierungsgleichungen des Plasmas. Um die physikalischen Prozesse im Plasma zu untersuchen, werden weitere physikalische Bereiche hinzugefügt und im Berechnungsmodell gekoppelt.

Computermodelle

Ausgehend von der Lagrange und Hamilton Mechanik und unter Verwendung des Liouville Theorems kann die Verteilung der Spezies in einem Plasma abgeleitet werden. Die Verteilung ist durch die verallgemeinerte Boltzmann-Gleichung gegeben. Dabei handelt es sich um eine Einzelteilchenbeschreibung mit einer Abhängigkeit von sieben Variablen.

Aus der Boltzmann-Gleichung werden die Gleichungen der Magnetohydrodynamik (MHD) abgeleitet. Das Plasma wird als ein Fluid beschrieben. Das Plasma wird durch eine Reihe von Gleichungen beschrieben, die sich aus den Gleichungen zur Beschreibung der elektrischen und magnetischen Felder und der Beschreibung des Plasmas als Flüssigkeit zusammensetzen. Dieser Gleichungssatz wird gemeinsam gelöst.

Mass-Action Law und Chapman-Enskog Theorie

Plasmazusammensetzung und Kollisions Integrale

Thermophysikalische Plasmaeigenschaften

Abbildung 2: Berechnung der thermophysikalischen Plasmaeigenschaften

Die MHD-Gleichungen für das Plasma werden durch den Satz von Erhaltungsgleichungen für die Masse, das Moment und die Energie aufgestellt. Die Einflüsse der elektrischen und magnetischen Felder werden durch die Maxwell'schen Gleichungen formuliert. Der Gleichungssatz kann gekoppelt werden. Eine schwache Kopplung wird durch die Joule'sche Heizung und die Lorentzkraft formuliert.

Die Plasmaeigenschaften, die zu den Eingangsdaten für die MHD-Gleichungen gehören, werden im nächsten Unterabschnitt näher erläutert. Die Plasmaeigenschaften können in die thermophysikalischen und die Strahlungseigenschaften unterteilt werden.

Thermophysikalische Eigenschaften

Die thermophysikalischen Eigenschaften eines Plasmas umfassen die thermodynamischen Eigenschaften und die Transporteigenschaften. Die Eigenschaften stellen das physikalische Verhalten des das Plasma bildenden Gases dar. Außerdem sind die Eigenschaften das Bindeglied zwischen den mikroskopischen und den makroskopischen Größen.

Beide sind der Datensatz für die Berechnung der thermophysikalischen Eigenschaften.

Mit den Konzepten der statistischen Thermodynamik werden die thermodynamischen Eigenschaften durch verschiedene Funktionen berechnet. Diese Funktionen sind die Massendichte, die Enthalpie und die spezifische Wärmekapazität.

Die Transporteigenschaften werden durch die Anwendung der Chapman-Enskog-Theorie berechnet. Sie liefert die rele-



Abbildung 1: Plasmalabor im Laplace Forschungszentrum

Alle Abbildungen: Muhamet Alija/TU BS

vanten Kollisionsintegrale zur Berechnung der binären Diffusion, der Viskosität, der Wärmeleitfähigkeit und der elektrischen Leitfähigkeit des Plasmas.

In Abbildung 2 sind die Schritte zur Berechnung der thermophysikalischen Plasmaeigenschaften dargestellt.

Die Eigenschaften werden in einem breiten Druck- (1 bar–500 bar) und Temperaturbereich (300 K–150.000 K) berechnet. Abbildung 3 zeigt ein Beispiel für die berechneten elektrischen über die Temperatur und für vier verschiedene Drücke.

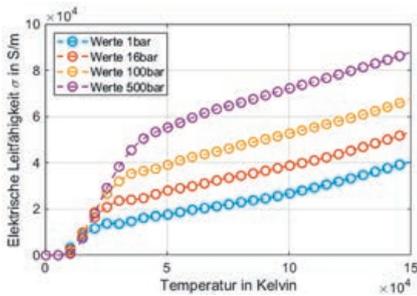


Abbildung 3: Berechnete elektrische Leitfähigkeit [1]

Strahlungstransport

Die Berechnung der Strahlungseigenschaften vervollständigt die Berechnung der Plasmaleigenschaften. Es wird eine genaue Berechnung der Strahlungsmechanismen im Plasma durchgeführt. Diese umfasst die Spektrallinien und das Kontinuum der Atome und Moleküle, sowie die Bandensysteme der Moleküle im Gasgemisch. Mit den Strahlungsmechanismen können die Emissions- und Absorptionskoeffizienten berechnet werden. Die Koeffizienten sind der Datensatz für den Strahlungstransport. Die Koeffizienten werden in die Strahlungstransportgleichung aufgenommen.

Der Strahlungstransport ist ein wichtiger Bestandteil für den Energietransport im Plasma. Für eine geeignete numerische Lösung der Strahlungstransportgleichung werden verschiedene Strahlungsmodelle verwendet. Dies ist der Netto-Emissionskoeffizient oder die PN-Näherung. In Abbildung 4 ist der Netto-Emissionskoeffizient für ein Luftplasma für unterschiedliche Drücke in einem weiten Temperaturbereich dargestellt.

Zusätzliche Gleichungen für die Strahlung werden in das Computermodell im-

plementiert und zusammen mit den MHD-Gleichungen gelöst.

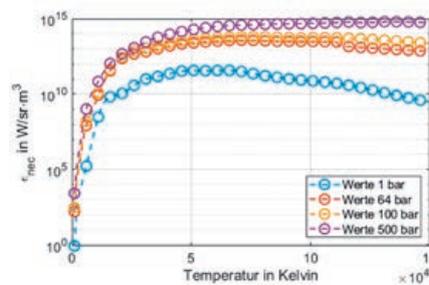


Abbildung 4: Berechneter Nettoemissionskoeffizient [1]

Plasma-Elektroden Interaktion

Ein weiterer Teil des Berechnungsmodells ist die Plasma-Elektroden-Wechselwirkung. Diese wird durch Gleichungen für den Strom- und Wärmeübergang formuliert. In den Elektroden werden die Strom- und Wärmeleitungsvorgänge berücksichtigt. Hierfür werden die Eigenschaften der Elektroden benötigt. Zu den temperaturabhängigen Eigenschaften der Elektroden gehören die Wärmekapazität, die elektrische Leitfähigkeit, die Wärmeleitfähigkeit und die Strahlungseigenschaften.

Lösung Computermodell

Das theoretische Modell wird aus den Grundgleichungen und -eigenschaften für das Plasma und die Elektroden entwickelt. Unter Berücksichtigung geeigneter Vereinfachungen und Annahmen wird ein mathematisches Modell erstellt. Das mathematische Modell besteht aus einer Reihe von gekoppelten Differentialgleichungen, die für das Berechnungsgebiet gelöst werden. Die Lösung der Gleichungen erfolgt durch geeignete numerische Methoden. Die Schritte, die die Entwicklung des Rechenmodells umreißen, sind in Abbildung 5 dargestellt.

Geeignete numerische Methoden für die Diskretisierung der Differentialgleichungen sind die Finite-Elemente-Methode oder die Finite-Volumen-Methode. Mit den Randbedingungen wird aus dem Satz der Differentialgleichungen ein lineares Gleichungssystem gewonnen. Weitere iterative Verfahren werden zur Lösung des linearen Gleichungssystems eingesetzt.

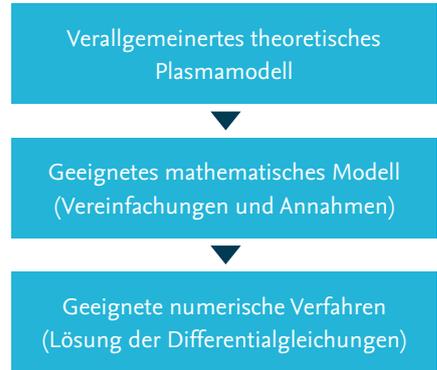


Abbildung 5: Ablauf der Entwicklung des Computermodells

Ausblick

Die Simulation der Prozesse und Wechselwirkungen im Plasma sind Gegenstand weiterer Untersuchungen.

Quellen

M. Alija, Y. Cressault, P. Teulet, M. Kurrat, *Thermophysical and radiative properties of an air arc plasma for high pressure and temperature*, CAE Conference Rouen, Frankreich, 28.06–29.06.2021

Forschungsbereich Plasmen

FORSCHUNGSPARTNER



TU Braunschweig – Institut für Theoretische Physik



Université Toulouse III Paul Sabatier, Laplace Research Center

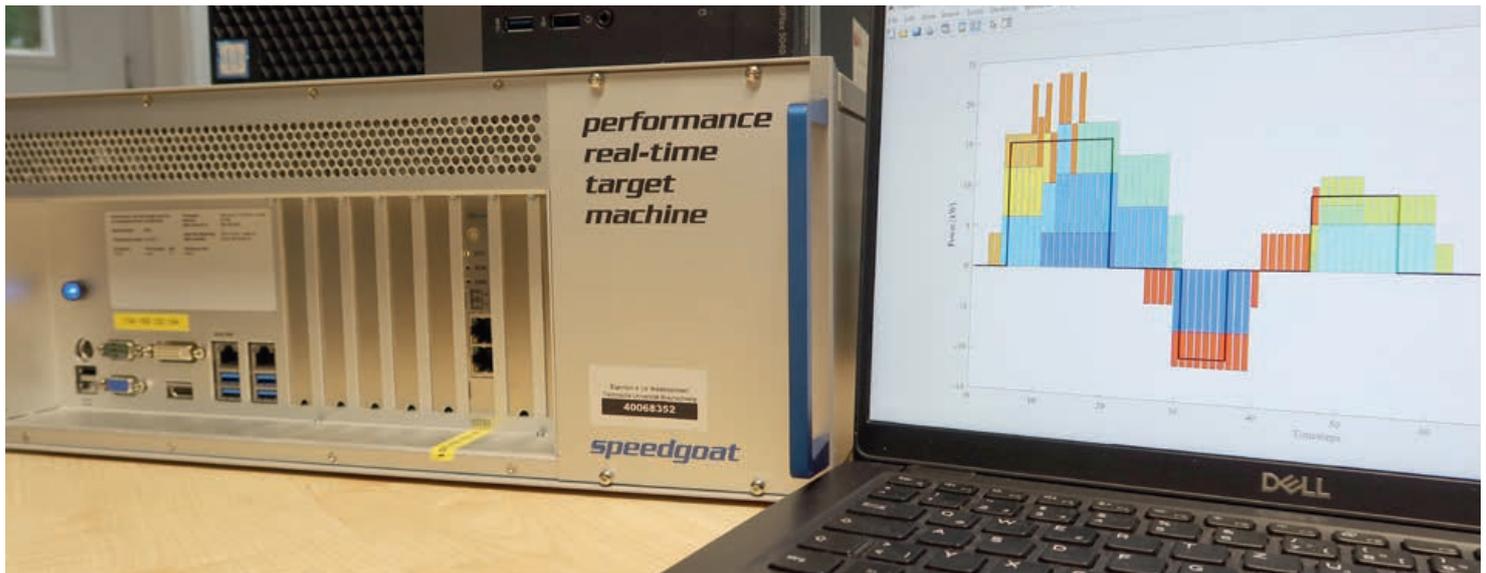
ANSPRECHPARTNER / KONTAKT



Muhamet Alija

✉ m.alija@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391-7743



flexess

Entwicklung von Strategien und Lösungen zur Ausschöpfung zukünftiger Flexibilitätspotentiale

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

Sektorenübergreifende Flexibilitätshbereitstellung

Für die Bereitstellung von Flexibilität werden die vier Fallstudien vollelektrische Haushalte, Gewerbe, Handel und Dienstleistungen, Industrieprozesse sowie Elektromobilität unter Berücksichtigung regulatorischer Rahmenbedingungen und wirtschaftlicher Anreize betrachtet. Die vier Teilsysteme werden über die Komponenten Netzbetreiber, Aggregatoren/ Strommarktteilnehmer und Strommärkte zentral zu einem Gesamtsystem gebündelt.

Die Fallstudie Haushalte umfasst die Untersuchung zu Flexibilitätspotentialen in Einfamilien- und Mehrfamilienhäuser im Bestand sowie Neubauten. Als Flexibilitäten ist der Einsatz von Photovoltaik-Anlagen, Batteriespeichern, Elektrofahrzeugen sowie Wärmepumpen

in Verbindung mit einem lokalen Energiemanagement denkbar.

Im Bereich von Gewerbe, Handel und Dienstleistungen soll insbesondere das Flexibilitätspotential vorhandener Klimatisierungssysteme von Supermärkten oder anderen Filialisten untersucht werden.

Der Industriesektor bietet aufgrund hoher Energiebedarfe und umfangreicher Regelungsmöglichkeiten der Prozesse und Maschinen hohe Flexibilitätspotentiale. Erlöse aus Eigenenerzeugung und Speichermöglichkeiten können zusätzliche wirtschaftliche Anreize bilden, um Flexibilitätspotentiale zu nutzen.

Die Fallstudie Elektromobilität setzt sich konkret mit dem Potential von Flexibilität im Kontext der Anwendungsmöglichkeiten für Fahrzeugflotten, z. B. der Einsatz als flexible Energiespeicher, auseinander.

Netzdienlicher und marktorientierter Flexibilitätseinsatz

Neben potenziellen Anbietern von Flexibilität werden in flexess ebenfalls mögliche Flexibilitätsnutzer betrachtet. Im Gegensatz zu den meisten verwandten Forschungsprojekten werden hierbei sowohl der netzdienliche Einsatz als auch die Vermarktung von Flexibilitäten an den relevanten Energiemärkten untersucht.

Während der netzdienliche Einsatz sich auf die kosteneffiziente Behebung von Netzeng-

pässen in der Verteilnetzebene fokussiert, wird bei der Vermarktung von Flexibilität an den Energiemärkten das Potenzial zur aggregierten Beschaffungsoptimierung durch flexible Betriebsweisen identifiziert.

Untersuchungsziele

Das Hauptziel des Forschungsvorhabens ist die Entwicklung von Strategien und Lösungen zur Ausschöpfung zukünftiger Flexibilitätspotentiale in den zu untersuchenden Fallstudien im Rahmen einer Strom-, Wärme- und Mobilitätswende.

Hierfür werden Methoden, Technologien und Lösungen zur Flexibilisierung in den vier definierten Fallstudien erarbeitet und angewendet. Diese Inhalte sollen sowohl auf Modell- als auch auf Laborebene sowie im Rahmen von Feldtests erprobt werden. Innerhalb des Feldtests ist zu untersuchen, inwieweit bereits vorhandene Infrastrukturen (z. B. intelligente Messsystem/Smart Meter Gateway oder Monitoring-Portale) genutzt werden können, um eine kostengünstige Anlagenanbindung zu realisieren.

Ein weiteres Ziel dieses Projektes ist die Entwicklung innovativer Geschäftsmodelle für Anbieter von Flexibilität.

Ausgehend von den Ergebnissen werden die entwickelten Methoden, Technologien und

Lösungen bewertet und abschließend Handlungsempfehlungen für die Energiepolitik sowie die Energiewirtschaft abgeleitet.

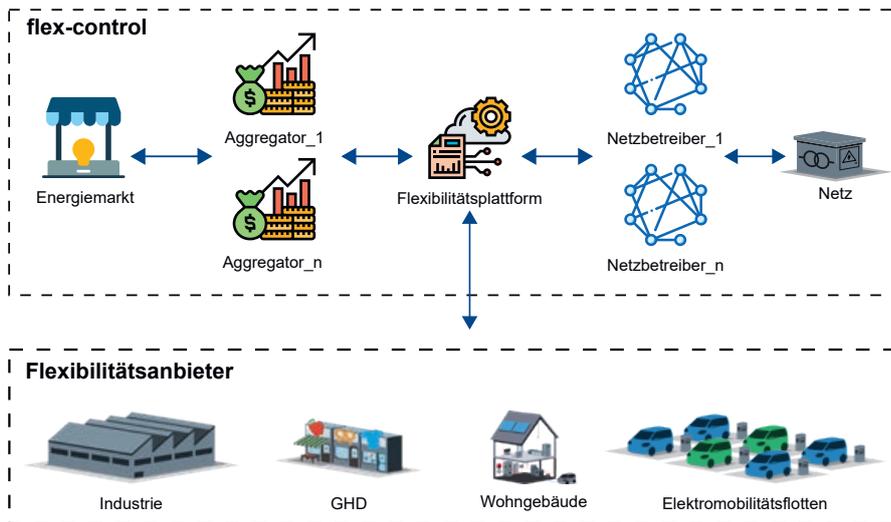
Modellierung und Simulation

Für die Simulation werden die in den unterschiedlichen Fallstudien betrachteten Flexibilitätsanbieter von den zuständigen Projektpartnern modelliert und über die Co-Simulationsplattform TISC miteinander gekoppelt. Das elenia übernimmt dabei die modelltechnische Abbildung von flexibel steuerbaren Wohngebäuden und Elektromobilitätsflotten in der Simulationsumgebung eSE (elenia Simulation Environment).

Mögliche Flexibilitäten werden von jedem Anbietern in Form von variierenden Fahrplänen und Preisen an den zentralen Flexibilitätsmanager flex control übermittelt. Dieser in eSE modellierte Manager besteht aus den Akteuren: Flexibilitätsplattform, Netz-betreiber, Aggregator und Energie-markt. Der Flexibilitätsmanager wird so entworfen, dass er in allen Simulationsstudien, Laborversuchen und Feldversuchen mit entwickelten Schnittstellen eingesetzt werden kann.

Nach einer definierten zeitlichen Abfolge werden die Flexibilitätsangebote einem Netzbetreibermodell zur Verfügung gestellt, welches auf Basis von Netzzustandsprognosen eines hinterlegten Netzmodells, den Einsatz von Flexibilitäten zur Behebung von Netzengpässen kostenoptimal plant. Nicht für den netzdienlichen Einsatz genutzte Flexibilitäten werden über die Plattform an einen Aggregator weitergeleitet. Dieser poolt unter Berücksichtigung von geltenden Marktrestriktionen die übergebenen Fahrpläne, zur optimalen Vermarktung der Flexibilität an den Strommärkten. Vermarktete oder zum Netzengpass-management eingesetzte Flexibilitäten werden an die Anbieter gemeldet. Diese sind für die Umsetzung der Fahrpläne mit Ihren Anlagen anschließend zuständig. Die Erbringungskontrolle und die Abrechnung wird am Ende der Simulation in der Plattform durchgeführt und Vergütungen für die angebotene Flexibilität der Anbieter berechnet. Schlussendlich entsteht ein System zur Untersuchung des Flexibilitätsmanagements in der Energieversorgung.

Flexibilitätseinsatz im Labor- und Feldversuch
Ergänzend zur Entwicklung und simulativen Untersuchung der Flexibilisierungsstrategien werden diese für die Fallstudie Haushalte im Energiemanagementlabor (EML) des Laborverbunds elenia-energy-lab erprobt.



Modellstruktur des Flexibilitätsmanagers flex-control

Ausgangspunkt stellt das im Rahmen des Teilvorhabens angeschaffte Echtzeitrechnungssystem (Real-Time Simulation System) dar. Mittels der Entwicklungsumgebung MATLAB Simulink Real-Time (Simulink RT) wird eine modulare Laborsteuerung nach dem Hardware-in-the-loop-Prinzip (HiL) umgesetzt.

Das HiL-Prinzip ermöglicht die Analyse und Validierung der entwickelten Flexibilisierungsstrategien durch Abbildung eines Modellhaushalts mittels Hardwaregeräte (PV-Anlage, Batteriespeichersystem, Wallbox, Wärmepumpe). Hierzu wird auf der grafischen Programmierenebene von Simulink RT ein mehrschichtiges Blockschaltdiagramm erstellt, das die koordinierte (bidirektionale) Kommunikation mit den Anlagenbestandteilen übernimmt.

Die weiche Echtzeitanforderung sieht die sekundliche zyklische Abfrage der Leistungswerte und weiterer dynamischer Anlagenparameter vor. Basierend auf Prognosen für Last- und Erzeugungsleistung sowie Anwesenheits- und Nutzungsprofilen fließen die Zeireihen in die Fahrpläneerstellung zur Bereitstellung von Flexibilität aus den verwendeten Anlagen ein. Nach Übermittlung der alternativen Fahrpläne an die Flexibilisierungsplattform flex-control wird der von den Flexibilitätsnutzern gewählte Fahrplan zurück an das Energiemanagementsystem innerhalb der Echtzeitlaborsteuerung gemeldet und in aktive Leistungsvorgaben für die Anlagen umgesetzt. Der Echtzeitbetrieb im geschlossenen Wirkungskreis ermöglicht es, die Auswirkungen des realen Geräteverhaltens auf das Anbieten und den Abruf von Flexibilität zu untersuchen und zu optimieren.

Ergänzend zu den Laborversuchen im EML werden die entwickelten Methoden in einem weiteren Laborversuch der Lernfabrik des IWF eingesetzt. Dort werden Industrieanlagen

nachgebildet, flexibilisiert und mit dem Flexibilitätsmanager gekoppelt. Identisches Vorgehen wird bei den Feldversuchen mit der REWE und den Berliner Verkehrsbetrieben angewendet.

PROJEKTNAME

flexess

LAUFZEIT

Dezember 2019 – Dezember 2022

PROJEKTLOGO



ANSPRECHPARTNER / KONTAKT

Christian Reinhold

✉ c.reinhold@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 591-9716

PROJEKTPARTNER

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

WEBSITE

www.tu-braunschweig.de/elenia/forschung/flexess

GEFÖRDERT DURCH



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages



Innovative Prosumerhaushalte

Entwicklung und Umsetzung von Betriebsstrategien für Prosumer-Haushalte im Anwendungsfeld stationärer 2nd-Life-Speicher

In einem Energiesystem mit zeitweise 100 % Energieeinspeisung aus regenerativen Energien spielen auf Haushaltsebene installierte Erzeugungsanlagen, ergänzt um Speicherkonzepte wie (2nd-Life-)Batteriespeicher aus Netzsicht eine entscheidende Rolle. Die technischen Komponenten (siehe Abbildung 1) 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 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).

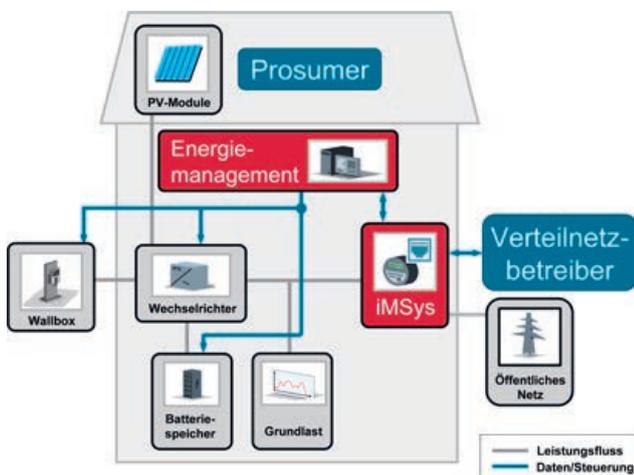


Abbildung 1: Komponenten des im Projekt NetProsum2030 betrachteten Prosumer-Haushalts

Betriebsstrategie zur Berücksichtigung dynamischer Stromtarife

Zu Beginn des Projektes wurden anhand von Jaressimulationen basierend auf Datenanalysen und Nutzungsprofilen die aus Prosumersicht wirtschaftlichste Dimensionierung für die PV-Anlage und den Batteriespeicher auf Basis der Kapitalwertberechnung ermittelt.

Unter Berücksichtigung des angenommenen Nutzungsprofils des Elektroautos ergab sich für den PV-Generator eine Größe von 9,9 kWp und für den Batteriespeicher eine Kapazität von 12,5 kWh. Die ermittel-

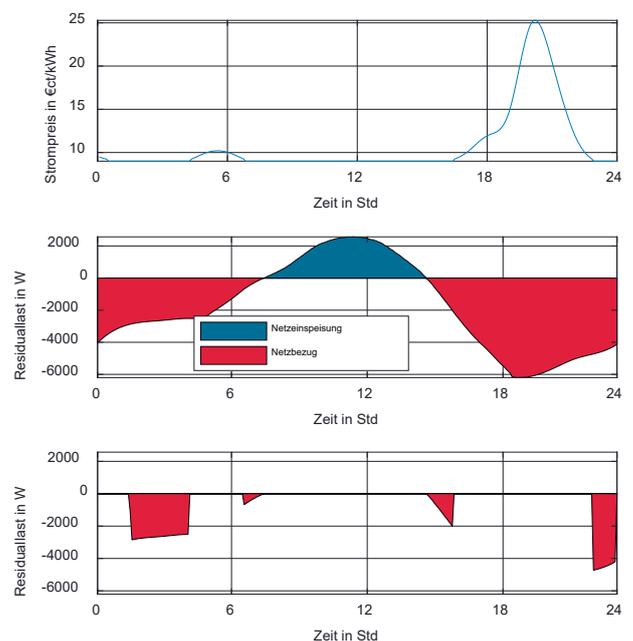


Abbildung 2: Vom EMS optimierte Residuallast von Berücksichtigung von dynamischen Strompreisen

te Kapazität sowie eine bidirektional zu nutzen- de Wirkleistung von 20 kW wurde bei der Realisierung des 2nd-Life-Speichers als Untergrenze berücksichtigt.

Darauf aufbauend wurden Betriebsstrategien für das EMS entworfen und implementiert. Eine fortgeschrittene Variante zur Berücksichtigung zeitvariabler Stromtarife ist auf Abbildung 2 dargestellt. Im oberen Diagramm ist der über den Tag variierende (dynamische) Strompreis dargestellt. Das Energiemanagementsystem löst auf Basis einer Erzeugungs- und Lastprognose ein Optimierungsproblem um die kostenoptimale Fahrweise für den Batteriespeicher zu bestimmen. Ergebnis ist die Vermeidung von Netzbezug in Zeiten von hohen Strompreisen (vgl. mittleres und unteres Diagramm). Der Prosumer kann so zu einer netzdienlichen Betriebsweise beitragen.

Stationärer 2nd-Life-Speicher

Der Energiespeicher besteht aus 23 Batteriemodulen aus dem Automobilbereich, welche jeweils eine Nennkapazität von 111 Ah und einen Nennenergieinhalt von 1,6 kWh besitzen. Die Zellen in den Modulen sind in einer 4s3p Verschaltung verschaltet, wodurch eine Nennspannung von 14,8 V resultiert. Die Systemspannung des Speichers beträgt aufgrund der seriellen Verschaltung 340 V und der Nennenergieinhalt 36,8 kWh.

Durch die Weiternutzung kann der ökonomische Wert der Batterien im Vergleich zum direkten Recycling gesteigert werden. Damit möglichst gleichaltrige Batterien verwendet werden können, müssen die Batteriemodule vor der Nutzung charakterisiert werden. Hierzu wurde ein Batteriezustandsbewertungsverfahren entwickelt, welches die Current Interrupt (CI) Methode, die elektrochemische Impedanzspektroskopie (EIS) und die Kapazitätsanalyse beinhaltet. Die Sensitivitätsanalyse hat gezeigt, dass stark gealterte Module mit allen Methoden zuverlässig erkannt werden. Feinere Unterschiede sind durch die

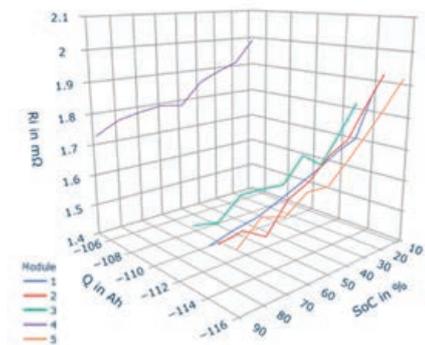


Abbildung 3: Innenwiderstände nach 500 ms (CI-Methode)



Abbildung 4: Unterbringung der Batteriemodule in den Sicherheitsschränken

EIS erkennbar, diese Analyseverfahren erfordert jedoch kostenintensives Messequipment und einen präzisen Messaufbau. Aus diesem Grund wurde die CI-Methode in das entwickelte zentrale Batteriemanagementsystem (BMS) integriert. Die CI-Methode charakterisiert die Batteriemodule anhand der Spannungsänderung durch Strompulse. Der ermittelte Innenwiderstand (Abbildung 3) ist von der Alterung abhängig. Mittels Relais können die Module parallel zu einem Widerstand geschaltet werden, sodass ein Entladestrompuls zur Charakterisierung verwendet werden kann. Alternativ kann das Gesamtsystem mit einem Strompuls belastet werden. Hierdurch werden alle seriell verschalteten Module mit demselben Strom belastet.

Das BMS basiert auf ein PXI System der Fa. National Instruments, welches die Modulspannungen, die Modultemperaturen und die Ströme überwacht.

Der Manual Service Disconnect (MSD) Stecker (Abbildung 4, oben rechts) dient zur sicheren Trennung des Batteriesystems, sodass Umbaumaßnahmen durchgeführt werden können. Ein Isolationsüberwachungsgerät überwacht die Isolierung gegenüber dem Gehäuse, sodass im Fehlerfall das BMS den Batteriespeicher ausschalten kann.

Durch die Nutzung gleichaltriger Batteriemodule kann die Lebensdauer und Sicherheit des 2nd-Life-Speichers gesteigert werden. Im weiteren Betrieb können durch die Charakterisierungsfunktion Alterungsdaten gewonnen werden, sodass in Zukunft eine Prognose des Alterungsverlaufs des Batterietyps datengesteuert ermöglicht wird. Im BMS können für weitere Untersuchungen (andere Batterietypen) andere Zellchemien und Leerlaufspannungskennlinien hinterlegt werden, sodass eine Alterungsprognose bei bestimmten Nutzungsprofilen erstellt werden kann.

PROJEKTNAME

NetProsum2030

LAUFZEIT

September 2017 – August 2021

PROJEKTLOGO



ANSPRECHPARTNER / KONTAKT

Jonathan Ries

✉ jonathan.ries@tu-braunschweig.de
☎ +49 531 591-9714

Daniel Kehl

✉ d.kehl@tu-braunschweig.de
☎ +49 531 591-9732

PROJEKTPARTNER

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

GEFÖRDERT DURCH



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages



Quartier Helleheide auf dem Fliegerhorst Oldenburg, Quelle: GSG Oldenburg, Stadt Oldenburg

Digitalisierte Energiesysteme

Verständnis für Wechselwirkungsdynamiken in Quartierenergiesystemen und Entwicklung einer kollaborativen FuE-Plattform

Die Digitalisierung ist ein globaler Megatrend, der branchenübergreifend und -vernetzend neue Funktionen und Prozesse ermöglicht. Digitalisierte Energiesysteme bieten die Möglichkeit, durch einen effizienteren und nachhaltigeren Betrieb einen wichtigen Beitrag für eine erfolgreiche Gestaltung der Energiewende zu liefern. Im sicherheitskritischen Energiesystem entstehen durch die Digitalisierung jedoch zugleich neue Wechselwirkungen und sensible Abhängigkeiten. Zur systemischen Untersuchung der in den digitalisierten Energiesystemen funktional gekoppelten und vernetzten Domänen und Technologien bezüglich der Wechselwirkungen muss auch die Energiesystemforschung effizienter vernetzt, notwendige Fachdisziplinen besser integriert und Forschungsergebnisse leichter in die Praxis transferiert werden können. *Das Zukunftslabor Energie (ZLE)* formuliert auf Basis dieser Problemstellungen zwei zentrale Forschungsziele: die Erforschung und Entwicklung digitalisierter Energiesysteme und die Digitalisierung der Energiesystemforschung und -entwicklung. Das ZLE wird betreut durch das *Zentrum für Digitale Innovationen Niedersachsen (ZDIN)*.

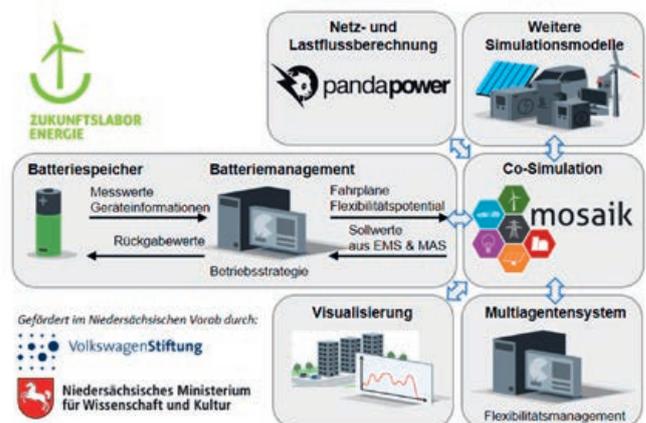
Erforschung und Entwicklung digitalisierter Energiesysteme

Die zentrale fachliche Forschungsfrage der ersten Projektsäule des ZLE ist die Identifikation und Modellierung digitalisierter Energiesysteme für Quartiere mit Fokus auf möglichen Wechselwirkungen zwischen den Energie- und Informationssystemen. Die mit den Wechselwirkungen verbundenen technischen Herausforderungen und die Auswirkungen auf die Stabilität sind bislang systemisch und großskalig weitgehend unerforscht. Als Grundlage für die Modellierung der Quartierenergiesysteme (QES) wurden drei Quartiere als exemplarische Untersuchungsgebiete ausgewählt: „Ölper Berge“ in Braunschweig, „Rüsdorfer Kamp“ in Heide, Teil des Forschungsvorhabens Quarree100 und das Energetische Nach-

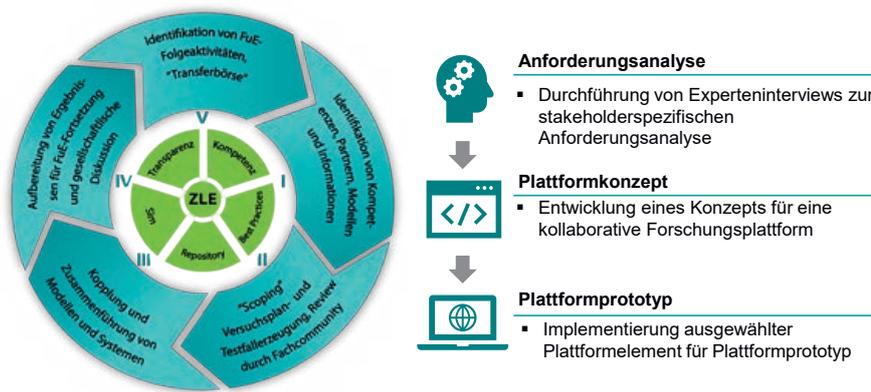
barschaftsquartier „ENaQ“ auf dem Gelände des ehemaligen Fliegerhorsts in Oldenburg. Für die betrachteten Quartiere wurden zunächst multiple Energieversorgungsszenarien entwickelt, basierend auf der gegenwärtigen Ausgestaltung der QES und notwendiger zukünftiger Anpassungen hinsichtlich der Einhaltung der gesetzten Emissionsziele.

Modellierung von Quartierenergiesystemen

Basierend auf den identifizierten Quartiersversorgungsszenarien wurden Anforderungsspezifikationen an die Modellierung der QES entwickelt. In einem QES müssen eine Vielzahl unterschiedlicher Komponenten modelliert und für die Simulation miteinander verknüpft werden. QES der Zukunft im Sinne von Smart Microgrids erfordern gar eine zielgerichtete Koordination und Steuerung der einzelnen Anlagen, wodurch der Modellierungsaufwand nochmals



Ansatz der co-simulationsbasierten Modellierung von Quartierenergiesystemen im ZLE



Plattformelemente und Vorgehensweise zur Entwicklung einer kollaborativen Forschungsplattform im ZLE

erhöht wird. Aufgrund der Vielzahl der benötigten Modelle und der interdisziplinären Arbeitsweise im ZLE wurde ein Co-Simulationsansatz auf Basis des Mosaik Frameworks gewählt (vgl. Abbildung). Co-Simulationen ermöglichen die Kopplung verschiedener Simulationswerkzeuge und -modelle unabhängig von der gewählten Programmiersprache.

Digitalisierung der Energiesystemforschung und Energiesystementwicklung

Zur Realisierung des zweiten Projektziels – der Digitalisierung der Energiesystemforschung und -entwicklung und damit einhergehend zur Stärkung der digitalen Energieforschung in Niedersachsen – soll im ZLE eine Forschungs- und Entwicklungsplattform (FuE-Plattform) konzipiert und in einer Basis-Version umgesetzt werden. Ziel der Plattform ist die Unterstützung kooperativer Verbundprojekte im Anwendungsfeld digitalisierter Energiesysteme auf Basis moderner informatischer Methoden und Technologien, um damit einen wesentlichen Beitrag zur nachhaltigen Ergebnissicherung, Transfer, Anschlussfähigkeit des Zukunftslabors sowie zur Transparenz für einen Dialog mit der Gesellschaft zu ermöglichen. Dabei wird die zu entwickelnde FuE-Plattform mindestens die folgenden fünf Plattformelemente integrieren: Kompetenz, Best Practices, Repository, Simulation und Transparenz (vgl. Abbildung). Im Rahmen des Elements ZLE-Kompetenz wird ein FuE-Kompetenznetzwerk mit u. a. spezifischen fachlichen Kompetenzen und Testlaboren dargestellt werden. Das ZLE-Repository wird harmonisierte Daten, Simulationsmodelle und -szenarien unter

Berücksichtigung der DFG Vorgaben bereitstellen. Im Rahmen der ZLE-Best Practices werden u. a. Standards für kooperative Versuchspläne und Szenario-Techniken bereitgestellt werden. Die ZLE-Simulation soll perspektivisch eine online-fähige Co-Simulationsplattform abbilden. Im Rahmen der ZLE-Transparenz wird auf der FuE-Plattform ein Bereich zur Veröffentlichung, Aufbereitung und Präsentation von FuE-Ergebnissen geschaffen werden. Für den Entwicklungsbeginn der FuE-Plattform wird zunächst eine nutzerspezifische Anforderungsanalyse verschiedener Stakeholder auf Basis von Experteninterviews durchgeführt. Interviewte Stakeholdergruppen sind u. a. Energieforscher*innen, IKT-Unternehmen, Netzbetreiber, Forschungsnetzwerke und Elektrofachhandwerker*innen. Durch Auswertung der Interviewtranskripte können wertvolle Erkenntnisse und gewünschte Eigenschaften für die FuE-Plattform generiert werden. Diese sind die Basis für das zu entwickelnde Plattformkonzept, aus dem im weiteren Projektverlauf ein online zugänglicher Prototyp der kollaborativen FuE-Plattform des ZLE entstehen wird.

Open Science Deklaration des Zukunftslabors Energie

Das ZLE hat eine Open Science Deklaration entwickelt und wird diese zeitnah gemeinsam mit allen Forschungspartnern unterzeichnen. Damit bekennt sich das ZLE zu transparenter Wissenschaft und richtet entsprechend seine wissenschaftlichen Aktivitäten nach Open Science Standards aus. Die im Projektverlauf gewonnenen Erkenntnisse aus der Energieforschung sollen frei und kostenlos für jeden zugänglich gemacht werden. Zugleich werden dadurch

Möglichkeiten zur Zusammenarbeit und Vernetzung von Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft geschaffen und die Qualität der Forschung gesichert. In diesem Sinne ist auch jeglicher im Rahmen des ersten Projektziels des ZLE entwickelter Programmcode sowie alle, erhobene Daten und aufgestellte Simulationsmodelle frei zugänglich und über das FuE-Plattformelement ZLE-Repository abrufbar.

PROJEKTNAME

Zukunftslabor Energie

LAUFZEIT

Oktober 2019 – September 2024

PROJEKTLOGO



ANSPRECHPARTNER / KONTAKT

Henrik Wagner

✉ henrik.wagner@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 591-9718

PROJEKTPARTNER

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

GEFÖRDERT DURCH



GEFÖRDERT DURCH





Netzdienliche Prosumer

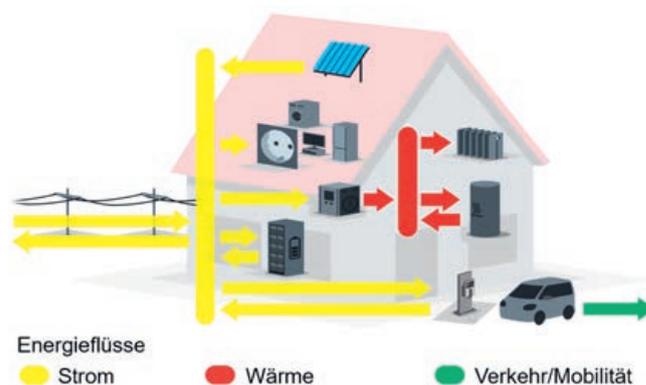
Systemdienstleistungen aus Komponenten von modernen Haushalten in der Niederspannungsebene

Das Wegfallen großer Erzeugungsanlagen wie Kern- oder Kohlekraftwerke hat einen wesentlichen Einfluss auf die Bereitstellung netzdienlicher Funktionen. Nachdem die großen Generatoren dieser Kraftwerke in den letzten Jahrzehnten für die Bereitstellung von Systemdienstleistungen (SDL) zuständig waren, fällt diese Aufgabe in Zukunft den in der Anzahl steigenden umrichterbasierten Komponenten im Verteilnetz wie Photovoltaik-Anlagen zu. Im Rahmen des Projekts *SiNED – Systemdienstleistungen für sichere Stromnetze in Zeiten fortschreitender Energiewende und digitaler Transformation* wird an der Weiterentwicklung der bisherigen SDL für die Stromnetze der Zukunft gearbeitet. Dabei werden insbesondere die auf der fortschreitenden Energiewende sowie zunehmender Digitalisierung basierenden Möglichkeiten und resultierende veränderte Anforderungen berücksichtigt.

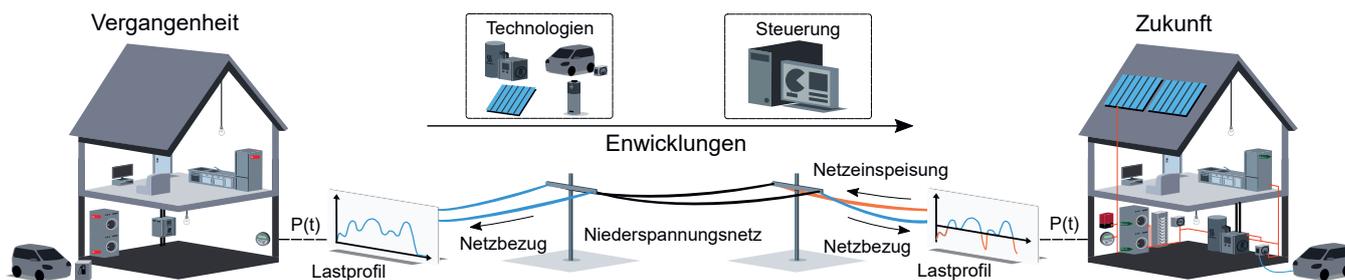
Wandel der Haushalte in Niederspannungsnetzen

Die Niederspannungsnetze waren jahrzehntelang durch den starren und nicht zu beeinflussenden Verbrauch an den Haushaltsanschlüssen gekennzeichnet. Seit Beginn der Jahrtausendwende hat sich dies jedoch zunächst langsam und in den letzten Jahren immer stärker verändert. Durch PV-Anlagen können Haushalte ihren Netzbezug reduzieren und produzieren in steigender Anzahl so viel Leistung, dass diese in das Niederspannungsnetz eingespeist wird. Weitere moderne Haushaltskomponenten sind Batteriespeichersysteme (BSS), Wärmepumpen (WP) und Elektrofahrzeuge (EV), weil diese eine große Flexibilität für das Energiesystem bereitstellen. EV z. B. werden abends auf dem privaten Grundstück geparkt und sollten am nächsten Morgen nach etwa zehn bis zwölf Stunden Standzeit wieder aufgeladen sein. Dabei spielt es aber keine Rolle, ob sie direkt nach dem Abstellen oder erst kurz vor Beginn der nächsten Fahrt geladen werden.

Die aufgeführten modernen Prosumer-Komponenten sind neben der Erbringung ihrer primären Aufgabe, bei häuslichen BSS ist dies z. B. die Zwischenspeicherung von PV-Strom zur Eigenverbrauchsmaximierung, in der Lage, eine netzdienliche Funktion wahrzunehmen. Identifizierte Systemdienstleistung, die potentiell erbracht werden können, sind Spannungshaltung, lokales Engpassmanagement sowie Frequenzhaltung und Momentanreserve. Dadurch könnte die Spannungshaltung per Blindleistungsbereitstellung in den Umrichtern der modernen Komponenten vorteilhafter sein als konventioneller Netzausbau oder die Ausstattung der Ortsnetzstationen mit regelbaren Transformatoren. Bei der thermischen Überlastung von Netzbetriebsmitteln bietet sich die Steuerung flexibler Lasten wie WP oder EV an, da eine hohe Gleichzeitigkeit dieser häufig für die Netzengpässe verantwortlich ist. Für Frequenzhaltung eignen sich die Umrichter-gesteuerten Komponenten, da sie exakter regelbar und deutlich schneller als konventionelle Großkraftwerke sind.



Energieflüsse der verschiedenen Sektoren in modernen Prosumer-Haushalten



Der Wandel der Haushalte in der Niederspannungsebene von Verbrauchern mit starrem Lastgang (auf der linken Seite) zu modernen Prosumern mit effizienten und flexiblen Komponenten (auf der rechten Seite). Grafik: Christian Reinhold/TU Braunschweig

Herausforderungen der Bereitstellung durch Prosumer

Trotz der großen Potentiale, die durch moderne Komponenten von Haushalten in der Niederspannungsebene geboten werden, sind zunächst einige regulatorische Fragestellungen zu beantworten und technische Hürden zu überwinden. Zum einen sind häusliche BSS für die temporäre Speicherung des vor Ort erzeugten PV-Stroms vorgesehen, eine Mehrfachnutzung birgt die Gefahr des Verlusts der EEG-Förderung und weiterer Umlageschwierigkeiten. Außerdem könnte die Nutzung der Umrichter in den modernen Komponenten z. B. für die Spannungshaltung durch Bereitstellung von Blindleistung zu zusätzlichen Verlusten führen. Dadurch kann die Wirtschaftlichkeit der Anlagen gefährdet werden. Ein weiteres Problem ist die fehlende Informations- und Kommunikationsinfrastruktur in deutschen Niederspannungsnetzen, sodass Betriebsmittel weder beobachtbar noch steuerbar sind. Ferner sorgen Mindestleistungsanforderungen für Produkte wie Regelleistung für die Notwendigkeit des Zusammenschließens mehrerer Anlagen zu virtuellen Kraftwerken.

Ziele des Projektes

Innerhalb des Projekts werden zuerst die Potentiale zur Bereitstellung von SDL durch Prosumer-Komponenten analysiert. Außerdem wird der Beitrag des Sektors Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD) erörtert. Es folgt eine Abschätzung der Durchdringung der Prosumer-Komponenten für die Jahre 2020 und 2030. Anschließend wird analysiert, inwiefern die genannten Komponenten einen Beitrag zu lokalen (Spannungshaltung, Engpassmanagement) und globalen SDL (Frequenzhaltung, Momentanreserve) liefern können. Einen Schwerpunkt bildet dabei der Vergleich der Spannungshaltung durch Prosumer-Komponenten über Blindleistungsbereitstellung mit alternativen Spannungshaltungskonzepten. Im weiteren Verlauf wird schließlich der Einfluss der SDL-Bereitstellung durch Prosumer auf die Niederspannungsnetze sowie das Integrationspotential moderner Komponenten untersucht.

Modellierung der Systemdienstleistungs-Bereitstellung durch Prosumer
Ein zu entwickelndes Konzept zur Bereitstellung von SDL durch moderne Prosumer-Komponenten wird sukzessive in die bestehende Simulationsumgebung eSE – elenia Simulation Environment integriert. eSE wurde bereits im Vorgängerprojekt *NEDS – Nachhaltige Energieversorgung Niedersachsen* entwickelt und wird um ein Modell zur koordinierten Steuerung der Erbringung von SDL erweitert. Im Zuge dessen werden unter anderem diverse Spannungshaltungskonzepte aber auch Komponenten wie regelbare Ortsnetztransformatoren, Strangregler und Rangierfahrzeuge zur Abbildung des GHD-Sektors ergänzt.

Referenznetze und Simulationsszenario

Da SiNED ein niedersächsisches Projekt ist, wird der Fokus bei den Untersuchungen auf Niedersachsen gelegt. So werden die Durchdringungsgrade der Komponenten in den Jahren 2020 und 2030 speziell für Niedersachsen abgeschätzt. Die Festlegung auf Referenznetze für die simulativen Untersuchungen orientiert sich auch an die niedersächsischen Gegebenheiten, indem ein ländliches und ein dörfliches Netz der standardisierten Kerbnetze verwendet werden. Die Ausstattung der einzelnen Gebäude mit Komponenten sowie die Dimensionierung der Anlagen erfolgt mit Hilfe der Ergebnisse zu den Durchdringungen der Prosumer-Komponenten.

Ausblick

Im weiteren Verlauf wird die Modellierung des SDL-Konzeptes sowie weiterer Komponenten in eSE vorgenommen, um anschließend die verschiedenen Alternativen simulativ zu vergleichen. Darauf aufbauend können sinnvolle notwendige Anpassungen der aktuellen Erbringung von SDL abgeleitet werden.

PROJEKTNAME	SiNED
LAUFZEIT	November 2019 – Oktober 2022
PROJEKTLOGO	
ANSPRECHPARTNER / KONTAKT	Carsten Wegkamp ✉ c.wegkamp@tu-braunschweig.de ☎ +49 531 391-7756
PROJEKTPARTNER	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Leibniz Universität Hannover, TU Clausthal OFFIS e.V. – Institut für Informatik Oldenburg
GEFÖRDERT DURCH	 Niedersächsisches Ministerium für Wissenschaft und Kultur
GEFÖRDERT DURCH	 VolkswagenStiftung



Foto: Felix Klabunde/TU Braunschweig

Elektrische Feldbewirtschaftung

Gesamtkonzept und Modellierung von Agrarsystemen mit regenerativer Energieversorgung

Sowohl die Energieerzeugung als auch die Versorgung der Energiekunden stehen durch die Umsetzung der klimapolitischen Ziele vor großen Herausforderungen. Leistungsschwankungen, während der Gewinnung z. B. aus wetterabhängiger Wind- oder Sonnenenergie sowie beim Energiebedarf (Elektromobilisierung im Individual- und Güterverkehr) erfordern neue ganzheitliche Konzepte für deren Berechnung. In diesem Zuge wird der Einsatz sogenannter „Smart Grids“ als Basis eines effizienten und zuverlässigen Systembetriebs vorangetrieben. Durch eine zukünftige Umstellung auf eine elektrische Versorgung der energieintensiven Feldbewirtschaftung bildet die Landwirtschaft einen wesentlichen Einflussfaktor auf dieses System. Eine Umstellung der Landwirtschaft auf elektrische Energie wird weitreichende Folgen für die Gestaltung der Technik und Prozesse sowie für den Menschen als auch die Umwelt mit sich bringen. Infrastruktur, Arbeitsplätze in der Landwirtschaft als auch die Struktur der landwirtschaftlichen Flächen müssen neu bedacht werden. Zugleich eröffnet dieser Wandel völlig neue Möglichkeiten für eine nachhaltige und umweltverträgliche Landwirtschaft. Dabei sind individuelle und gleichermaßen gesellschaftliche Aspekte im Energie-, Agrar- und Ökologiebereich zu beachten.

Das Projekt Energy-4-Agri

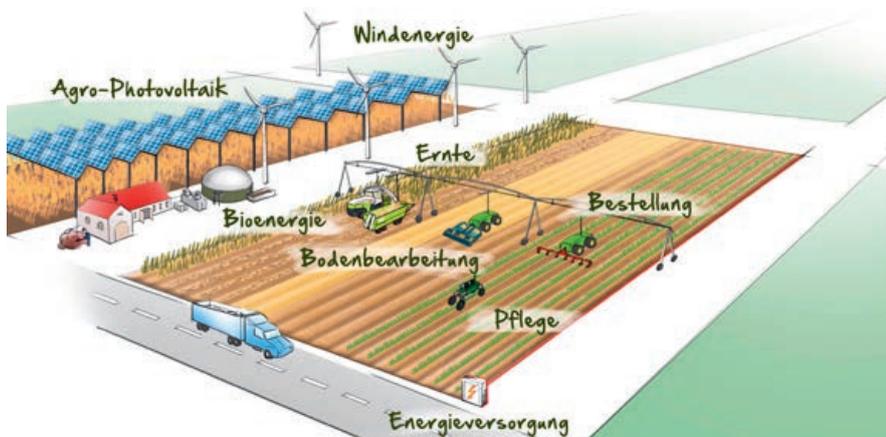
Das Forschungsprojekt Energy-4-Agri beschäftigt sich mit der Untersuchung und Modellierung von Gesamtkonzepten für Agrarsysteme mit regenerativer Energieversorgung im Rahmen der Energiewende. Zusammen mit dem Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge (IMN), Institut für Geoökologie (IGÖ), der Abteilung für Arbeits-, Organisations- und Sozialpsychologie (AOS) am Institut für Psychologie der Technischen Universität Braunschweig sowie dem Institut für Designforschung (IDF) der Hochschule für Bildende Künste in Braunschweig erfolgt eine ganzheitliche Konzeption und multikriterielle Bewertung der Energieversorgung für nachhaltige Agrarsysteme als Beitrag zur Dekarbonisierung der landwirtschaftlichen Produktion. Ausgehend von einer detaillierten Analyse des Energiebedarfs in der Feldbewirtschaftung und Innenwirtschaft im Rahmen von Feldmesskampagnen auf Referenzbetrieben in Niedersachsen, werden die Voraussetzungen für die Elektrifizierung der entsprechenden landwirtschaftlichen Produktionssysteme untersucht. Zukunftsszenarien beschreiben die erwarteten Entwicklungen der nächsten Jahrzehnte. Alternative Struktur- und Technikkonzepte sowie deren Wirkungen werden in einem zusammenge-

fürten Modellierungsansatz berücksichtigt. Die umfangreichen Veränderungen im Energiebereich in der Landwirtschaft, hervorgerufen durch die neuen Energieversorgungskonzepte, werden hinsichtlich der technisch-ökonomischen Umsetzbarkeit und insbesondere hinsichtlich der gesellschaftlichen Akzeptanz und ökologischen Auswirkung bewertet.

Erste Ergebnisse

Im Rahmen einer Voruntersuchung des elenia-Instituts wurden zwei Maschinenkonzepte für vollelektrische Landmaschinen modelliert und in einer exemplarischen Verfahrenskette in der Feldbewirtschaftung simulativ untersucht.

Ausgehend von der heutigen Großtechnik kann durch den Austausch des Verbrennungsmotors und Tanks mit einem Elektromotor und Batteriesystem bereits eine vollelektrische Landmaschine aufgebaut werden. Die batteriebetriebene Landmaschine bezieht ihre Energie aus einem Batteriesystem, das in der Landmaschine integriert ist oder als Gegengewicht (Front oder Heck) ausgewechselt werden kann. Das Nachladen der Batterien erfolgt an einer Ladensäule. Der Vorteil der batteriebetriebenen Landmaschine liegt in der uneingeschränkten Mobilität sowie der Möglichkeit des bi-



Konzeptbild einer elektrischen Feldbewirtschaftung mit regenerativer Energieversorgung
Illustration: Johanna Frerichs/TU Braunschweig

direktionalen Ladens des Batteriespeichers. Weiterhin kann die Batterieintegration im austauschbaren Gegengewicht dazu beitragen, die möglichen Einsatzzeiten der Landmaschine von den Ladezeiten zu trennen.

Als zweites Maschinenkonzept wurde die kabelgebundene Landmaschine betrachtet, die über ein Kabel dauerhaft mit Energie versorgt wird und keinen eigenen Energiespeicher besitzt. Vorteile dieses Konzeptes sind höhere theoretische Motorleistungen als bei batteriebetriebenen Landmaschinen, die Mobilität ist aber aufgrund des Kabels eingeschränkt, weshalb sich kabelgebundene Landmaschinen nicht für alle Verfahren in der Feldbewirtschaftung und Innenwirtschaft eignen.

Für eine exemplarische Verfahrenskette, bestehend aus der Grundbodenbearbeitung und Ernte, durchgeführt durch die kabelgebundene Landmaschine, sowie den Verfahren Aussaat, Düngung, Ausbringung von Pflanzenschutz und Ernte-Transport, durchgeführt durch batteriebetriebene Landmaschinen wurden erste Simulationen durchgeführt und die Auswirkung verschiedener Ladestrategien und Zusammensetzungen an Erneuerbaren Energien auf das Verteilernetz untersucht.

Erste Simulationen haben gezeigt, dass eine Netzintegration vollelektrischer Landmaschinen zu Spannungsbandverletzungen und Betriebsmittelüberlastungen auf

Niederspannungsebene führen. Eine Netzoptimierung bzw. -verstärkung ist für die Zeitpunkte erforderlich, in denen kabelgebundene Landmaschinen im Einsatz sind oder batteriebetriebene Landmaschinen nach den Verfahren Aussaat und Ernte-Transport nachgeladen werden. Diese Einsatzzeiten beschränken sich im Rahmen der untersuchten Verfahrenskette jedoch auf wenige Wochen im Jahr, weswegen ein Netzausbau bzw. -verstärkung vor allem unter wirtschaftlichen Aspekten kritisch zu hinterfragen ist.

Die Netzintegration hat sich im betrachteten Verteilnetz hingegen unproblematisch auf der Mittelspannungsebene gezeigt. Landwirtschaftsbetriebe mit Mittelspannungsanschluss haben somit einen Vorteil, da die Netzintegration vollelektrischer Landmaschinen im Kontext der untersuchten Verfahrenskette keine stromnetzzeitigen Maßnahmen erfordert. Ein Netzanschluss auf Mittelspannungsebene könnte im Falle einer Vollelektrifizierung des Maschinenparks auch für Landwirtschaftsbetriebe mit bisherigem Niederspannungsanschluss notwendig werden. Durch die höheren Bezugs- und Einspeiseleistung auf Mittelspannungsebene kann zudem der Ausbau Erneuerbarer Energien auf Landwirtschaftsbetrieben vorangetrieben werden.

PROJEKTNAME

Energy-4-Agri

LAUFZEIT

Dezember 2019 – Dezember 2022

PROJEKTLOGO



ANSPRECHPARTNER / KONTAKT

Felix Klabunde

✉ f.klabunde@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391-9720

PROJEKTPARTNER

Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge (TU BS), Institut für Psychologie (TU BS), Institut für Geoökologie (TU BS), Institut für Designforschung (HBK BS)

Landwirtschaftskammer Niedersachsen

Landwirtschaftsbetriebe in Niedersachsen

WEBSITE

www.tu-braunschweig.de/energy-4-agri

GEFÖRDERT DURCH



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Foto: Marcel Lüdecke/TU Braunschweig

Grünstrom für MieterInnen

Integration von Speichersystemen in Mehrfamilienhäusern, um den Zugang zu grünem, lokal erzeugtem Strom zu ermöglichen

Mit steigender Durchdringung des Energiesystems durch fluktuierende erneuerbare Energien und Elektromobilität gewinnen Speichersysteme zur Netzstabilisierung sowie lokaler Netzentlastung zunehmend an Bedeutung. Aktuell steigende Zubau-Raten von PV-Speichersystemen bei Einfamilienhäusern im Eigentumsverhältnis sind ein erster wichtiger Entwicklungsschritt für den Flächeneinsatz stationärer Speicher. Laut statistischem Bundesamt befinden sich jedoch mehr als die Hälfte aller deutschen Haushalte in Mehrfamilienhäusern, wovon fast drei Viertel davon zur Miete wohnen. Für die Mieter und Wohnungseigentümer, nachfolgend Wohnungsnutzer genannt, fehlt jedoch bisher eine sinnvolle Möglichkeit, Speichersysteme zu installieren und zu nutzen. Installation und Betrieb einzelner Kleinstspeicher je Wohneinheit in den Wohnungen oder im Keller scheiden aus Kostengründen sowie in der Regel aufgrund technischer und räumlicher Einschränkungen aus. Im Gegensatz dazu wäre die gemeinsame Nutzung eines größer ausgelegten Speichers für mehrere Wohnungsnutzer erheblich einfacher und kostengünstiger. Gleichzeitig könnten Speicherkapazitäten deutlich effizienter ausgenutzt werden: Ausgleichseffekte in den Verbrauchsprofilen mehrerer Nutzer reduzieren die Gleichzeitigkeit von Lastspitzen und -tälern.

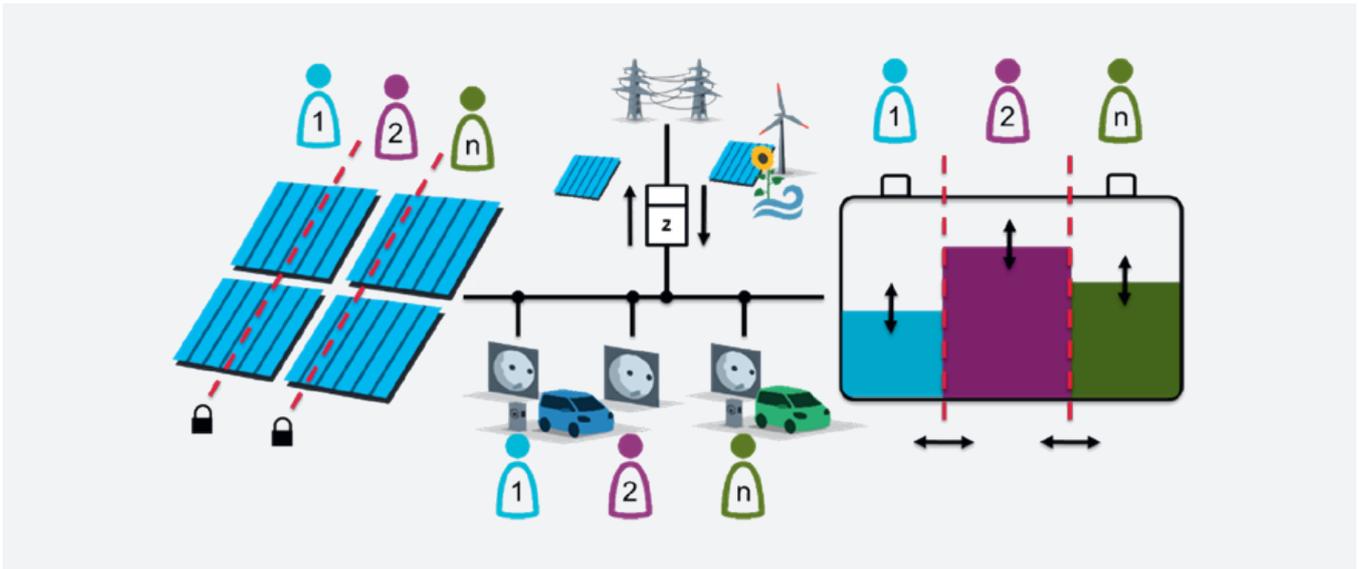
Hürden der gebäudeinternen Mehrfachnutzung

Eine virtuelle Aufteilung von Speichern in „Speicherscheiben“ und dadurch eine Mehrfachnutzung von Speichern durch mehrere Wohnungsnutzer und Marktpartner ist heute jedoch aus regulatorischen und eichrechtlichen Gründen ausgeschlossen. Die Abrechnung gelieferter und zwischengespeicherter Strommengen erfordert eichrechtlich zugelassene Messtechnik und Prozessketten. Heute existieren diese nur für die Abrechnung solcher Strommengen auf Basis je einer separaten physikalischen Messung z. B. je

Wohneinheit. Soll ein Speicher mehrfach genutzt werden und liegt ebenfalls physisch nur eine Messung vor, müssen die Messwerte in mehrere abrechnungsfeste Werte für verschiedene Stromqualitäten zerlegt, umgerechnet und den relevanten Marktpartnern zur Verfügung gestellt werden. Zu diesen gehört der lokale Stromnetzbetreiber, der Stromanbieter, der den lokal erzeugten Strom, den gespeicherten Strom sowie Reststrommengen aus dem öffentlichen Netz für die Wohnparteien zur Verfügung stellt – und womöglich auch weitere Stromanbietern, schließlich müssen die Wohnparteien ihren Energieversorger nach wie vor frei wählen dürfen.

Kernelemente des Projekts

Wesentliche technische Innovationen stellen im Projekt die Entwicklung und Validierung mess- und abrechnungstechnischer Lösungen sowie zugehöriger Energiemanagement-Funktionen, IKT-Lösungen und Datendienste in Mehrfamilienhäusern dar. Es werden die Erfahrungen aus dem Vorgängerprojekt PV-Speicherspeicherzähler, in dem Messtechnik und Abrechnungskonzepte für mehrfach simultan genutzte PV-Speichersysteme entwickelt und getestet wurden, mit bestehenden Mieterstrommodellen kombiniert. Die Hauptaufgabe des elenia liegt in der Entwicklung einer Daten- und Steuerungsplattform, die neben der Vernetzung sämtlicher Komponenten dazu genutzt wird, den NutzerInnen eine Interaktionsmöglichkeit zu bieten. Dazu findet eine Sensibilisierung der WohnungsnutzerInnen für ihr Verbrauchsverhalten durch Visualisierung statt. Darüber hinaus wird die Bewirtschaftung ihrer virtuellen Anlagenanteile ermöglicht, wodurch Anreize zu einer Änderung des Verbrauchsverhaltens gegeben werden können.



Virtuelle Aufteilung der Anlagen auf die WohnungsnutzerInnen. Grafik: Frank Soyck/TU Braunschweig

Mehrfachnutzung auch im Bereich Stakeholder

Aus volkswirtschaftlicher Sicht steuern intelligente Verfahren und Betriebsweisen im Rahmen der Energie- Mobilitäts- und Wärmewende vor allem im Wohnungssektor einen positiven Beitrag bei. So entsteht durch den Einsatz neuartiger Energiemanagementlösungen im Zusammenspiel mit modernen Speichertechnologien ein hohes Potenzial zur Steigerung der Aufnahme-fähigkeit der Verteilungsnetze im urbanen Raum hinsichtlich zusätzlicher Erzeuger- und Verbraucherleistung. Dadurch lassen sich die Netzausbaukosten der Verteilungsnetze potenziell reduzieren. Zusätzlich stiftet der Einsatz eines regelkonformen Konzepts zur Mehrfachnutzung von PV-Speicher-Systemen auch einen Nutzen für die Gebäudeeigentümer und Wohnungsnutzer. So profitieren die Gebäudeeigentümer von dem Potenzial der Reduzierung des maximalen Leistungsbedarfs vom vorgelagerten Netz im Regelbetrieb, der Wertsteigerung im Immobilienportfolio und die Wohnungsnutzer können ihre Kosten reduzieren und einen aktiven Beitrag zur Energiewende leisten, indem Sie die Nutzung der unterschiedlichen Stromqualitäten (PV, Speicher, vorgelagerte Netz) direkt beeinflussen können und damit den CO₂ Ausstoß ihrer Nutzereinheit verringern.

Aktuelle Arbeiten

Derzeit wird im Energiemanagementlabor am elenia ein Batteriespeichersystem bestehend aus einem Tesvolt HV 70 Batteriespeicher und einem STPS60 Batteriewechsel-

richter von SMA vermessen. Dabei werden statische und dynamische Regelabweichungen sowie Verluste des Systems aufgenommen. Über eine Modellbildung ist später eine faire Aufteilung von Verlusten auf die unterschiedlichen NutzerInnen möglich, ohne intransparente Verteilschlüssel verwenden zu müssen.

Weiterhin wird in Zusammenarbeit mit dem PTB ein Messverfahren und dazugehörige Rechenvorschriften entwickelt, die eine möglichst kostengünstige Erhebung der notwendigen Abrechnungswerte ermöglichen.

Vom Prototypen zum Massenprodukt

Ziel dieses Vorhabens ist es, den Geschosswohnungsbau für die Speichernutzung im Zusammenspiel mit regenerativer Energieerzeugung und neuen Verbrauchern aus der Sektorenkopplung Mobilität und Wärme zu erschließen und damit einem Großteil der Bevölkerung wirtschaftlich attraktiven Zugang zu lokal erzeugtem, innovativ bewirtschaftetem und günstigem PV- und KWK-Strom und zur Elektromobilität zu verschaffen. Aus diesem Grund sind neben Simulationen zur Erprobung der entwickelten Betriebsalgorithmen und Labortests am Demonstratoraufbau Feldtests zur Validierung der Wirtschaftlichkeit der MELANI-Betriebsweise ist ein Rollout auf möglichst viele Mehrfamilienhäuser geplant, um ungenutzte Potenziale hinsichtlich Energiemanagement, des Ausbaus Erneuerbarer Energien und der damit verbundenen CO₂-Einsparung zu erschließen.

PROJEKTNAME

MELANI

LAUFZEIT

November 2020 – Oktober 2023

PROJEKTLOGO



ANSPRECHPARTNER / KONTAKT

Marcel Lüdecke

✉ m.luedecke@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391-9726

PROJEKTPARTNER

Naturstrom AG, SMA Solar Technology AG, PTB Braunschweig

WEBSITE

www.projekt-melani.de

GEFÖRDERT DURCH



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

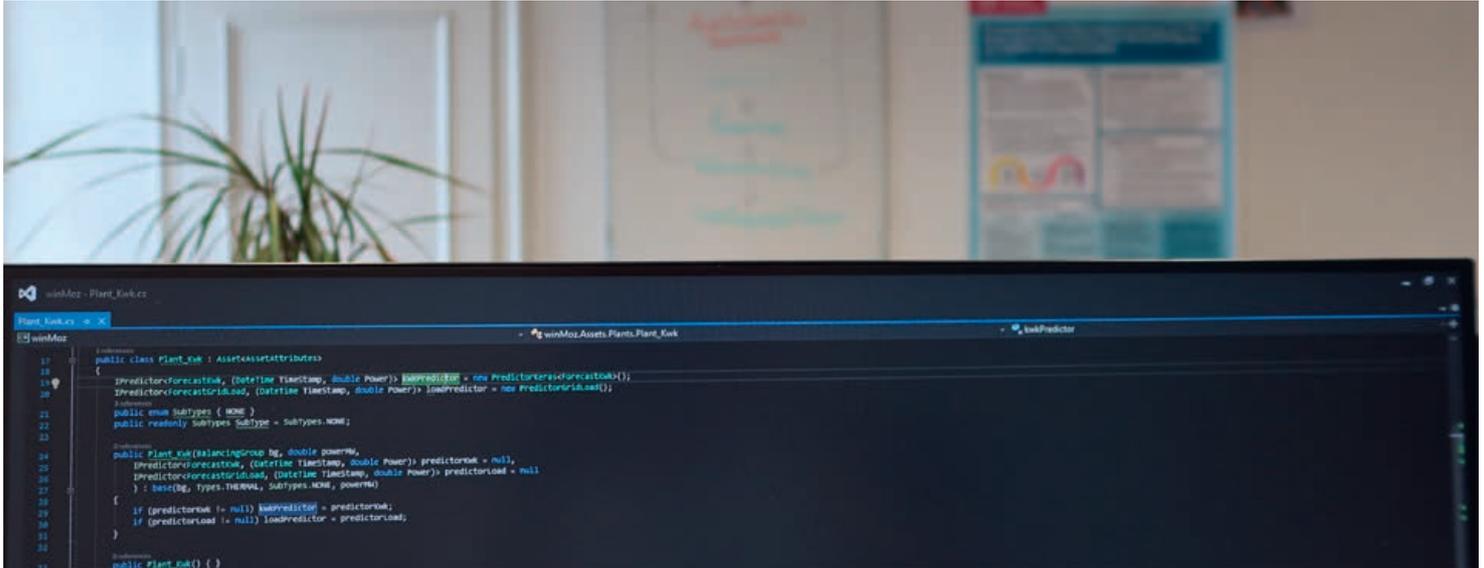


Foto: Mattias Hadlak/TU Braunschweig

MoziBi

Agentenbasierte Modellierung zukünftiger Bilanzkreisbewirtschaftung unter Verwendung von künstlicher Intelligenz

Ein Bilanzkreis bildet die Verbindung zwischen der physikalischen Welt des Energieflusses in den Stromnetzen und der virtuellen Welt des Energiehandels. Dabei ist das Bilanzkreismanagement ein maßgebliches Instrument zur Minimierung von Abweichungen zwischen Erzeugung und Verbrauch. Ausgeglichene Bilanzkreise bilden somit die Basis für ein stabiles Stromnetz.

Die stetig zunehmende Komplexität infolge der steigenden Durchdringung dargebotsabhängiger Energieerzeuger sowie der Integration flexibel steuerbarer Lasten stellt neue Herausforderungen für das Bilanzkreiswesen dar. Das Institut für Hochspannungstechnik und Elektrische Energieanlagen (elenia) sowie das Institut für ZukunftsEnergie- und Stoffstromsysteme (IZES gGmbH) arbeiten daher an einem gemeinsamen Forschungsprojekt „MoziBi – Modellierung zukünftiger Bilanzkreisbewirtschaftung“. Ziel des Forschungsprojektes ist es Änderungen im Bilanzkreiswesen unter dem Aspekt verschiedener Anreizstrukturen zur Bilanzkreistreue umfänglich zu modellieren, die Modellierungsergebnisse zu bewerten und dabei Rückwirkungen auf die Energie(teil)märkte zu analysieren.

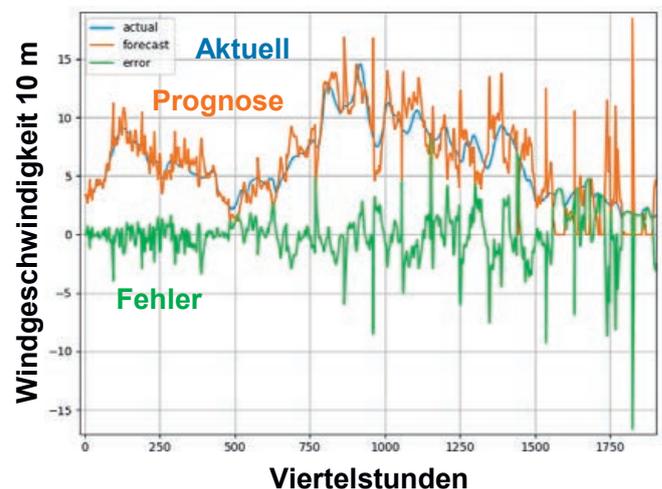
Bislang wurden die grundsätzlichen Hemmnisse, Wechselwirkungen und Interessenskonflikte im Bilanzkreisausgleich meist in isolierten Fragestellungen behandelt. In dem hier vorgestellten Vorhaben verfolgen wir jedoch eine gesamtsystemische Perspektive, um ganzheitliche Ansätze zur Optimierung der Systemtransformation zu entwickeln. Hierfür werden zunächst in einem agentenbasierten Ansatz die Prozessketten der einzelnen Akteure (Kraftwerksbetreiber, Direktvermarkter etc.) nachgebildet, um die Zusammenhänge und Rückkopplungen im Bilanzkreissystem sowie die Systemgrenzen unter Einbeziehung verschiedener Entwicklungsszenarien umfassend zu analysieren. Der Fokus liegt dabei auf der Identifizierung von Stellgrößen und Ansatzpunkten in der heu-

tigen Bilanzkreiswirtschaft mit der Absicht eine steigende Bilanzkreistreue der Akteure anzureizen.

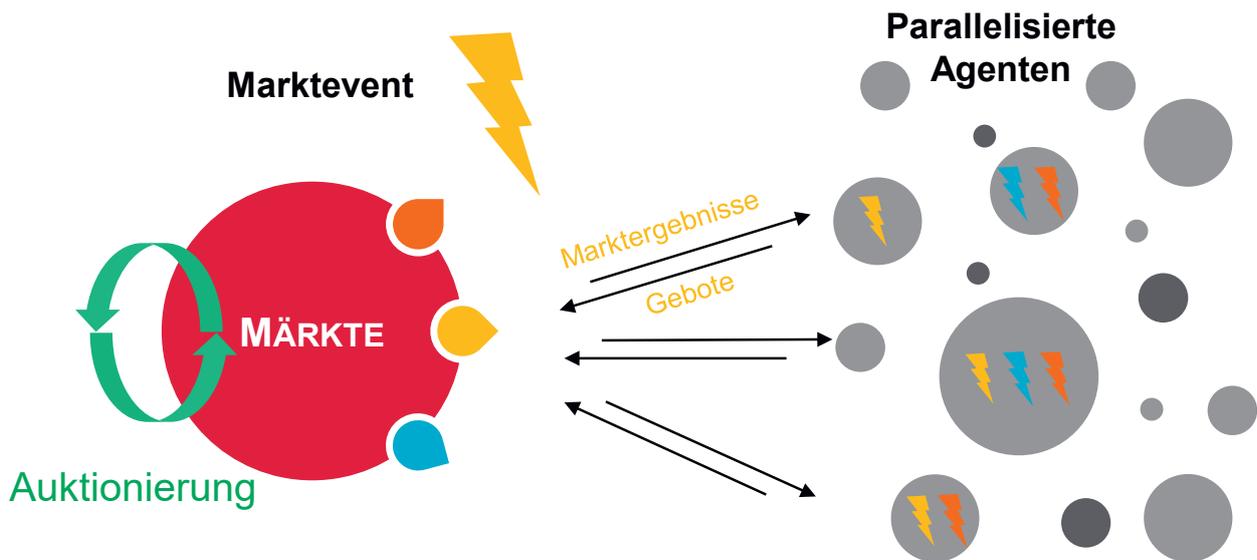
Agentenbasierte Modellierung des Energiesystems

Das Modell wird in C# entwickelt wobei als Ziel ein quelloffener Source Code ausgegeben wird. Zu diesem Zweck werden nur frei zugängliche Bibliotheken aus der .NET Umgebung verwendet. Zudem wird ein objektorientierter Ansatz gewählt, um die Wartbarkeit und Nachvollziehbarkeit des Codes zu gewährleisten. Es wird dabei grob in Märkte und Agenten (Bilanzkreise, Erzeuger, Verbraucher und Netzbetreiber) unterschieden.

Im Modell können verschiedene Erzeugungsarten, wie thermische Kraftwerke, Windenergieanlagen, Photovoltaik Anlagen oder auch Speicher modelliert werden. Anlagen mit geringen Leistun-



Simulierte Windprognose



Schematischer Ablauf einer Marktsequenz innerhalb der Simulation. Grafik: Henrik Herr/TU Braunschweig

gen werden dabei in Abhängigkeit von geographischen Gebieten zu größeren Gesamtanlage aggregiert. Jede Anlage sowie jeder Verbraucher wird anschließend einem Bilanzkreisen zugewiesen, die den Übertragungs- oder Verteilnetzbetreibern zugeordnet sind.

Die Agenten interagieren mit den Märkten, in dem sie Gebote über den Kauf oder Verkauf von Strom am jeweiligen Markt abgeben. Der ganze Ablauf wird über einen zentralen Simulator gesteuert, der schrittweise im 15 Minutentakt zählt und zu festgelegten Zeiten die Marktauktionen (Marktevent) auslöst. Sobald ein Auktionsereignis ausgelöst ist, errechnen alle Agenten parallel ihre Fahrpläne und geben die Gebote für die entsprechenden Märkte ab. Die Märkte berechnen die Preise auf Basis der Gebote und melden den Agenten welche Gebote kontrahiert wurden. Daraufhin wird der Fahrplan erneut angepasst. Jedem Agenten können abhängig der vermarkteten Assets verschiedene Handelsstrategien zugewiesen werden.

Erstellung von Prognosen

Ein wesentlicher Aspekt bei der Fahrplanerstellung ist die Erstellung von Prognosen für die jeweiligen Agenten. Diese Prognosen betreffen verschiedene Zeitreihen wie Last, Erzeugung oder auch erwartete Marktpreise. Sie werden mit Hilfe von statistischen sowie maschinell lernenden An-

sätzen erzeugt, was ebenfalls ein wesentlicher Aspekt des Projekts ist.

Die Eingangsdaten für jede Simulation, können in den Simulationsdatenbanken abgelegt werden. In gleicher Weise können Ergebnisse der Simulation, wie Bilanzkreisabweichungen oder Marktergebnisse zwischengespeichert werden, um sie für verschiedene Analysen weiter zu nutzen.

Publikation der Projektergebnisse

Unsere wesentlichen Modellansätze werden wir im Laufe des Jahres mit unseren strategischen Partnern aus den Bereichen ÜNB, VNB, EVU, EEX sowie der BNetzA diskutieren und auf diversen Konferenzen publizieren. Nach Abschluss der Modellentwicklung werden wir verschiedene energiewirtschaftliche Szenarien berechnen. Dabei soll der Einfluss von zuvor identifizierten Systemparametern und Rahmenbedingungen in Bezug auf den Bilanzausgleich analysiert werden, um gegebenenfalls Handlungsempfehlungen zur Steigerung der Bilanzkreisstreuung abzuleiten.

Aufgrund des modularen Open-Source-Ansatzes kann das Model nach Fertigstellung und Veröffentlichung von jedem Anwender genutzt und modular erweitert werden. Somit kann es auch nach Abschluss des Forschungsvorhabens zur Beantwortung vieler individueller Fragestellungen unterschiedlichster Anwender im Bereich des Bilanzkreismanagements beitragen.

PROJEKTNAME

MozuBi

LAUFZEIT

Januar 2018 – Dezember 2021

PROJEKTLOGO



ANSPRECHPARTNER / KONTAKT

Julian Studt

✉ j.studt@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391-9717

Mattias Hadlak

✉ m.hadlak@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391-8106

PROJEKTPARTNER

Institut für ZukunftsEnergie- und Stoffstromsysteme (IZES gGmbH)

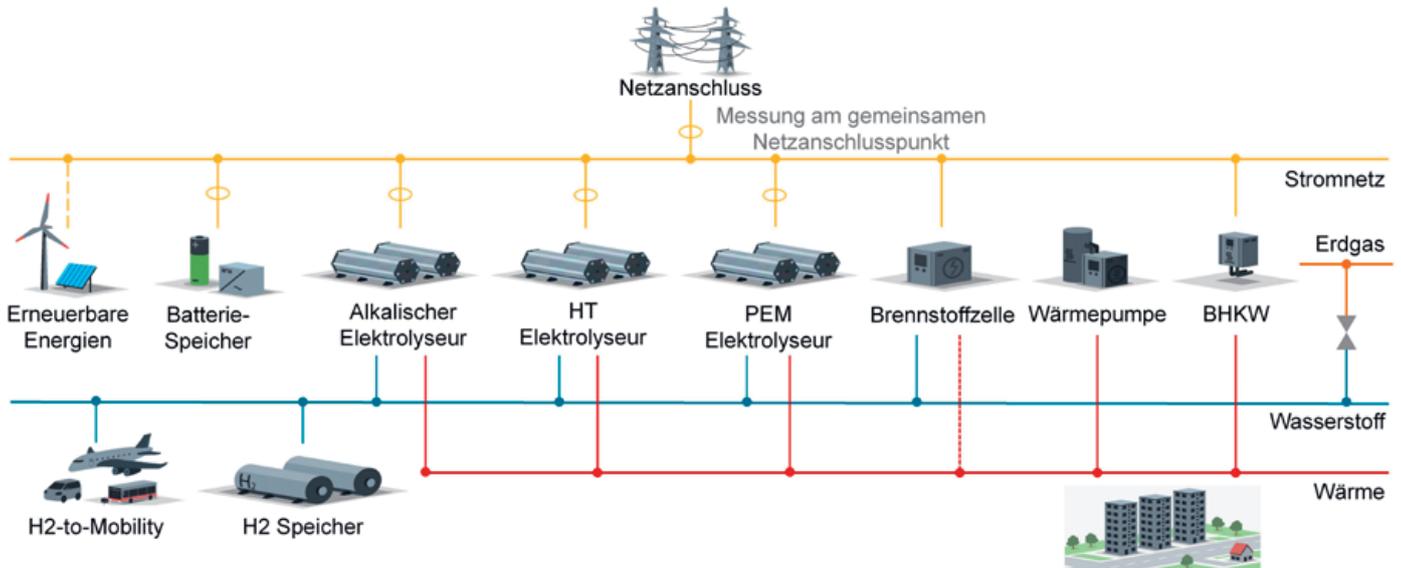
WEBSITE

www.mozubi.net

GEFÖRDERT DURCH



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages



Grafik: Henrik Wagner/TU Braunschweig

Wasserstoff-Kompetenzzentrum

Aufbau eines Wasserstoff-Kompetenzzentrums am Campus der Technischen Universität Braunschweig

Die größte Herausforderung der Energiewende bleibt der Transport und die Speicherung erneuerbarer Energien sowie deren Nutzung in den Sektoren Wärme und Mobilität. Ein Lösungsweg zeichnet sich in Verbindung mit der Wasserstofftechnologie ab. Überschüssige regenerative Erträge können durch Power to Gas in Wasserstoff (H₂) umgewandelt und damit speicherfähig gemacht werden. Durch den Einsatz von Brennstoffzellen wird Energie wieder bereitgestellt. Das Verbundvorhaben *H₂_Campus_TUBS* unter Leitung des Steinbeis-Innovationszentrums energie+ hat das Ziel ein Wasserstoff-Kompetenzzentrum (WKZ) am Campus der TU Braunschweig aufzubauen. Das elenia koordiniert das Teilvorhaben der ganzheitlichen Modellierung, Simulation und Testung von Technologien im Reallabor entlang der Wasserstoff-Wandlungskette. Hierbei soll das in den unterschiedlichen Fakultäten und Instituten der TU Braunschweig vorhandene Fachwissen im Bereich der Wasserstoffherzeugung und -verwertung gebündelt werden.

Forschungsziele des elenia im *H₂_Campus_TUBS*

Das elenia ist im Rahmen des *H₂_Campus_TUBS* für den Arbeitsbereich der Netz- und Systemintegration des WKZ verantwortlich. Untersuchungsschwerpunkt ist dabei der im

WKZ zu installierende große (>600kWh) Batteriespeicher und die Ausgestaltung von dessen möglichen Betriebsweisen. Bei Nutzung eines Elektrolyseurs zur Wasserstoffproduktion bietet sich der Einsatz eines Batteriespeichers zur Gewährleistung einer konstanten Betriebsweise und zum Ausgleich der fluktuierenden Erzeugung der benötigten elektrischen Energie an. Erneuerbaren Energien bilden hierbei die Grundlage zur Produktion von sogenanntem grünem Wasserstoff. Der im WKZ eingesetzte Batteriespeicher wirkt damit in erster Linie zur Verschiebung der Energie in Zeiten mit geringer Einspeisung von Erneuerbaren Energien. Gleichzeitig besteht die Möglichkeit des Einsatzes zur Bereitstellung von Systemdienstleistungen, z. B. als Netzbooster zur Wahrung der Netzstabilität.

Einbindung des Wasserstoff-Kompetenzzentrums in Lehraktivitäten an der TU Braunschweig

Ebenfalls Ziel ist die Einbindung der Forschungsaktivitäten in Vorlesungen und Labore zur kontinuierlichen Weiterentwicklung von themen-relevanten Studiengängen sowie in die Graduiertenakademie GradTUBS. Das elenia übernimmt hierbei die Schnittstelle zum Masterstudiengang Elektromobilität, der gemeinsam von den Lehreinheiten Elektrotechnik und Maschinenbau getragen wird.

PROJEKTNAME

H₂_Campus_TUBS

LAUFZEIT

Juni 2021 – Mai 2025

ANSPRECHPARTNER / KONTAKT

Henrik Wagner

✉ henrik.wagner@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391-9718

PROJEKTPARTNER

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

GEFÖRDERT DURCH



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages



Foto: Gian-Luca Di Modica/TU Braunschweig

Forschungsprojekt LISA4CL

Laden – induktiv, schnell, autonom für City Logistik

Im Mai 2020 startete ein neues Forschungsprojekt. Das Projekt *LISA4CL Laden – induktiv, schnell, autonom für City Logistik* befasst sich mit der Entwicklung eines normkompatiblen, schnellladefähigen, induktiven Ladesystems sowie dessen intelligenten Netzintegration.

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

Darüber hinaus ist eine intelligente Netzintegration von Ladesystemen wichtig, weil die Durchdringung von Elektrofahrzeugen und folglich auch die Netzbelastung steigt. Die Gewährleistung eines sicheren Netzbetriebes steht im Vordergrund. Netzorientierte Ladeansätze spielen eine wichtige Rolle im Hinblick auf Netzentlastung und Minimierung von Netzausbau. Zusätzlich sind aus ökonomischer und ökologischer Sicht erzeugungsorientierte Ladeansätze zur Erhöhung des verwendeten Anteils an erneuerbaren Energien von besonderer Bedeutung.

Projektkonsortium

Das Projektkonsortium setzt sich zusammen aus zwei Forschungsinstituten und einem Industriepartner. Die beteiligten Forschungsinstitute sind das elenia Institut für Hochspannungstechnik und

Energiesysteme und das IMAB Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen der TU Braunschweig. Der Industriepartner ist die INTIS – Integrated Infrastructure Solutions GmbH, welche zusammen mit dem IMAB das induktive Ladesystem entwickelt und umsetzt. Als Konsortialführer veranstaltete das elenia das digitale Auftakttreffen. Das Treffen hat einen gelungenen Einstieg für das Projekt und die anstehende Zusammenarbeit geschaffen.

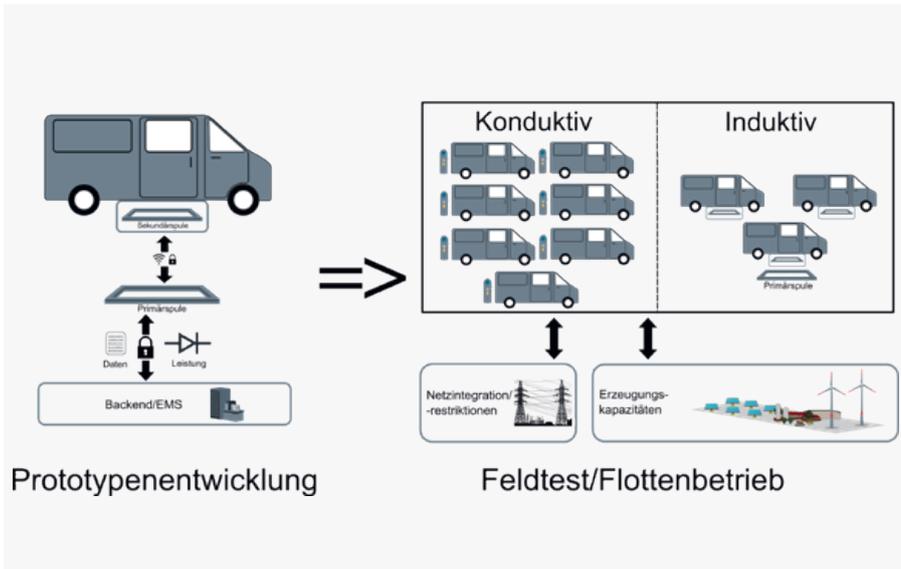
Inhalt des Projekts

Die Abbildung *Übersicht des Projekts LISA4CL* zeigt schematisch die Inhalte des Projekts LISA4CL. Das Projekt gliedert sich in drei Teile. Im ersten Teil wird ein normkonformes, schnellladefähiges, induktives Ladesystem für die Anwendung in leichten Nutzfahrzeugen entwickelt und aufgebaut, welches im Vergleich zu aktuellen Nor-



Induktives Ladesystem des Projekts InduktivLaden.

Foto: IMAB/TU BS



Übersicht des Projekts LISA4CL

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

Durch die Mitarbeit der Projektpartner in verschiedenen Normungsgremien finden die Projektergebnisse direkten Eingang in künftige Normen und Richtlinien. Durch die Mitwirkung des Industriepartners INTIS wird ein hoher Praxisbezug sichergestellt. Das induktive Ladesystem wird als markt-

reifes Produkt entwickelt. Zusätzlich fließen auf der wissenschaftlichen Seite die Forschungsergebnisse in Promotionsvorhaben an den Instituten ein. Darüber hinaus werden sie Eingang in entsprechende Lehrveranstaltungen, wie Vorlesungen, Laborpraktika und studentische Abschlussarbeiten finden und auf nationalen und internationalen Konferenzen und Tagungen präsentiert und diskutiert. Das Projekt sowie dessen Methodik wurden bereits auf der NEIS 2021 – *Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems* vorgestellt.

Arbeitsziele des elenia

Im Rahmen des Projektes verantwortet das elenia die Projektkoordination und inhaltliche Aspekte wie z. B. die Kommunikationsschnittstellen des induktiven Ladesystems. Der Fokus des elenia liegt auf den folgenden Arbeitspunkten:

- 1.) Entwicklung diverser Kommunikationsschnittstellen des induktiven Ladesystems, wie z. B. die Schnittstelle zum Fahrzeug und zum Backend.
- 2.) Entwicklung, Erprobung und Validierung von netzorientierten und erzeugungsorientierten Ladealgorithmen.
- 3.) Durchführung von Feldtests mit konduktiver Ladeinfrastruktur und dem induktiven Ladesystem sowie der entwickelten Ladekonzepte bei einem Logistikunternehmen.

PROJEKTNAME

LISA4CL

LAUFZEIT

Mai 2020 – April 2023

PROJEKTLOGO



ANSPRECHPARTNER / KONTAKT

Gian-Luca Di Modica, M. Sc.

✉ g.di-modica@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391-9727

PROJEKTPARTNER

elenia (TU BS), IMAB (TU BS), INTIS

WEBSITE

www.tu-braunschweig.de/elenia/forschung/forschungsprojekte/lisa4cl

GEFÖRDERT DURCH



KOORDINIERT DURCH





Foto: Cornelius Biedermann/elenia

Spannungsqualität verbessern

Auswirkungen zukünftiger Netznutzungsfälle der Niederspannung und ihre Betriebsweise auf die Spannungsqualität

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. 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. Insbesondere werden Lösungen entwickelt, welche die Spannungsqualität verbessern sollen.

Forschungsarbeit in den Jahren 2020 und 2021

In den Jahren 2020 und 2021 wurden im Projekt diverse Forschungsarbeiten absolviert, die sich mit verschiedenen Teildisziplinen der Spannungsqualität befassen. Ein Kernaspekt war die Erfassung der Spannungsqualität im Niederspannungsnetz. Hierfür wurden in einem vorstädtischen Niederspannungsnetz in Braunschweig, welches eine hohe Durchdringung von PV-Anlagen und Wärmepumpen aufweist, Feldmessungen durchgeführt. In dem Feldtestnetz wurden sowohl im Winter 2019/2020 als auch im Spätsommer 2020 für jeweils zwei Wochen Leistungsmessgeräte an verschiedenen Punkten im Netz, wie z. B. an der Ortsnetzstation, integriert, um die Spannungsqualität zu erfassen. Ein weiterer Fokus lag auf der Vermessung von Geräten, um deren Auswirkungen auf die Spannungsqualität zu ermitteln. Es wurden diverse PV-Wechselrichter,

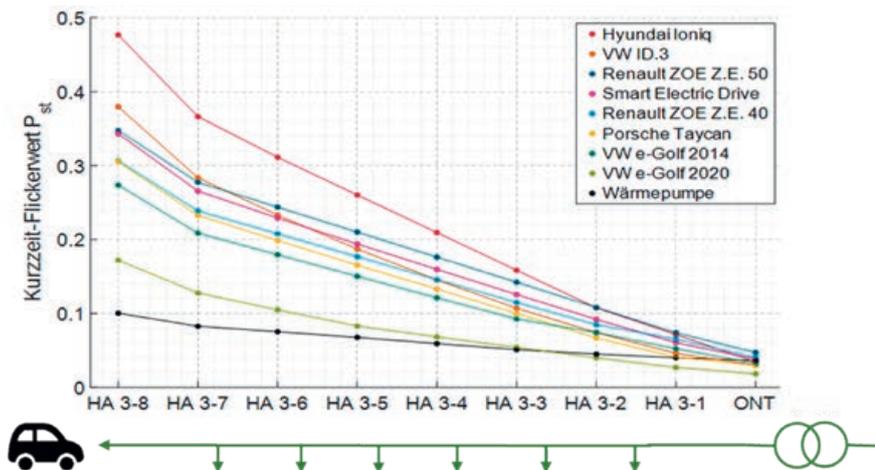
Batteriewechselrichter und eine Wärmepumpe in Laborumgebung vermessen sowie eine Vielzahl von Elektrofahrzeugen an den institutseigenen Ladesäulen. Die Abbildung *U-Quality Vermessung verschiedener BEV und PHEV* zeigt die Ladesäulen und ein Teil der vermessenen Fahrzeuge.

Ein weitere Forschungsschwerpunkt lag auf der Entwicklung eines Reglers, welcher die Spannungsqualität im Niederspannungsnetz erhält bzw. verbessert. Hierfür wurde in Zusammenarbeit mit Ruhstrat Power Technology ein Reglerkonzept erarbeitet, welches für den Regler einen Unified Power Quality Conditioner (UPQC) vorsieht. Der Regler sowie dessen Regelungen wurden mittels MATLAB/Simulink modelliert und im Anschluss wurden mit diesem Modell erste Simulationen durchgeführt. Im nächsten Schritt wurden auf Basis der Simulationen Teilaspekte des Reglerkonzepts in Laborumgebung erprobt. Weiterhin wurden Laborversuche und Simulationen durchgeführt, um einen möglichen Einfluss der Q(U)-Regelung auf Flickerwerte bei schnellen Spannungsänderungen zu untersuchen.



U-Quality Vermessung verschiedener BEV und PHEV.

Foto: Di Modica/elenia



Kurzzeit-Flickerwerte bei Netzsimulationen mit Zeitreihen von real vermessenen Schaltflanken der BEV und WP: Diagramm: Till Garn/elena

Ergebnisse der Feldmessung

Die Ergebnisse der Feldmessungen zeigen unter anderem, dass schnelle Spannungsänderungen (RVC, engl. rapid voltage change) Flicker verursachen. In der Feldmesskampagne wurden schnelle Spannungsänderungen mit maximalen Änderungen der Spannung von bis zu 7,3 % gemessen. Aus diesen schnellen Spannungsänderungen gingen auch die maximal gemessenen Flickerwerte hervor, welche jedoch nicht grenzwertverletzend waren. Weiterhin war die Unsymmetrie in der Nacht vermindert, weshalb EVs bei einphasigem Laden und geringen Durchdringungen hiernach keine Probleme für die Unsymmetrie darstellen.

Ergebnisse der Vermessung von Einzelkomponenten

Die Auswirkungen der EVs auf die Spannungsqualität variieren deutlich zwischen den verschiedenen Fahrzeugtypen. Für Oberschwingungen von der 50. bis 200. Ordnung hat der Renault Zoe 2020 die höchsten Effektivwerte von allen vermessenen EVs. Die maximalen Werte des Renault Zoe 2020 treten in diesem Bereich bei ungeraden Ordnungen um die 200. Oberschwingung auf. Zusätzlich wurden die Lastprofile und die Schaltflanken der Fahrzeuge aufgenommen. Diese konnten in Simulationen genutzt werden (vgl. Abbildung: Kurzzeit-Flickerwerte bei Netzsimulationen mit Zeitreihen von real vermessenen Schaltflanken der BEV und WP).

Weitere Messungen zeigten, dass Anläufe einer nichtmodulierenden Wärmepumpe schnelle Spannungsänderungen

und erhöhte Flickerwerte erzeugen, welche allerdings ebenso wie die vermessenen PV-Wechselrichter keine Grenzwertverletzungen der Normen DIN EN 50160, IEC 61000-3 aufwiesen.

Ergebnisse Untersuchung Einfluss der Q(U)-Regelung

Der Einfluss der Q(U)-Regelung auf Flickerwerte bei schnellen Spannungsänderungen wurde in den Simulationen und Laborversuchen festgestellt. Dies kann zu einer Erhöhung, aber auch zu einer Verringerung der Flickerwerte führen. Jedoch ist dieser Einfluss selbst in Netzen mit einer hohen PV-Durchdringung sehr gering und im Vergleich zum Nutzen der Q(U)-Regelung zu vernachlässigen.

Weiterhin sollen Flicker in Zukunft im Hinblick auf Wärmepumpen, Elektrofahrzeuge und PV-Anlagen betrachtet werden. Hierfür werden Simulationen mit Netznutzungsszenarien durchgeführt, welche für das Projekt entwickelt wurden.

Die Ergebnisse fanden Eingang in entsprechenden Veröffentlichungen auf nationalen und internationalen Konferenzen und Tagungen und wurden auf diesen präsentiert und diskutiert. Beim 16. Symposium Energieinnovation EnInnov2020 in Graz wurde das Projekt vorgestellt. Auf der Tagung Zukünftige Stromnetze 2021, dem ETG-Kongress 2021 und der CIRED 2021 wurden die Ergebnisse der Feld- und Labormessungen veröffentlicht.

Weitere Arbeitsziele im Projekt

Während Sie diese Zeilen lesen wird das Projektkonsortium in den Abschluss zur Un-

tersuchung des oben beschriebenen Spannungsqualitätsreglers sein und sich mit den Verteilnetzbetreiber auf einen Demonstratorfeldversuch vorbereiten. Wir freuen uns schon sehr auf die Durchführung und freuen uns auf spannende Ergebnisse.

Neuste Informationen zum Projekt erhalten Sie auch auf unsere Projektwebsite „u-quality.de“. Sollte Ihr Interesse an dem Forschungsprojekt geweckt sein, scheuen Sie sich nicht mich zu kontaktieren!

PROJEKTNAME

U-Quality

LAUFZEIT

September 2019 – August 2022

PROJEKTLOGO



ANSPRECHPARTNER / KONTAKT

M. Sc. Cornelius Biedermann

✉ cornelius.biedermann@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391-7788

PROJEKTPARTNER

RWTH Aachen, TU München, FGH e.V.

Bayernwerk, Netze BW, Regionetz, Stromnetz Hamburg, Avacon, BS Netz, Maschinenfabrik Reinhausen, Phoenix Contact, SMA und Ruhstrat Power Technology

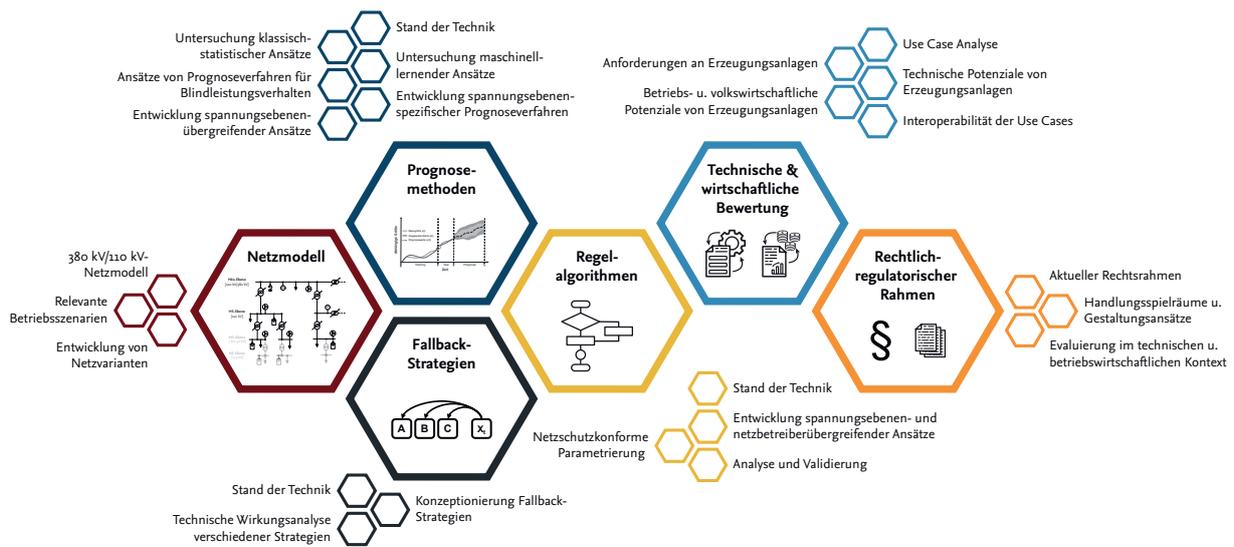
WEBSITE

www.u-quality.de

GEFÖRDERT DURCH



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages



Blindleistungsmanagement im Verteilungs- und Übertragungsnetz unter Verwendung innovativer Blindleistungsquellen

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

Der Zubau von erneuerbaren Energieanlagen (EEA) im VN bei gleichzeitiger Abschaltung von regelbaren Synchrongeneratoren im ÜN führt dazu, dass durch die umrichtergekoppelten EEA ein theoretisches Blindleistungspotential im VN entsteht und ein großer Teil des Blindleistungspotentials im ÜN sukzessive abgebaut wird. Der Zubau der dargebotsabhängigen EEA hat jedoch auch zur Folge, dass Übertragungsstrecken sowie Auslastungen von Betriebsmitteln zunehmen, die Blindleistungsbedarfe damit steigen und temporären Schwankungen ausgesetzt sind. Erschwerend kommt hinzu, dass Blindleistung ein lokales Phänomen ist und eine Übertragung über längere Distanzen wirtschaftlich nicht umsetzbar ist.

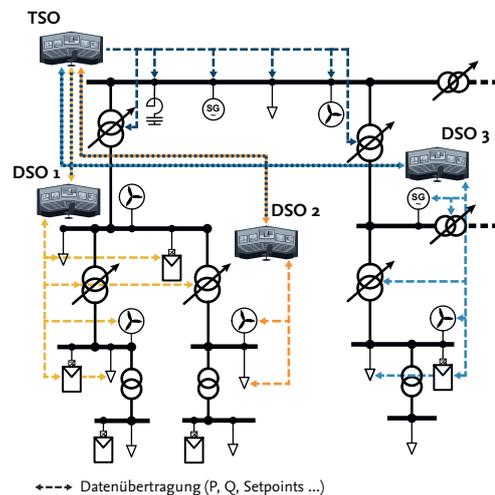
Diese Sachverhalte führen dazu, dass auf das BM fundamentale Änderungen in Bezug auf betriebliche sowie planerische Aspekte zukommen. In Zukunft muss der residuale Blindleistungsbedarf des ÜN gedeckt werden. Eine Option stellen verlässliche, verteilte und dynamische Blindleistungsquellen aus dem VN dar.

Daraus abgeleitete Forschungsfragen werden fortlaufend am elenia in unterschiedlichen Forschungsprojekten bearbeitet. Das Projekt PV-Wind-Symbiose hat zu diesem Themenbereich bereits einige Forschungsfragen beantwortet, siehe Abschlussbericht zum Verbundvorhaben 2019. Zentrale Fragestellungen in diesem Projekt waren, die Effizienz der Blindleistungsbereitstellung aus PV- (PVA) und Windenergieanlagen (WEA), die technischen Auswirkungen der Einspeisung auf einen Netzabschnitt eines realen Hochspannungs-

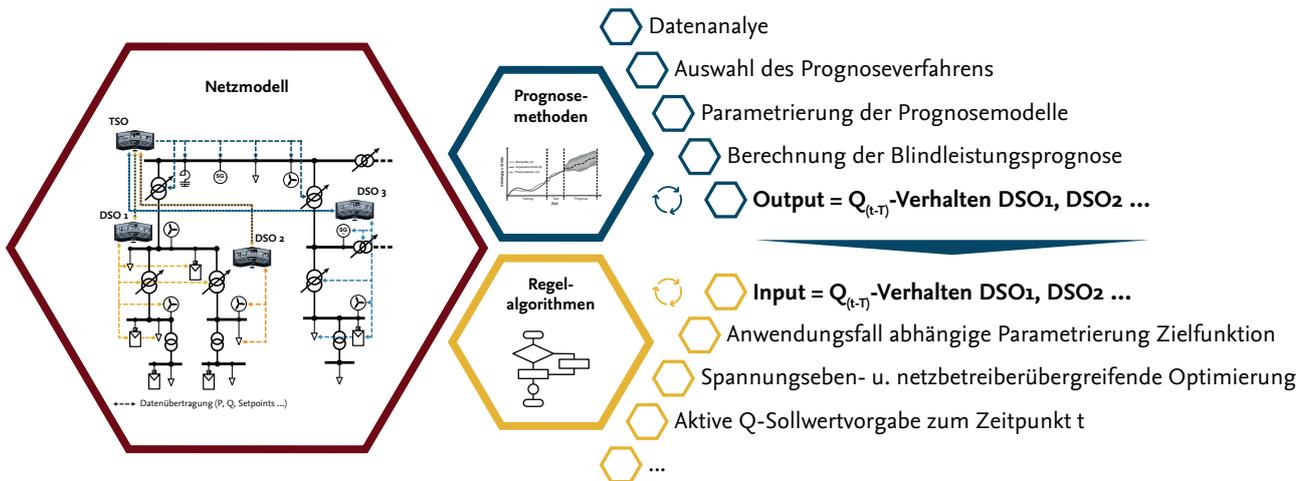
netzes (HS-Netz) und die wirtschaftliche Betrachtung der Integration einzelner EEA als Blindleistungsquellen in ein aktives BM.

Im aktuell laufende Anschlussprojekt Q-Integral steht die Schnittstelle zwischen VN und ÜN im Fokus der Untersuchungen. In Zusammenarbeit mit dem Übertragungsnetzbetreiber 50Hertz sowie in Teilen der unterlagerten Verteilungsnetzbetreiber E.DIS, TEN und WEMAG werden mit den realen Netzmodellen der Partner unterschiedliche Ansätze für ein netzbetreiber- und spannungsebenenübergreifendes BM entwickelt. Eine schematische Darstellung des aktiven und integralen BM-Konzeptes findet sich in der nachfolgenden Abbildung.

Die objektorientierte Simulationsumgebung umfasst hierbei gegenwärtig die Module „Netzmodell“, „Prognosemethoden“ sowie „Regelalgorithmen“. Als zentraler Baustein nutzen die Module



Aktives integrales Blindleistungsmanagement



Teilausschnitt der Interaktion der Module „Prognosemethoden“ und „Regelalgorithmen“ in der Q-Integral

„Prognosemethoden“ sowie „Regelalgorithmen“ das Python-Interface von *DigSILENT PowerFactory*, um auf den Funktionsumfang der Netzberechnungssoftware sowie das physikalischen Netzmodell zuzugreifen.

Innerhalb des Moduls „Prognosemethoden“ werden unterschiedliche Prognoseverfahren zur Prognose des Blindleistungsverhaltens der verschiedenen Netze untersucht. Die Vorhersage zum Zeitpunkt $t-T$ soll eine spannungseben- und netzbetreiberübergreifende Optimierung des Blindleistungsverhaltens der Netze zum Zeitpunkt t im Modul „Regelalgorithmen“ ermöglichen. Dazu werden mittels einer umfangreichen Datenanalyse die Zusammenhänge zwischen Erzeugern, Lasten, Betriebsmitteln und unterschiedlichen Netzgrößen quantifiziert. Anhand der Ergebnisse erfolgt eine Auswahl des anzuwendenden Prognoseverfahrens. In Abhängigkeit der gegebenen Beobachtbarkeit einzelner Netze werden auf der Basis vorhandener Datensätze die Prognosemodelle trainiert und darauffolgend validiert. Der datengetriebene Ansatz ermöglicht in Abhängigkeit der Qualität der Daten eine Berechnung der Prognose des Blindleistungsverhaltens einzelner Umspannwerke innerhalb der einzelnen Verteilungsnetze. Um eine Aussage über das prognostizierte Blindleistungsverhalten an den Netzverknüpfungspunkten zu erhalten und dabei das Blindleistungsverhalten der Netzbetriebsmittel zu berücksichtigen, werden aktuell mit den Prognoseergebnis-

sen zusätzlich Leistungsflussberechnungen im Netzmodell durchgeführt. Das langfristige Ziel ist eine rein datengetriebene Prognose. Der bestehende Entwicklungsansatz zur Blindleistungsprognose ist vollständig in M. Schuster et al. ETG Congress 2021 nachzulesen.

Das Modul „Regelalgorithmen“ umfasst das Blindleistungsmanagement der einzelnen Netzregionen, die aufgrund der geografischen und elektrischen Nähe effizienter zusammenarbeiten müssen. Im umgesetzten BM werden die jeweiligen Blindleistungsquellen wie DEA, Synchrongeneratoren und Trafostufungen eingesetzt, um die jeweiligen Anforderungen der Netzregion zu einer bestimmten Zeit zu erfüllen. Zunächst wird der aktuelle Zustand des Netzes analysiert und einem Anwendungsfall zugeordnet. Darauffolgend werden die mit dem Anwendungsfall verknüpften Ziele verfolgt, in dem die Blindleistungsquellen intelligent und automatisiert angesteuert werden.

Derzeit laufen zudem Untersuchungen zu den weiteren Arbeitspaketen (s. Titelgrafik) des elenias. Dazu zählen die Entwicklung von Fallbackstrategien von eingebundenen DEA bei Kommunikationsausfall sowie die Untersuchung und Evaluierung des rechtlichen-regulatorischen Handlungsspielraums eines aktiven und integralen BM im technisch/betriebswirtschaftlichen Kontext.

PROJEKTNAME

Q-Integral – Aktives BM mit dynamischen Blindleistungsquellen an der Schnittstelle VN u. ÜN

LAUFZEIT

April 2019 – März 2022

PROJEKTLOGO



ANSPRECHPARTNER / KONTAKT

Hartmudt Köppe, M.Sc.

✉ h.koepp@tu-braunschweig.de

Merten Schuster, M.Sc.

✉ m.schuster@tu-braunschweig.de

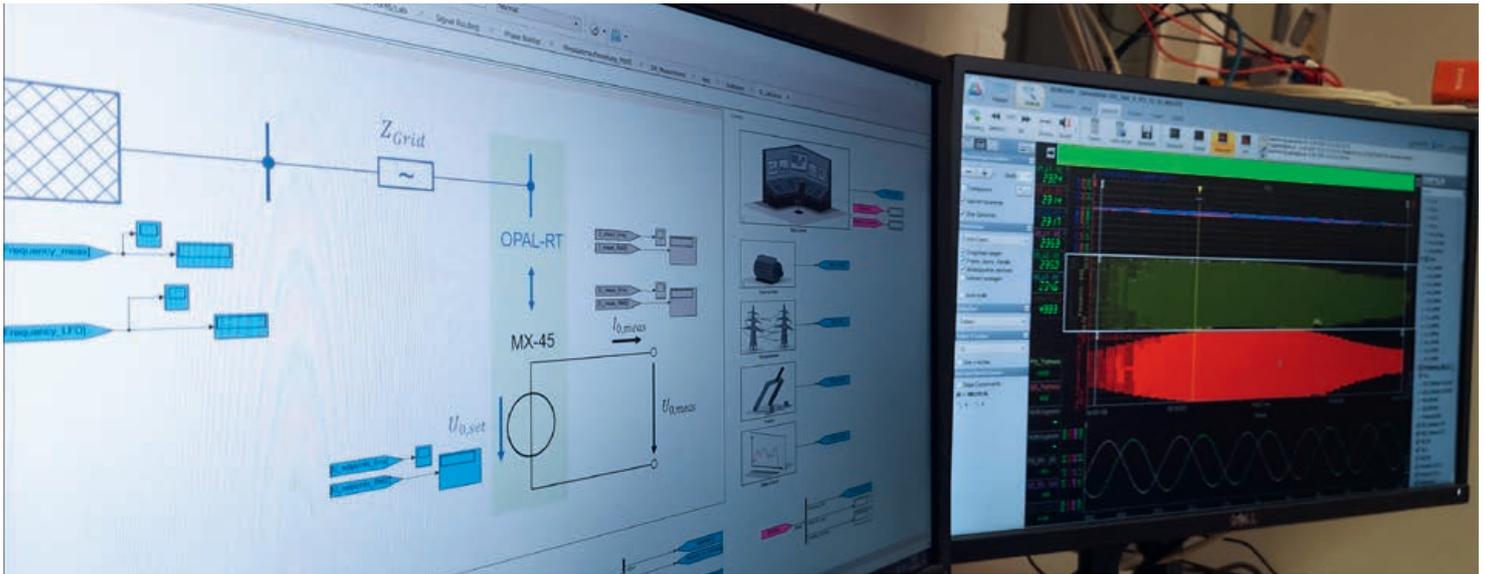
PROJEKTPARTNER

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

GEFÖRDERT DURCH



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages



Netzregelung 2.0

Stabiler Netzbetrieb mit 100% Erneuerbaren Energien

Motivation & Ziele des Vorhabens

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

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

Das Gesamtziel des Forschungsvorhabens Netzregelung 2.0 besteht darin, aufzuzeigen, dass das elektrische Verbundsystem in Deutschland mit einem sehr hohen Anteil an Wechselrichtern 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. Wechselrichter hingegen bringen andere technische Charakteristika mit sich, die ebenso gut für die Sicherung der Systemstabilität geeignet sind.

Forschung am elenia

Im Rahmen des Verbundvorhabens beschäftigt sich das elenia mit der Integration von spannungseinprägenden Wechselrichtern in das Verteilungsnetz. 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. Zum anderen wird ein weiterer Fokus auf die Einflüsse spannungseinprägender Umrichtertechnologie auf die Verteilnetze, insbesondere auf lokale Spannungsqualität und Netzschutzmaßnahmen, gelegt.

PROJEKTNAME

Netzregelung 2.0

LAUFZEIT

Dezember 2016–August 2022

ANSPRECHPARTNER / KONTAKT

Florian Rauscher

✉ f.rauscher@tu-braunschweig.de

Timo Sauer

✉ t.sauer@tu-braunschweig.de

Björn Oliver Winter

✉ bjoern.winter@tu-braunschweig.de

PROJEKTPARTNER

Weitere Forschungsinstitute:

Fraunhofer IEE, Uni Kassel

Anlagenhersteller: Siemens, SMA Solar Technology AG

Netzbetreiber: 50Hertz, Amprion, TenneT, Transnet BW, EWE Netz, Mitnetz, Westnetz

Verbände und Netzwerke: VDE | FNN, DERlab, dena

GEFÖRDERT DURCH



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Weiterentwicklung der Regelungsansätze netzbildender Wechselrichter

Spannungseinprägende netzbildende Wechselrichter gelten als populäre Lösungsansätze für die Fragestellungen des zukünftigen Stromnetzes. Daher werden mittlerweile auch verschiedene Regelungsansätze mit ihren jeweiligen Eigenschaften in der Forschungslandschaft diskutiert. Die meisten der Regelungsansätze haben gemein, dass sich die wesentlichen Gleichungen auf die Bewegungsgleichung der Synchronmaschine, die Swing Equation, stützen. Vorteil ist hierbei, das wesentliche Elemente aus dem Bereich der Netzdynamik wie bei der Synchronmaschine nachgebildet werden und dadurch das dynamische Verhalten im Verbundbetrieb in großen Teilen gleich ist. Eine besondere Herausforderung ist hierbei jedoch der Umgang mit Kurzschlussituationen. Während eine Synchronmaschine sehr große Kurzschlussströme, die ein Vielfaches ihres Nennstromes sein können, einspeisen, sind Wechselrichter in der Regel auf ihren einfachen Nennstrom begrenzt. Hier gilt es einen Kompromiss aus der Bereitstellung des Kurzschlussstromes für z. B. Schutzgeräte und den Betriebsgrenzen des Wechselrichters zu finden.

Am elenia konnten im Rahmen des Forschungsprojektes verschiedene Verfahren entwickelt und im Labor verifiziert werden, um eine Lösung für diesen Zielkonflikt zu präsentieren. Abbildung 1 und 2 zeigen den

Versuchsaufbau und die wirksame Strombegrenzung, um die 1 p.u. und damit den Nennstrom nicht zu überschreiten. Besonders von Interesse ist hierbei sowohl der Fehlereintritt als auch die Fehlerklärung. Hierbei muss die Regelung sehr dynamisch eingreifen und gleichzeitig das System durch den schnellen Eingriff nicht in einen instabilen Arbeitspunkt führen. Die entwickelten Verfahren wurden dann mittels eines Rapid Prototyping Inverters für agile Entwicklung im Labor auf die Funktionsfähigkeit getestet. Die gestellten Anforderungen konnten somit erfüllt und die Funktionsfähigkeit auch im Labor nachgewiesen werden.

Herausforderungen in der Integration in das Verteilungsnetz

Eine weitere besondere Aufgabe in der flächendeckenden Integration von netzbildenden Wechselrichtern ist, dass eine solche virtuelle Synchronmaschinen Regelung, wie sie zuvor beschrieben worden ist, in der Regel für den Betrieb am Höchstspannungsnetz vorgesehen ist. Die neuen netzbildenden Wechselrichter werden aber aufgrund ihrer geringe Leistungsklasse im Verteilungsnetz eingesetzt werden. Hierdurch ergeben sich neue Anforderungen, dass das ursprüngliche dynamische Verhalten der Synchronmaschine zusammen mit Konzepten im Verteilungsnetz, z. B. im Bereich des Netzschutzes, abgeglichen werden muss.

Ein besonderes Themenfeld im Kontext des Netzschutzes ist das Vermeiden von ungewollten Inselnetzen infolge einer Netzauftrennung, die z. B. bei Wartungsarbeiten oder durch einen Netzfehler verursacht werden. Normale Wechselrichter müssen in diesen Situationen erkennen, dass sie nicht mehr am Verbundnetz betrieben werden und sich dann gezielt abschalten. Der netzbildende Wechselrichter hingegen versucht jedoch, weshalb man ihn überhaupt auch einsetzt, nach Möglichkeit ein stabiles Netz jederzeit zu erhalten. Somit liegt auch hier ein Zielkonflikt vor, indem auf der einen Seite solche ungewollten Inselnetze sicher abgeschaltet werden müssen und auf der anderen Seite die netzstabilisierende Eigenschaft des netzbildenden Wechselrichters nicht beeinträchtigt werden soll.

Um dies zu lösen, wurde ebenfalls eine weitere Funktion der Inselnetzerkennung und -vermeidung für netzbildende Wechselrichter am elenia in diesem Forschungsprojekt entwickelt und im Labor auf seine Funktionsfähigkeit getestet. Abbildung 3 zeigt eine Labormessung, in der eine Netztrennung und damit Inselung durchgeführt wurde und innerhalb weniger als fünfzehn Sekunden auch eine Abschaltung ebendieses Inselnetzes erfolgen konnte. Die vorgestellten Funktionen werden im weiteren Projektverlauf noch auf ihr Verhalten zusammen mit normalen Wechselrichtern geprüft.

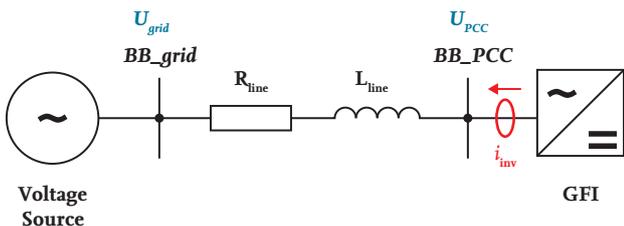


Abbildung 1: Laboraufbau zur Netzfehlerprüfung

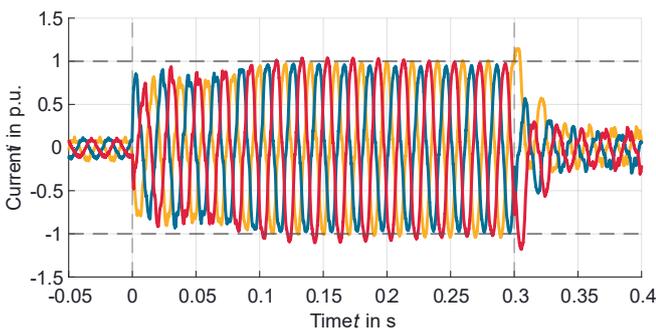


Abbildung 2: Nachweis der Wirkungsweise der Strombegrenzung anhand gemessener Ströme

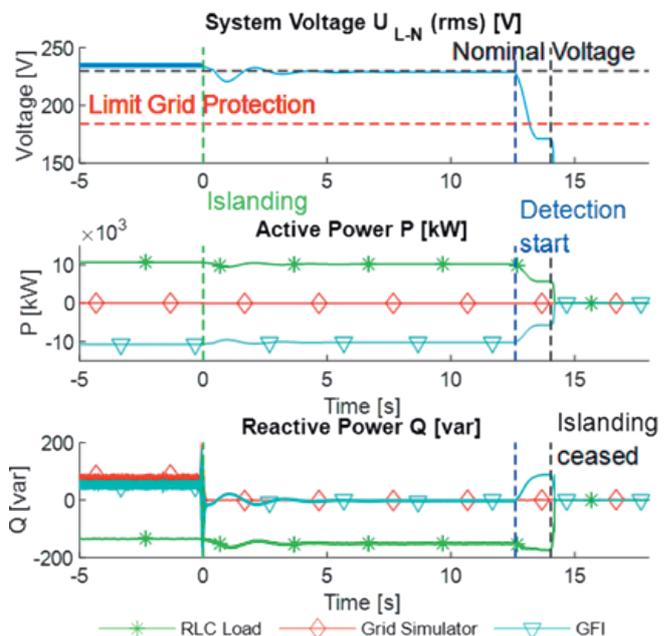


Abbildung 3: Darstellung der Inselnetzbildung und -abschaltung eines netzbildenden WR



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 elenia Institut für Hochspannungstechnik und Energiesysteme 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 kri-

tische 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.

Forschungsarbeiten in den Jahren 2020 und 2021

Nachdem in den vorangegangenen Arbeitspaketen die relevanten Szenarien, Komponenten und Parameter identifiziert wurden, wurden die verschiedenen Reaktionen der Komponenten auf einen Ausfall der Kommunikationsinfrastruktur ermittelt. Die sich daraus ergebenden Auswirkungen auf ein Stromverteilungsnetz wurden anschließend bewertet. Zu diesem Zweck wurden vier Benchmark-Niederspannungsnetze verwendet, die ländliche und städtische Netze repräsentieren und an ein Mittelspannungsnetz angeschlossen sind, wodurch ein Verteilungsnetz nachgebildet wird.

Um die Strukturen zu testen und die negativen lokalen Auswirkungen zu ermitteln, wurde eine strukturierte Auswahl von Lastflussberechnungen bei unterschiedlichen Ausbaustufen der Komponenten und Betriebspunkten durchgeführt. Die

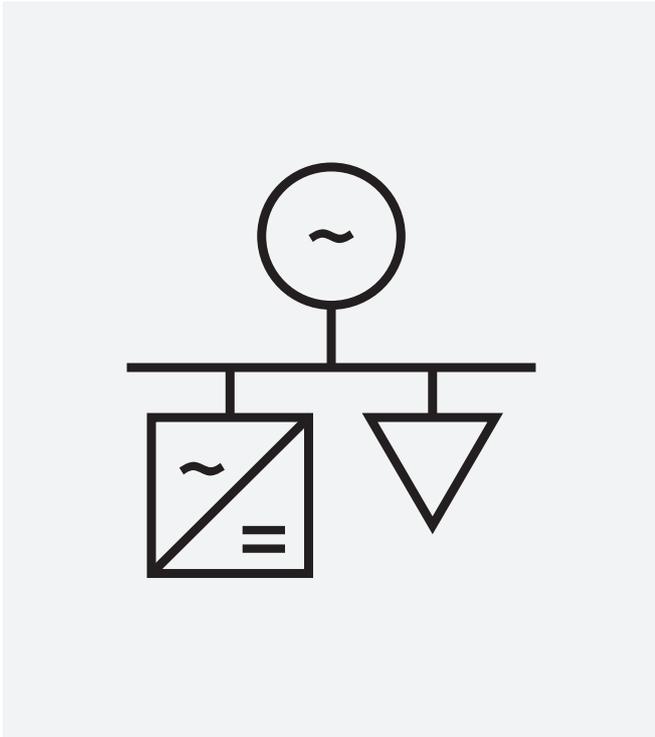


Abbildung 1: Bilanzmodell für Untersuchungen zu globalen Auswirkungen

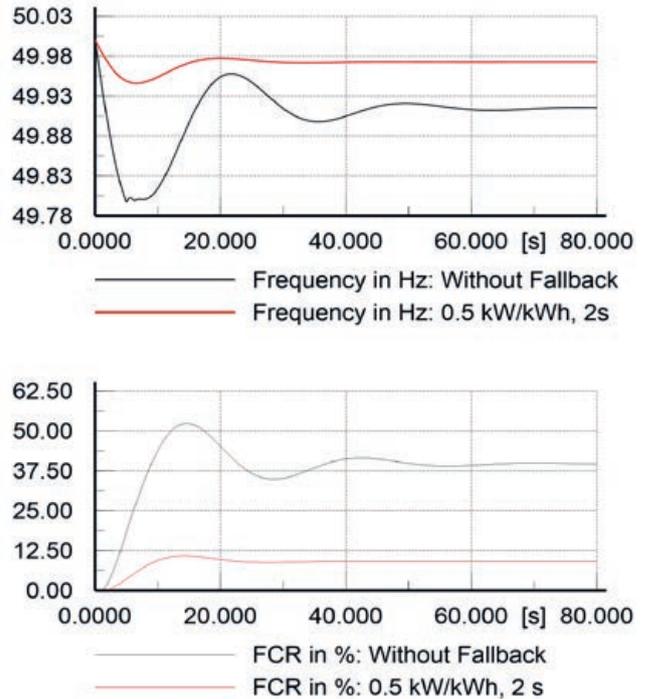


Abbildung 2: Frequenzverlauf ohne und mit Fallback

Durchdringung von PV-Anlagen, Batteriespeichern und Elektroautos wurde mittels Sensitivitätsanalysen variiert. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass im Hinblick auf die betrachteten Szenarien, negative Auswirkungen vorwiegend im vermaschten Netz auftraten und betrafen Überlastungen von Leitungen. Es konnte festgestellt werden, dass ein Managementsystem erforderlich ist, um Erzeugung und Verbrauch lokal auszugleichen und damit Überlastungen bei hoher Last oder bei hoher Einspeisung zu vermeiden.

Darüber hinaus wurden Untersuchungen zur Gesamtstabilität des Systems durchgeführt. Zu diesem Zweck wurde ein Bilanzmodell verwendet, das die Frequenz des europäischen Stromnetzes bei einer plötzlichen Leistungsverschiebung und die Aktivierung der Frequency Containment Reserves (FCR) nachbildet. Es wurde untersucht, welche Auswirkungen eines flächendeckenden Ausfalls der Kommunikationsinfrastruktur hat auf die Frequenz und Aktivierung von FCR, wenn öffentliche Ladestationen für Elektroautos ihren Betriebspunkt als Folge des IKT-Ausfalls ändern. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die zukünftige hohe Anzahl an Ladestationen und Ladeleistungen bei einer negativen Reaktion auf einen Kommunikationsausfall zu Frequenzschwankungen und große Aktivierungen von FCR führen können. Dies könnte der Systembetrieb ge-

fährden, da diese Reserven bei weiteren Ausfällen im System möglicherweise nicht reichen könnten, um den Betrieb aufrechtzuerhalten. Als Gegenmaßnahme wurde eine zusätzliche P-f-Kennlinie bei den Heimspeichersystemen getestet, die zu einer Entlastung der FCR-Aktivierung führt.

Derzeit wird ein Demonstrator im Labor aufgebaut, mit dem die zu entwickelnden Fallbackalgorithmen bei den verschiedenen Komponenten getestet werden können. Dafür wird eine Kommunikationsstrecke zwischen Komponenten und Demonstrator aufgebaut, um die Sollwerte zu senden und die aktuelle Parameter zu messen.

Was liegt vor uns?

Das Projektteam blickt dem Jahr 2022 gespannt entgegen. Geplant für die nächsten Monate ist die Konkretisierung der 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. Schließlich werden die erzielten Ergebnisse verbreitet und die entsprechenden Maßnahmen den verschiedenen Berufsverbänden und Gremien präsentiert.

PROJEKTNAME

IKTfree

LAUFZEIT

Oktober 2018 – Juni 2022

PROJEKTLOGO



ANSPRECHPARTNER / KONTAKT

Edwin Rebak

✉ e.rebak@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391-7759

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)

GEFÖRDERT DURCH



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages



ALPHEUS

Stärkung der Netzstabilität durch Pumpspeicherkraftwerke mit niedriger Förderhöhe

Der Energieverbrauch von Industrie und Privathaushalten fällt oft nicht zeitlich mit der Energieerzeugung durch Wind, Sonne oder Wasser zusammen. In Ländern mit großen topographischen Höhenunterschieden helfen technisch etablierte Pumpspeicherkraftwerke, einen Teil der Energie nach Bedarf zwischenspeichern. Das Projekt ALPHEUS, an dem auch die Technische Universität Braunschweig mit dem elenia Institut für Hochspannungstechnik und Energiesysteme und dem Leichtweiß-Institut für Wasserbau – Abteilung Hydromechanik, Küsteningenieurwesen und Seebau beteiligt ist, arbeitet nun an Lösungen, damit auch Gebiete im Flachland von dieser eigentlich bekannten Technologie profitieren können.

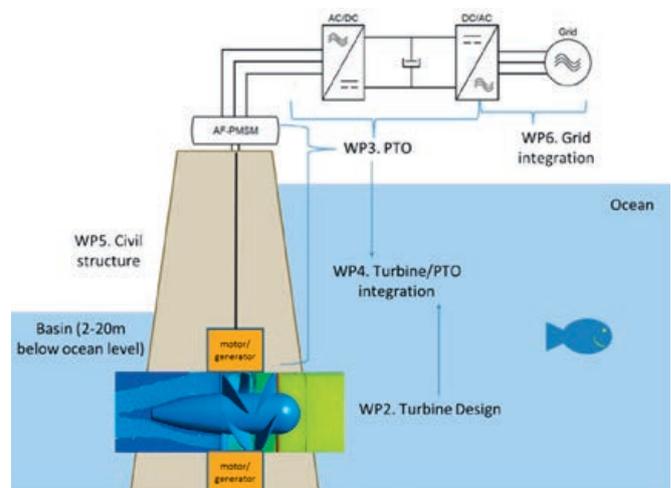
Derzeitige Stromnetze sind aufgrund des langsamen Netzausbaus noch nicht in der Lage, die Schwankungen erneuerbarer Energiequellen wie der Windenergie abzufangen, ohne auf fossile Kraftwerke mit Ausstoß von klimaschädlichem CO₂ zurückzugreifen oder deren Einspeisung immer wieder zeitweise zu drosseln. In Bergregionen wie den deutschen Mittelgebirgen und den Alpen entlasten Pumpspeicherkraftwerke (PSK) die Netze. Dabei wird Wasser bei überschüssiger Stromerzeugung in Speicherbecken auf höhere Topographie gepumpt. Bei steigendem Stromverbrauch fließt das Wasser durch Turbinen wieder zu Tal. Dieses Verfahren ist die derzeit am besten ausgereifte und kostengünstigste Art der Energiespeicherung.

Was aber machen Länder wie die Niederlande und Belgien? Sie verfügen nicht über die für PSK erforderliche natürliche Topografie mit großen Höhenunterschieden in der Landschaft. Das Energie-Backup besteht somit fast ausschließlich aus fossilen Brennstoffen und Wärmekraftwerken. Trotz großer Fortschritte in der Batterieforschung hinsichtlich Effizienz und Anfangskosten gelten Lithium-Ionenbatterien nicht als wirtschaftliche Speicheralternative. Ihre Le-

bensdauer steht verglichen mit der für die Herstellung benötigten Energie in einem deutlich schlechteren Verhältnis als bei PSK.

Im Rahmen des Projektes ALPHEUS werden konzeptionelle Entwürfe für neue und nachgerüstete PSK-Becken mit niedriger Förderhöhe entworfen. Eine umfassende Beurteilung der mechanischen, elektrischen und strukturellen Komponenten ermöglicht es, die Kosten dieser Systeme zu bestimmen und die Risiken zu bewerten. Tools zur Informations- und Entscheidungsunterstützung werden entwickelt, um das Wissen in die Gesellschaft zu tragen.

Neben der Entwicklung der passenden Turbinen-Technologie, die sowohl im Pump- als auch im Turbinenbetrieb bei niedrigen Förderhöhen effizient arbeiten kann und der Erkundung des Standortpotentials für neue und nachzurüstende Pumpensysteme und



Projektkonzept von ALPHEUS



Offshore Windfarm — ALPHEUS-Anlage soll das Konzept von „Energieinseln“ ermöglichen

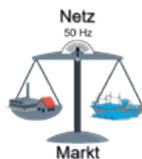
Becken, untersucht das elenia vor allem die Auswirkungen auf die Stabilität des Stromnetzes.

Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler vom elenia an der TU Braunschweig modellieren hierfür spezielle Umrichtereinheiten zur Einspeisung der erzeugten Leistung in das Verbundnetz. Anschließend messen sie dessen Auswirkungen auf das Netz und evaluieren, inwiefern solche Stromrichter neben der bloßen Einspeisung auf vielfältige Weise zur Stabilisierung des Verbundnetzes beitragen können. Dies ermöglicht eine Bewertung, wie größere Stromnetze auf die dezentrale Energiespeicherung reagieren.

elenia bearbeitet das Arbeitspaket 6 „Netzintegration“

Das Arbeitspaket 6 besteht aus 3 Aufgaben:

- 1.) Ansteuerung des netzgekoppelten Wechselrichters (konform mit EU Verordnungen und Richtlinien, z. B. Festlegung eines Netzkodex mit Netzanschlussbestimmungen für Stromerzeuge: Verordnung (EU) 2016/631) und erstellen ein Simulationsmodell für Netzstudien
- 2.) Untersuchung für den Beitrag des Pumpspeicherkraftwerks zur Netzstabilität und Flexibilität
- 3.) Wirtschaftliche und regulatorische Rahmenbedingungen für einen netzdienlichen Flexibilitätseinsatz, nach EU Richtlinien, z. B. 2019/944: Vorschriften für den Elektrizitätsbinnenmarkt



PROJEKTNAME

ALPHEUS

LAUFZEIT

April 2020 – März 2024

PROJEKTLOGO



ANSPRECHPARTNER / KONTAKT

Mohammed Qudaih, M.Sc.

✉ m.qudaih@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391-7787

PROJEKTPARTNER

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

GEFÖRDERT DURCH



Foto: Stephan Passon/PTB





Promotionen

Kerstin Ryll	86
Christian Sander	87
Jonas Wussow	88
Julia Seidel	89
Frank Soyck	90
Björn Osterkamp	91
Sönke Rogalla	92
Carola Schierding	93
Christoph Klosinski	94
Benjamin Kühn	95
Olga Pronobis	96
Stephan Passon	97



Batterietechnik

Kerstin Ryll

Kenngrößenbasierte Analyse der Eigenschaften von Lithium-Ionen-Batteriezellen entlang des Lebenszyklus



Der zunehmende Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien in den verschiedenen Anwendungen der Elektromobilität und der Energiespeicherung von erneuerbaren Energien stellt vielfältige Anforderungen an die Energie- und Leistungsdaten der Batterien. Zur Beurteilung, ob die Batterien in der Lage sind die gestellten Anforderungen zu erfüllen, sind umfassende Kenntnisse über die Zelleigenschaften notwendig. Mit Hilfe von Charakterisierungsmethoden, aus deren Messdaten Kenngrößen abgeleitet werden, werden Informationen gewonnen, die Rückschlüsse auf die Zelleigenschaften ermöglichen.

Die vorliegende Arbeit mit dem Titel „Kenngrößenbasierte Analyse der Eigenschaften von Lithium-Ionen Batteriezellen entlang des Lebenszyklus“ befasst sich in diesem Themenkomplex mit zwei Fragestellungen. Zum einen werden aus den verfügbaren Messdaten, die entlang des Lebenszyklus gewonnen werden können, Kenngrößen abgeleitet. Mittels Datenanaly-

se werden aus der Vielzahl möglicher Kenngrößen, diejenigen mit besonders hoher Aussagekraft identifiziert. Als Interpretationshilfe für die Kenngrößenausprägungen wird der Wissensstand über die Wirkzusammenhänge der identifizierten Kenngrößen mit den Zelleigenschaften in einem Erklärungsmodell zusammengefasst. Zum anderen werden diese sogenannten Indikatoren anhand von Testfällen validiert. Bei den Testfällen handelt es sich um Zellchargen, die mit gleichen und variierten Produktionsparametern gefertigt wurden. Die Chargen werden mit dem Ziel analysiert, ob und welche spezifischen Konstellationen sich in den Ausprägungen der Indikatoren ergeben, um daraus Interpretationshilfen für die Analyse der Zelleigenschaften aufzuzeigen.

Als Ergebnis der Analyse werden zwei Kenngrößenbereiche definiert, die sich auf die beiden Zelleigenschaften Zellspannung und Zellkapazität beziehen. Pro Bereich wird ein Kenngrößenaset festgelegt, welches sowohl spezifische Indikatoren für den Beginn des Lebenszyklus als auch Indikatoren für die State of Health Bestimmung beinhaltet. Für die Indikatoren mit Bezug zur Zellkapazität lässt sich für die Chargen eine verlässliche Beschreibung der Zelleigenschaft ableiten und eine Abgrenzung zwischen den Chargen vornehmen. Die Indikatoren, die dem Bereich Zellspannung zugeordnet sind, liefern weniger detaillierte und verlässliche Informationen, da die

Chargen in den verfügbaren Kenngrößen hohe Streuungen aufweisen.

Die Auswertungen dieser Arbeit basieren auf den Messdaten aus der Zellkonditionierung, der zyklischen Alterung und den regelmäßigen elektrischen Charakterisierungseinheiten von 137 Lithium-Ionen Zellen, welche in der Battery LabFactory Braunschweig im Rahmen des Projektes „DaLion – Data-Mining in der Produktion von Lithium-Ionen-Batteriezellen“ gefertigt wurden.

Kerstin Ryll

AM ELENIA IN DER ZEIT

07/2014 – 10/2020

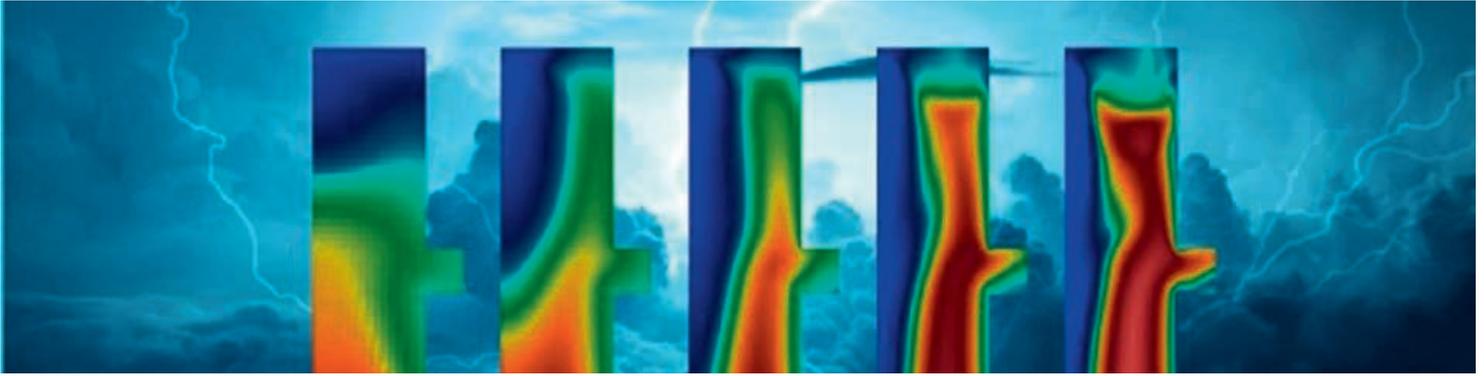


TÄTIGKEITEN AM ELENIA

- Mitarbeit im Schwerpunkt Elektromobilität und im Team Batterietechnik
- Bearbeitung der Forschungsprojekte Teach4U, Mobile4e, DaLion und BaSS
- Formierung und Charakterisierung von Zellen entlang des Lebenszyklus in der Battery LabFactory Braunschweig (BLB)

JETZT TÄTIG BEI

- Volkswagen AG in der Zellentwicklung als Ingenieurin



Hochspannungs- Plasma- und Vakuumtechnik

Christian Sander

Entwicklung eines Simulationsmodells für Schaltlichtbögen in Überspannungsableitern



Der Überspannungsschutzgeräte dienen dazu, die maximal auftretenden Spannungen in einem Stromkreis zu begrenzen. Überspannungen können durch Blitzeinschläge sowie Schalthandlungen entstehen. Für die energiereichsten Ereignisse werden Überspannungsableiter eingesetzt, die auf Funkenstrecken basieren. Während eines Impulsstroms wird ein Lichtbogenplasma zwischen den Elektroden der Funkenstrecke gezündet, das den Strom führt und somit den Schaltkreis schützt. Die dabei auftretenden hohen Temperaturen und Drücke stellen hohe Anforderungen an die mechanische und thermische Belastbarkeit des Ableiters. Aufgrund der kompakten Bauwei-

se gekapselter Funkenstrecken, der hohen Energiedichte und der Länge der Impulse gestaltet sich eine experimentelle Herangehensweise als schwierig, so dass häufig nur empirisch gearbeitet werden kann. Die Entwicklung von Simulationsmodellen bietet hier die Möglichkeit, detaillierte Erkenntnisse und ein besseres Verständnis über das Verhalten von Lichtbogenplasmen zu gewinnen. Diese Arbeit beschäftigt sich daher mit der Entwicklung eines solchen Simulationsmodells. Dabei werden die wesentlichen Aspekte des Modells beschrieben und untersucht. Ein besonderer Fokus liegt auf den Unterschieden, die sich hier durch die im Vergleich zu anderen Schaltlichtbögen signifikant höheren Energiedichten ergeben. Wesentliche Näherungen, die bei der Simulation thermischer Plasmen häufig genutzt werden, sind nur noch eingeschränkt gültig. Da es sich bei dem Simulationsprogramm um eine Neuentwicklung handelt, wird in einem großen Teil der Arbeit das Konvergenzverhalten des Modells untersucht. Die verwendeten Näherungsmethoden für die Berechnung des Magnetfelds und des Strahlungstransports wer-

den untersucht und bewertet, außerdem erfolgt eine Untersuchung der Wechselwirkung mit den Wänden, die das Lichtbogenplasma begrenzen. Schlussendlich wird ein Vergleich mit experimentellen Ergebnissen gezeigt, um die Genauigkeit des Modells zu bewerten. Es zeigt sich, dass das Modell grundsätzlich zur qualitativen Beschreibung des Systems geeignet ist, jedoch sagt es eine zu hohe Druckentwicklung im Ableiter voraus.

Christian Sander

TÄTIGKEITEN AM ELENIA

- externer Doktorand 2013 bis 2020

JETZT TÄTIG BEI

Seit 2012 Mitarbeiter bei Phoenix Contact in Blomberg

- Technologieentwicklung für Überspannungsschutzgeräte
- Plasmasimulation
- Elektronik
- Messverfahren
- Embedded-Firmwareentwicklung



Foto: Henrik Herr/TU Braunschweig

Netzbetrieb und Netzplanung

Jonas Wussow

Technische Lösungsansätze zur Erhöhung der Aufnahmekapazität von Niederspannungsnetzen für Elektrofahrzeuge



Die Elektromobilität ist ein wichtiger Ansatz zur Reduktion der CO₂-Emissionen im Verkehrssektor. Die steigende Anzahl an batterieelektrischen Fahrzeugen wird insbesondere bestehende vorstädtische Niederspannungsnetze vor große Herausforderungen hinsichtlich Spannungshaltung und Auslastungen stellen.

Die vorliegende Arbeit thematisiert den Einfluss von Ladevorgängen auf den Netzbetrieb und mögliche Lösungsansätze für die Kapazitätserhöhung von Vorstadtnetzen. Die Untersuchungen werden anhand von drei repräsentativen, vorstädtischen Niederspannungsnetzen und mithilfe eines realitätsnahen Modells für die Ladevorgänge durchgeführt. Die untersuchten Szenarien basieren hinsichtlich des Ladeverhaltens und des Energiebedarfs auf vorhandenen Statistiken. Zusätzlich ist ein Extrehtag definiert, der z. B. einen Sonntag mit vielen Ausflugsfahrten bei gutem Wetter darstellt und entsprechend höhere Energiebedarfe berücksichtigt.

Die Untersuchungen zeigen, dass insbesondere am definierten Extrehtag nur wenige Elektrofahrzeuge aufgrund von Überlagerungen der Ladevorgänge und abendlichen Ladespitzen in den bestehenden Netzen integriert werden können. Beim normalen Ladeverhalten sind hingegen tendenziell höhere Durchdringungsgrade möglich.

Um zusätzliche Elektrofahrzeuge bei einem weiterhin drei mögliche Lösungsansätze mit insgesamt 17 unterschiedlichen Maßnahmen vorgestellt und untersucht. Ein netzorientiertes Laden wird durch die Blindleistungsbereitstellung während des Ladevorgangs und eine spannungsabhängige Ladeleistungsreduktion erreicht. Die Funktionen von häuslichen PV-Speichersystemen werden erweitert. Diese umfassen die Blindleistungsbereitstellung zu jedem Zeitpunkt und zusätzlich das Laden des Speichers aus dem Netz an Tagen ohne PV-Erzeugung. Darüber hinaus werden netzseitige Maßnahmen, wie der regelbare Ortsnetztransformator, konventioneller Netzausbau und Speicher im Niederspannungsnetz, untersucht.

Mithilfe der erarbeiteten Lösungsansätze kann die Aufnahmekapazität von bestehenden vorstädtischen Niederspannungsnetzen für Elektrofahrzeuge grundsätzlich erhöht werden. Die Wirksamkeit der einzelnen Maßnahmen ist von der jeweiligen Netztopologie abhängig. Eine gute technische Wirksamkeit weisen die Ladeleistungsreduktion bei Elektrofahrzeugen, aus dem Netz geladene PV-Speichersysteme und bei Spannungsproblemen der Strangspeicher auf.

Bei einer Kosten-Wirksamkeits-Analyse stellen bei Spannungsproblemen die erweiterte Blindleistungsbereitstellung der PV-Speichersysteme und die Parallelschaltung die besten Alternativen dar. Beim Netz mit Auslastungsproblemen haben die spannungsabhängige Ladeleistungsreduktion abhängig von der gewählten Kennlinie und der Austausch des Ortsnetztransformators die geringsten Kosten-Wirksamkeits-Quotienten.

Jonas Wussow

AM ELENIA IN DER ZEIT

Seit 10/2013

TÄTIGKEITEN AM ELENIA

Forschungsprojekte

- InduktivLaden (2013–2016)
- NetProsum (2017–2020)
- LISA4CL (seit 2020)
- Dienstleistungsprojekte

Fachlicher Schwerpunkt: Netzintegration Elektromobilität

- Projektkoordinator des EFZN-Projektes SiNED (seit 2020)
- Leitung des Forschungsschwerpunkts „Elektromobilität“ (01/2019–12/2019)
- Arbeitsgruppenleiter Energiesysteme (seit 03/2021)
- Teamleiter Netzbetrieb und Netzplanung (seit 07/2020)





Netzdynamik und Systemstabilität

Julia Seidel

Technisch-wirtschaftliche Bewertung der Frequenzhaltung mit Photovoltaikanlagen



Die Energiewende in Deutschland führt nicht nur zu einem Ausbau erneuerbarer, insbesondere fluktuierender Erzeugungstechnologien, sondern auch zu einem sich verändernden Stromversorgungssystem. Auch bei einem zukünftig steigenden Anteil an Leistungselektronik und weniger Synchrongeneratoren muss die Systemstabilität gewährleistet sein. Als eine Maßnahme der Frequenzhaltung spielt die Regelleistung hierbei eine wichtige Rolle. Wird die Photovoltaik in die Bereitstellung von Regelleistung mit einbezogen, kann diese aus dem aktiven Kraftwerkspark erbracht und dadurch die konventionelle Mindesterzeugung reduziert werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wird gezeigt, welchen Beitrag die Photovoltaik zur Frequenzhaltung leisten kann. Die Bereitstellung negativer manual Frequency Restoration Reserve wird mittels verschiedener Nachweisverfahren bewertet. Hierbei steht die Nutzung einer Referenzteilanlage im

Fokus. Anhand von zwei Photovoltaikanlagen werden die Betriebsfahrt sowie statistische Untersuchungen zur Genauigkeit des Verfahrens durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Anforderungen der Präqualifikation für den Regelleistungsmarkt erfüllt werden.

Mit ihren hochdynamischen Eigenschaften können Photovoltaikwechselrichter jedoch auch schnellere Regelleistungserzeugnisse bereitstellen. Die Erbringung der Frequency Containment Reserve wird mit einem Photovoltaikwechselrichter im Labor nachgewiesen. Dabei wird außerdem gezeigt, dass Aktivierungszeiten von weniger als einer Sekunde für die Regelleistungserbringung eingehalten werden können. Mit dieser technischen Eigenschaft soll die Frequenz in einem zukünftigen, umrichterdominierten Netz mit weniger rotierenden Massen stabilisiert werden. Mittels einer Parameteranalyse wird ein neues Regelleistungserzeugnis mit einer Aktivierungszeit von einer Sekunde definiert, die fast Frequency Containment Reserve. Diese substituiert einen Teil der bestehenden Primärregelung und wird somit in Kombination mit der Frequency Containment Reserve eingesetzt. Der gemeinsame Einsatz beider Produkte führt selbst bei einer geringeren Netzanlaufzeitkonstante und einem niedrigeren Verbraucherselbstregelleffekt zu einem stabilen Frequenzverlauf. Ohne Gegenmaßnahmen wäre die Frequenzsta-

bilität in den betrachteten Szenarien nicht gegeben.

Die Implementierung der fast Frequency Containment Reserve erfordert stündliche Zeitscheiben und eine unsymmetrische Ausschreibung, um das Potential der Photovoltaiksysteme zu heben. Die wirtschaftliche Analyse mittels einer Opportunitätskostenrechnung ergibt, dass sich die Bereitstellung negativer Regelreserve für Anbieter mit Photovoltaiksystemen rentiert. Bei vermehrt auftretenden negativen Preisen am Spotmarkt oder bei einer Abregelung aufgrund von Überkapazitäten fluktuierender Erzeugung, kann sich auch die Bereitstellung positiver Regelleistung wirtschaftlich lohnen.

Julia Seidel

AM ELENIA IN DER ZEIT

04/2014 – 03/2020

TÄTIGKEITEN AM ELENIA

Fachlicher Schwerpunkt: Netzintegration Elektromobilität

- Bearbeitung der Forschungsprojekte PV-Regel und NEDS
- Arbeitsgruppenleiterin Energiesysteme

JETZT TÄTIG BEI

- Nordex Energy SE & Co. KG





Energiewirtschaft und Energiemanagement

Frank Soyck

Messverfahren und Messunsicherheitsbestimmung von Photovoltaik-Speichersystemen mit simultaner Mehrfachnutzung



Der Umbau des Energiesystems hin zu erneuerbaren Energieträgern schafft eine Reihe von neuen Herausforderungen. Batteriespeicher sind dabei eine Option zur Deckung des steigenden Flexibilitätsbedarfs. PV-Speichersysteme werden allerdings bei der reinen Eigenverbrauchsoptimierung nur zeit- und teilweise genutzt. Diese ungenutzten Anteile der Batteriespeichersysteme bieten ein großes Potential für weitere Anwendungen. Um dieses Potential heben zu können, ist für die Mehrfachnutzung von Batteriespeichersystemen eine geeignete Messung und Abrechnung notwendig.

Die zentrale Herausforderung bei der Messung und Abrechnung von Batteriespeichersystemen mit simultaner Mehrfachnutzung ist, dass die einzelnen Energiemengen nicht direkt messbar sind. Diese Dissertation beantwortet die Frage,

wie die verschiedenen Energiebezüge und -lieferungen bei simultaner Mehrfachnutzung von PV-Speichersystemen einzeln gezählt und abgerechnet werden können und welche Messunsicherheit dabei auftritt.

Das für die simultane Mehrfachnutzung entwickelte Messverfahren wird detailliert dargestellt und umfasst neben der Definition der Messgrößen die allgemeine Beschreibung des logischen Vorgehens der Messmethode und die Vorstellung der Komponenten des verwendeten Messsystems.

In detaillierten Labormessungen werden mit Hilfe von synthetischen und realen Testprofilen einerseits die Referenzwerte für die Bestimmung der Messunsicherheit ermittelt und andererseits die Schätzwerte und Verteilungsfunktion der Modellparameter für Messfunktion bestimmt.

Zur Bestimmung der Messunsicherheit werden durch Auswertung der Messfunktion zusammen mit der Variation der Parameter simulativ die Abweichungen zu den Referenzwerten bestimmt. Diese Abweichungen werden sowohl mit der Unsicherheit der Referenzwerte als auch mit der Messunsicherheit eines Messverfahrens ohne Modellbildung verglichen.

Durch das in dieser Dissertation vorgestellte Messverfahren kann durch Kom-

bination aus Modellierung und Leistungsmessung in Verbindung mit einer verursachergerechten Aufteilung der Abweichungen die Messunsicherheit im Vergleich zu den bisher bekannten Messverfahren ohne Modellbildung mehr als halbiert werden.

Frank Soyck

AM ELENIA IN DER ZEIT

Seit 01/2012

TÄTIGKEITEN AM ELENIA



Forschungsprojekte

- emil (2012–2016)
- PV-Speicherzähler (2014–2018)
- elenia-energy-labs (2015–2018) und MELANI (seit 2020)
- Dienstleistungsprojekte

Fachlicher Schwerpunkt: Energiemanagement

- Laborverantwortlicher elenia-energy-labs
- Forschungslinienkoordinator der EFZN-Forschungslinie Vernetzte Energiesysteme/Sektorenkopplung (seit 12/2017)
- Arbeitsgruppenleiter Energiesysteme (seit 2020)



Netzynamik und Systemstabilität

Björn Osterkamp

Frequenzhaltung mit Photovoltaikanlagen im Rahmen einer kritischen Infrastruktur



Die zur Begegnung der Klimaerwärmung angestrebte Energiewende im Stromsektor führt zur Abkehr von einer fossilen und hin zu einer regenerativ geprägten Stromerzeugung. Bereits heute kann ein wesentlicher Teil des Strombedarfs aus Windkraft und Photovoltaikanlagen erzeugt werden.

Die Zeiten, in denen konventionelle Großkraftwerke nur für die Systemstabilität am Netz verbleiben, nehmen daher zu. Zur Reduzierung dieser fossilen Must-Run-Units, ist die Beteiligung von erneuerbaren Energien an der Regelleistung essentiell. Insbesondere Photovoltaikanlagen spielen aufgrund ihrer hohen installierten Leistung eine große Rolle.

Im Rahmen dieser Arbeit wird gezeigt, dass Photovoltaikanlagen sicher und zuverlässig an der negativen manual Frequency

Restoration Reserve bzw. Minutenreserve teilnehmen können. Zentrale Elemente der Analysen sind der Nachweis der erbrachten Regelleistung und die damit verbundene Genauigkeit, die Möglichkeiten zur sicheren und kostengünstigen Anlagenvernetzung sowie die Bewertung der Wirtschaftlichkeit mithilfe von Photovoltaikanlagenpools.

Statistische Auswertungen von Photovoltaikanlagen in Labor- und Feldtests zeigen, dass die von den Übertragungsnetzbetreibern geforderten Genauigkeiten mit verschiedenen Nachweisverfahren eingehalten werden können. Zusätzlich wird gezeigt, dass mithilfe von Versuchen im Labor und synthetischen Einspeiseprofilen, Wechselrichter hinsichtlich ihrer Genauigkeit bei der Regelleistungsbereitstellung bewertet können. Dies stellt einen ersten Schritt in Richtung einer Labor-Präqualifizierung dar.

Die Anlagenvernetzung spielt bei der Teilnahme an der Regelleistung eine große Rolle. Zukünftig kommt das Smart-Meter-Gateway-System als Kommunikationseinrichtungen in Frage, um für die Anlagenanbindung eingesetzt zu werden. Insbesondere in Bezug auf Sicherheit, Laufzeit und Funktionsumfang sind die Systeme frühzeitig an die Anforderungen der Übertragungsnetzbetreiber anzupassen.

Die Erlössituation bei der Teilnahme von Photovoltaikanlagen an der Regelleistung ist stark abhängig vom jeweiligen Marktdesign, der Verfügbarkeit von kostengünstigen Kommunikationstechniken und den Preisen am Regelleistungsmarkt. Durch die zusätzliche Teilnahme mit großen Pools an Photovoltaikanlagen an der Regelleistung lassen sich im Mittel Mehrerlöse von bis zu 19 % generieren.

Björn Osterkamp

AM ELENIA IN DER ZEIT

11/2013 – 08/2019

TÄTIGKEITEN AM ELENIA

Fachlicher Schwerpunkt:

Frequenzhaltung

- Bearbeitung des Forschungsprojekts PV-Regel sowie einige Dienstleistungsprojekte
- Arbeitsgruppenleiter Energiesysteme

JETZT TÄTIG BEI

- Stromnetz Hamburg GmbH





Netzdynamik und Systemstabilität

Sönke Rogalla

Analyse frequenzabhängiger Netzwechselwirkungen von selbstgeführten Wechselrichtern mittels differentieller Impedanzspektroskopie und Oberschwingungsquellenbetrachtung



In der vorliegenden Arbeit wird ein neues Verfahren zur verbesserten Oberschwingungscharakterisierung von Wechselrichtern am Netz vorgestellt. Entgegen den etablierten Verfahren, die zu Grunde legen, dass sich ein Wechselrichter wie eine ideale Oberschwingungsstromquelle verhält, wird der Wechselrichter mit dem hier präsentierten Ansatz als frequenzabhängige Ersatzspannungsquelle mit Innenimpedanz (Thévenin-Äquivalent) interpretiert. Dies ermöglicht nicht nur die tatsächlichen Oberschwingungsemissionen eines Wechselrichters zu identifizieren, sondern auch Wechselwirkungen zwischen Wechselrichtern und dem vorgelagerten Netz, wie z. B. Resonanzausbildungen, zu analysieren.

Die Ermittlung der charakteristischen Thévenin-Äquivalente erfolgt dabei mittels der sog. differentiellen Impedanzspektroskopie, die in dieser Arbeit ausführlich beschrieben wird. Die differentielle Impedanzspektroskopie erlaubt neben der Bestimmung der wirksamen Ausgangsimpedanz auch die Bestimmung von inneren Oberschwingungsquellen eines Wechselrichters. Es steht damit ein Charakterisierungsverfahren zur Verfügung, mit dem zwischen Oberschwingungen, die vom Wechselrichter emittiert werden, und Oberschwingungen, die als Reaktion auf vorhandene Netzspannungsverzerrungen entstehen, unterschieden werden kann. Ferner lassen sich mit der ermittelten Wechselrichterimpedanz Resonanzeffekte – z. B. durch Anwendung des sog. impedanzbasierten Stabilitätskriteriums – beschreiben sowie Maßnahmen zur Vermeidung von Resonanzen untersuchen.

Zur Erprobung des Verfahrens wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein Prüfstand zur Durchführung von Impedanzspektroskopie-Messungen an Wechselrichtern bis zu einer Leistung von einem Megawatt aufgebaut und exemplarische

Untersuchungen an verschiedenen Prüflingen durchgeführt. Durch gezielte Versuchsreihen und begleitende Simulationen wurden wesentliche überschwingungsrelevante Effekte eines Wechselrichters, wie Nichtlinearitäten der Filterbauteile oder der Totzeiteffekt der Wechselrichterbrücke, untersucht und deren Auswirkung auf die Ergebnisse der Thévenin-Modellbestimmung analysiert. Dies führt zu einem besseren Verständnis der physikalischen Ursachen, die für die Ausbildung der messbaren Oberschwingungen verantwortlich sind. Ferner wurde der Einfluss von Regelparametern auf den Verlauf der Ausgangsimpedanz exemplarisch für einen Wechselrichterprüfling untersucht, womit sich die Wirksamkeit von Software-Änderungen als Abhilfemaßnahme bei auftretenden Resonanzen ableiten lässt.

Sönke Rogalla

JETZT TÄTIG BEI

- Fraunhofer – Institut für Solare Energiesysteme ISE





Hochspannungs- Plasma- und Vakuumtechnik

Carola Schierding

Eignung von Feldmühlen als rückführbares Messmittel im elektrostatischen Feld



Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Feststellung der Eignung von Feldmühlen als rückführbares Messmittel im elektrostatischen Feld. Bisherige Herstellerangaben zur Messunsicherheit von Feldmühlen basieren auf einer idealisierten Prüfkongfiguration, fester Messabstand und homogene Feldverteilung, welche die praktische Anwendung der Feldmühlenmessungen nicht widerspiegelt.

Zu Beginn der Arbeit wird ein Überblick über das Messverfahren und die Eigenschaften von verschiedenen Feldmühlentypen gegeben. Unter Einbeziehung von Arbeiten anderer Autoren und weiterer Literatur wird der aktuelle Wissensstand in Bezug auf den Erfassungsbereich von Feldmühlen, die Messung inhomogener Felder und die Kalibrierung wiedergegeben.

Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen wird ein modularer Messaufbau entwickelt. Dieser ermöglicht es, die

potentiellen Einflussfaktoren klimatische Umgebungsbedingungen, Abstandsabhängigkeit und Messobjektgröße sowie Messobjektgeometrien auf das Messverfahren der Feldmühle zu betrachten.

Anschließend wird die Wirkungsweise von Feldmühlen in elektrostatischen Feldern durch simulative Betrachtungen erörtert. Anhand dieser Erkenntnisse kann der Erfassungsbereich der Feldmühle mittels eines Messkegelstumpfs in Abhängigkeit des charakterisierenden Messwinkels ermittelt werden. Für die messtechnische Bestimmung des Messwinkels, erfolgt die Entwicklung einer Methode und die Erweiterung des Messaufbaus.

Zusätzlich können hieraus Bedingungen für optimale Anwendungsbereiche und Grenzen der Feldmühlenmessung abgeleitet werden. Diese Bedingungen bestehen aus dem optimalen Messabstandsbereich und der Verkippung der Feldmühle zum Messobjekt und werden durch Anpassungen am Messaufbau untersucht und bestimmt. Zur Berücksichtigung der indirekten Beeinflussung des Feldes durch die Feldmühle und der Messobjekte wird die Korrektur von inhomogenen elektrostatischen Feldern betrachtet. Hierfür werden Methoden zur Bildung von Korrekturfaktoren der Inhomogenitäten durch die Feldmühle und der Messobjekte erläutert und angewendet.

Auf Grundlage der Erkenntnisse, erfolgt eine Messunsicherheitsbetrachtung mit einer konsistenten Methode zur Bewertung und Angabe der Messunsicherheit nach GUM. Abschließend werden die Ergebnisse der Messunsicherheitsbetrachtung für ideale und reale Anwendungsfälle dargestellt, wodurch es ermöglicht wird, die Feldmühle als rückführbares Messmittel einzusetzen.

Carola Schierding

AM ELENIA IN DER ZEIT

02/2015 – 01/2017

01/2017 – 01/2021

(extern)



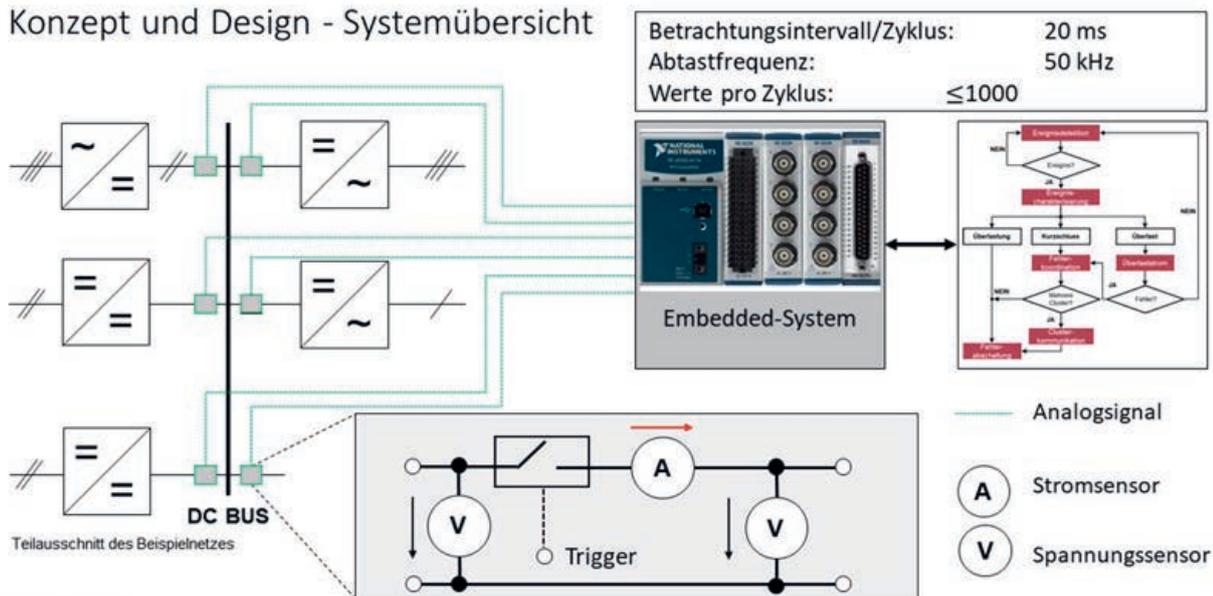
TÄTIGKEITEN AM ELENIA

- Mitarbeit im Schwerpunkt Komponenten der Energieversorgung
- Forschungs- und Projektarbeit im Bereich Hochspannungsmesstechnik, Dielektrische Materialprüfungen, Grenzflächenuntersuchungen, Messungen von Teilentladungen
- Mitglied im PMO

JETZT TÄTIG BEI

- Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Braunschweig)

Konzept und Design - Systemübersicht



DC Systeme und Schaltgeräte

Christoph Klosinski

Protection system design for low voltage direct current networks

Gleichstromnetze werden eine wichtige Säule für die zukünftige Energieversorgung und -verteilung darstellen. Schon seit Jahren stellt Hochspannungs-Gleichstromübertragung einen wichtigen Stellenwert in der Energieverteilung dar, da im Vergleich zu Wechselstrom die Energie über mehrere hundert Kilometer Strecke effektiver übertragen werden kann. Im Niederspannungsbereich entfällt dieser Vorteil, da bis 1500 V DC üblicherweise keine Übertragung nennenswerter Energien stattfindet. In diesem Fall spielen andere Faktoren, wie z. B. die steigende Anzahl der Gleichstrom-Verbraucher, Gleichstrom-Erzeuger und dynamischere Netzregelung, eine übergeordnete Rolle. Stehen dem Energiemarkt zukünftig mehr und mehr ausgereifte Komponenten zur Verfügung, steht dem flächendeckenden Einsatz von Gleichstromnetzen im Niederspannungsbereich aus technischer Sicht nichts mehr im Wege. Für zukünftige Gleichstromnetze fehlen jedoch ausreichend entwickelte Schutzsysteme, welche einen effektiven und selektiven Schutz gewährleisten müssen. Parallel hierzu stellt die Digitalisierung der Industrielandschaft (Industrie 4.0) sowie die Vernetzung von physischen und virtuellen Gegenständen (Internet of Things) ein großes Potenzial für die Etablierung von neuartigen

Schutztechnologien dar. Diese sollen die relevanten Herausforderungen z. B. der mehrfachen Einspeisung, des hohen Vermaschungsgrads, des volatilen Verbrauchs und der Netzeinspeisung beinhalten. Aus diesen Gründen wird in dieser Arbeit ein Schutzsystem entwickelt, das diese hohen Anforderungen mithilfe von Messtechnik, Algorithmen und einem Mikroprozessor erfüllt. Zur Bestimmung von Gleichspannungs-Schutzkriterien werden Prüfungen mit verschiedenen Laständerungen innerhalb eines 1 kV Modellnetzes durchgeführt. Diese Kriterien werden für die Entwicklung eines neuartigen Schutzkonzepts unter Verwendung von Ereignisdetections-, Charakterisierungs-, Lokalisierungs- und selektiven Abschaltalgorithmen verwendet. Diese nutzen im Falle eines Lastwechsels die Ausgleichsvorgänge innerhalb Netzes, um durch die Abtastung und Verarbeitung von Strom- und Spannungssignalen von Sensor-bestückten Schaltgeräten, welche an definierten Stellen innerhalb der Netze installiert werden, zu analysieren. Darüber hinaus besteht das Schutzsystem aus einer Schutzeinheit, die den Netzzustand in Echtzeit bewertet und im Falle eines Ausgleichsvorgangs auf Grundlage der verarbeiteten Daten eine Entscheidung trifft, um die beste Versorgungssicherheit zu gewährleisten.

Die Zuverlässigkeit, Geschwindigkeit und Selektivität des Schutzsystems wird in verschiedenen Topologien validiert. In allen Fällen wurden die getesteten Überlast- und Kurzschlussfälle zuverlässig erkannt und wenn nötig abgeschaltet. So führten beispielsweise transiente Überlastfälle zu keiner Abschaltung durch das Schutzsystem. Somit stellt das Schutzsystem ein flexibles, erweiterbares und wirksames Mittel für den Schutz von Gleichstromnetzen dar.

Christoph Klosinski



AM ELENIA IN DER ZEIT

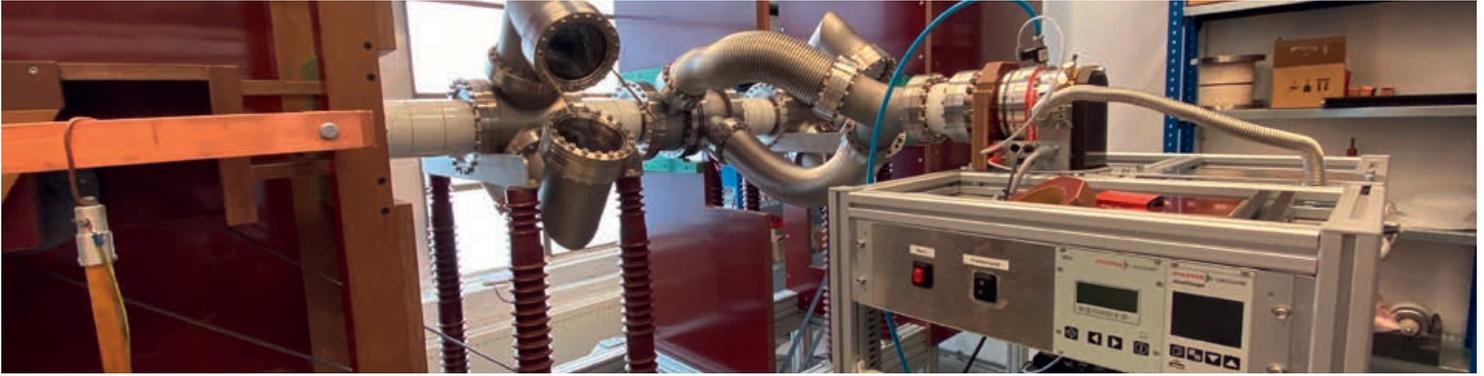
01/2014 – 12/2019

TÄTIGKEITEN AM ELENIA

- Forschungsgruppenleiter DC-Systeme
- Untersuchung und Entwicklung von DC-Schutzsystemen im Rahmen von SMS-I & II
- Untersuchung von Schaltkammermaterialien

JETZT TÄTIG BEI

- Phoenix Contact GmbH & Co. KG



Hochspannungs- Plasma- und Vakuumtechnik

Benjamin Kühn

Vakuumschalter — Design of a vacuum interrupter test system and investigation of long gap arcs



In dieser Arbeit wird eine höhere Abstraktionsebene auf Basis des „Requirements Engineering“ gewählt, um die Anforderungen an empirische Testplattformen zu approximieren. Die gewünschte Funktionalität wird in verschiedene Funktionen und Unterfunktionen analysiert. Dieses Lastenheft wird mit geeigneten Methoden, offen für beliebige physikalische Lösungen, in eine neue Testplattform überführt und schrittweise in Betrieb genommen. Dies ermöglicht partiell die gewünschte Funktionalität des Test-Vakuumschalters zu validieren. Ein Highlight stellt die Antriebseinheit des Test-Vakuumschalters dar, welche aus der Kombination eines kommerziellen Servo-Motors und einem Riementrieb besteht. Sowohl während der partiellen Inbetriebnahme, als auch während den orientierenden Untersuchungen wird das Potential des neuen Antriebsmechanismus deutlich.

Die Untersuchungen mit 15 mm finalem Hub dienen dazu, eine Vergleichbar-

keit mit Ergebnissen anderer Forscher zu zeigen. Die Untersuchungen mit 30 mm finalem Hub stellen eine Parametervariation dar, welche mit TMF-Elektroden bisher nicht publiziert ist. Als zusätzliche Parametervariation wird während der Untersuchungen die Polarität der beweglichen Elektrode gewechselt. Ein Vergleich zwischen den verschiedenen Kontaktstücken (Pin- und TMF-Elektroden) zeigt einige Gemeinsamkeiten. Die einfache Pin-Elektrode zeigt für 15 mm finale Hübe eine durchgehend eingeschnürte Plasmasäule für Kurzschlussströme mit einem Peak von 7 kA. Ein zunehmender finaler Hub von 30 mm resultiert in einer optisch geteilten Plasmasäule. Dieses Verhalten ist auch bei TMF-Elektroden mit einem geringfügig höheren Peak-Strom von 12 kA und den gleichen finalen Hüben erkennbar. Bei Pin-Elektroden wird zusätzlich ein Einfluss zwischen der Polarität der bewegten Elektrode und der Anodenaktivität erkannt.

Zusammenfassend stellt diese Arbeit einen Leitfaden für den Aufbau empirischer Testplattformen dar. Es wird dargestellt, dass strukturierte Designansätze im Kontext des Systems Engineering den Endoutput und die Qualität der erzeugten Daten steigern. Die orientierenden Untersuchungen liefern Beschreibungen Vakuumplasmasäulen bei finalen Hüben bis zu 30 mm. Die Wahl von Pin- und TMF-Elektroden, bei ansonsten gleich eingestellten

Parametern, zeigt eine Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Kontaktsysteme. Weiterhin wird eine Wechselwirkung zwischen bewegter Elektrode und Anodenaktivität für Pin-Elektroden aufgezeigt. Der Ansatz eines Servoantriebes in Kombination mit einem Riementrieb zeigt eine generelle Eignung dieser Technologie als Leistungsschalterantrieb. Die Möglichkeit, variable Öffnungstrajektorien durchzuführen, stellt einen großen Vorteil für die Wissenschaft dar, weil hierdurch die Anzahl möglicher Parameter Variationen exorbitant erhöht wird.

Benjamin Kühn

AM ELENIA IN DER ZEIT

2014–2020

TÄTIGKEITEN AM ELENIA

- Mitarbeit im Schwerpunkt Komponenten der Energieversorgung
- Ausschaltuntersuchungen von Doppelunterbrechungen im Vakuum mit zusätzlicher Potentialsteuerung in Kooperation mit ABB
- Mitglied im PMO

JETZT TÄTIG BEI

- Avacon Netz GmbH





Olga Pronobis

Lademanagementkonzepte mit eingebundenem Anforderungsmanagement bei nicht planbarem Verhalten von Elektrofahrzeugflotten



Um die Auswirkungen des Klimawandels zu begrenzen, müssen die ausgestoßenen CO₂-Emissionen reduziert werden. Der Bundestag setzt das Ziel den Emissionsausstoß in Deutschland bis zum Jahr 2030 auf 45 % (im Vergleich zum Jahr 1990) zu limitieren. Damit dieses Ziel erreicht werden kann, müssen die primären Emittenten, der Verkehrs- und der Energiesektor, ihre Emissionen reduzieren. Eine solche Reduktion ist nur möglich, wenn beide Sektoren sich ergänzen. Wichtig ist, dass der Einsatz von fossilen Energieträgern für den Antrieb von Fahrzeugen weitestgehend gemindert wird. Ersatz bieten Elektrofahrzeuge mit Energie aus regenerativen Energieanlagen.

In der vorliegenden Arbeit werden Lademanagementkonzepte definiert. Diese Konzepte ermöglichen in ihren Komplexitätsgraden eine Implementierung in jedem Elektrofahrzeugflottenszenario. Durch die Umsetzung können je nach Konzept Kos-

ten und CO₂-Emissionen mit der Einstellung der Lademanagementanforderung eingespart werden. Um die Lademanagementkonzepte zu analysieren, wird ein Lademanagementmodell entwickelt, welches eine Simulation dieser ermöglicht. Die Simulationsszenarien werden anhand von einer Elektrofahrzeugflotte erstellt, dessen Fahr- und Standzeiten sehr variabel und somit nicht planbar sind. Zudem muss die Flotte eine hohe Verfügbarkeit aufweisen. Aus den Simulationsergebnissen wird eine Bewertungsmatrix der Lademanagementkonzepte sowie Handlungsempfehlungen zur Umsetzung abgeleitet.

Resultierend ergibt sich aus den untersuchten Szenarien, dass bereits bei der Umsetzung eines statischen Lademanagements (Lademanagementkonzept 1) die notwendige Netzanschlussleistung um 54,42 % reduziert werden kann. Innerhalb der folgenden Lademanagementkonzepte erhöht sich die Reduktion auf bis zu 77,48 %. Diese Senkung der Netzanschlussleistung mindert die Kosten für den Netzausbau. Innerhalb des Lademanagementkonzepts 2 können ca. 10 % der CO₂-Emissionen vermieden werden. In den Lademanagementkonzepten 3 und 4 erfolgt eine Reduktion von 7 %. Eine hohe Verfügbarkeit der Flottenfahrzeuge und somit eine hohe Sicherheit ist in allen Lademanagementkonzepten gegeben.

Eine wesentliche Erkenntnis ist, dass aus ökologischer und ökonomischer Sicht der Einsatz eines Lademanagements in jedem Flottenszenario sinnvoll ist. Anhand der Handlungsempfehlungen kann ein passendes Lademanagementkonzept für jeden Anwendungsfall abgeleitet werden. Für die Umsetzung stehen den Flottenbetreibern das Lademanagementmodell sowie die Lademanagementkonzepte frei zur Verfügung.

Olga Pronobis

AM ELENA IN DER ZEIT

04/2017 – 03/2021



TÄTIGKEITEN AM ELENA

- Fachlicher Schwerpunkt: Ladeinfrastruktur/ Lademanagement
- Bearbeitung des Forschungsprojektes lautlos&einsatzbereit
- Arbeitsgruppenleiterin Energietechnologien
- Schwerpunktleitung Elektromobilität

JETZT TÄTIG BEI

- Intelligent Energy System Services GmbH



Foto: Stephan Passon / PTB

Hochspannungs- Plasma- und Vakuumtechnik

Stephan Passon

Metrologische Infrastruktur für die Messung von überlagerten Impulsspannungen in HGÜ Systemen



Seit den dramatischen Ereignissen von Fukushima und der darauf folgenden Atomkatastrophe investiert die deutsche Regierung in die Erzeugung erneuerbarer Energien und die geplante Abschaltung aller Kernkraftwerke. Diese Abschaltung muss durch das europäische Stromnetz sowie durch alle Anlagen zur Erzeugung erneuerbarer Energien kompensiert werden. Nur die Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) ist in der Lage, den Transport von elektrischer Energie über große Entfernungen mit geringeren Verlusten zu ermöglichen. Beim Einsatz der HGÜ-Technologie

müssen alle entscheidenden Aspekte der Energieversorgungssicherheit bekannt sein und berücksichtigt werden. Die Arbeit dieser Dissertation konzentriert sich auf diesen Bereich des HGÜ-Energietransports.

Um eine überlagerte Messmöglichkeit an der PTB zu schaffen, wird zunächst die reine Impulsseite des Erzeugungskreises ausgewertet. Dies geschieht bei niedrigen Spannungen, zunächst mit entsprechenden Kalibratoren und Dämpfungsgliedern. Anschließend werden mit dieser Ausrüstung die Hochspannungsmessungen zur Validierung dieser Niederspannungsergebnisse durchgeführt.

In einem zweiten Schritt wird die Fähigkeit zur Messung der HGÜ-Spannung optimiert, wobei ebenfalls mit niedrigen Spannungen im Bereich von 10 V begonnen wird. Mit diesen Ergebnissen werden alle Skalenfaktoren durch Linearitätsmessungen auf Hochspannungen bis zu 1000 kV extrapoliert.

Schließlich werden die überlagerten Spannungen durch Kombination der Im-

puls- und HVDC-Erkenntnisse erzeugt und gemessen. Der überlagerte Teiler einschließlich der Koppellemente wird mit verschiedenen Messverfahren untersucht. Als Ergebnis wird die Hochspannungsmessanordnung durch die Unsicherheitsabschätzung des Gesamtsystems bewertet.

Stephan Passon

AM ELENIA IN DER ZEIT

2015 – 07/2021

TÄTIGKEITEN AM ELENIA

- Fachlicher Schwerpunkt: Hochspannungs-Metrologie
- Bearbeitung der Forschungsprojekte UPS, SMS2, AutoHybridS, FASS

JETZT TÄTIG BEI

- PTB







Labore und Werkstätten

Batterietest-Labore	100
Blitzschutzlabor	103
DC-Demonstrationsnetzlabor	106
Gleichstromprüffelder	109
Hochspannungshalle	112
Isolierstofflabor	115
Kooperationslabor	118
Synthetisches Leistungsprüffeld	121
Energiemanagementlabor	124
Netzdynamiklabor	127
Mechanische Werkstatt	132
Elektrotechnische Werkstatt	134
IT-Abteilung	136

Batterietest-Labore

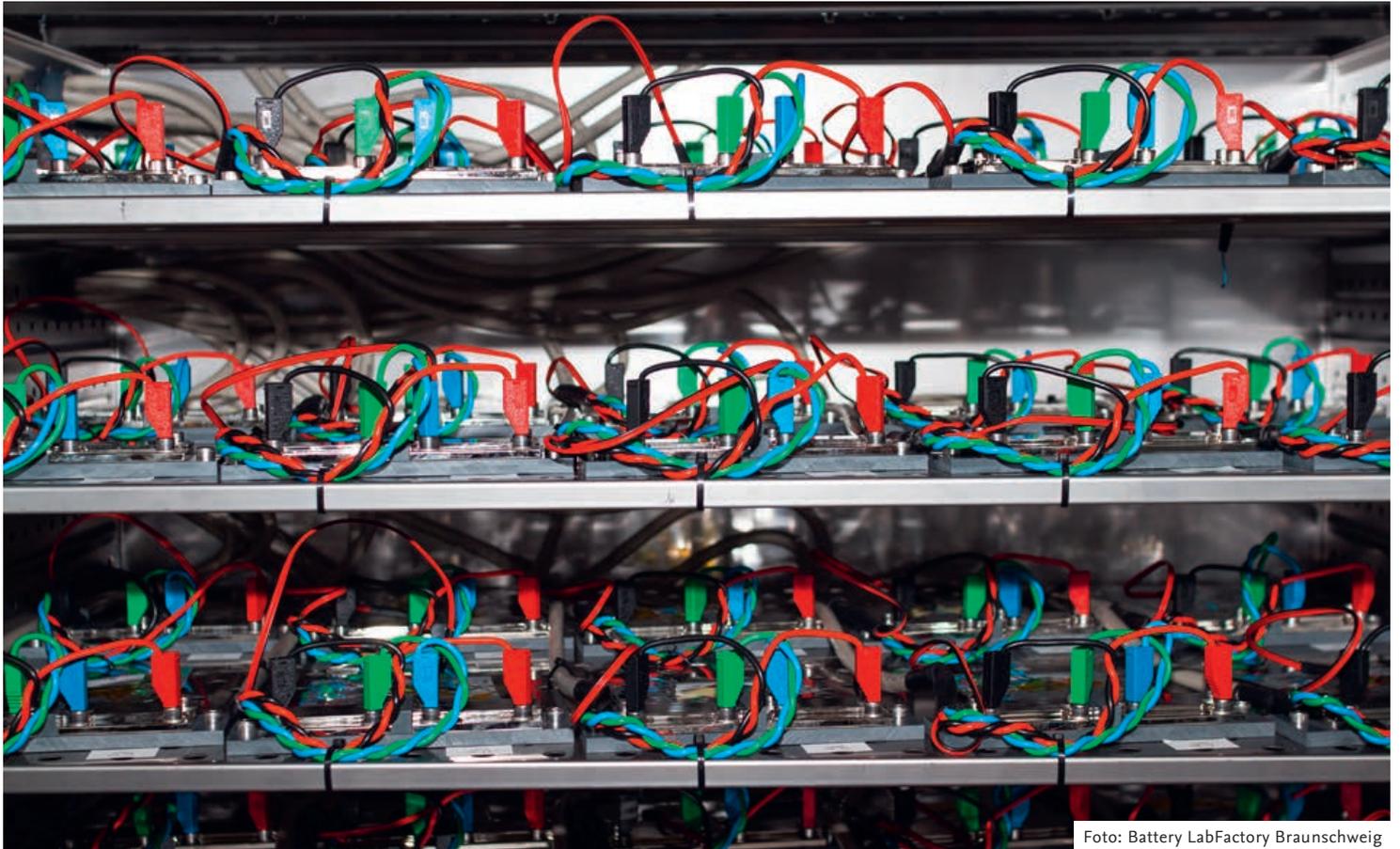


Foto: Battery LabFactory Braunschweig

KONTAKT

Robin Drees

✉ r.drees@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391-9730

Fabian Katschewitz

✉ f.katschewitz@tu-bs.de

☎ +49 531 391-9723

AUFGABEN UND LEISTUNGEN

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

Batterietest-Labore am elenia

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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



Foto: Kerstin Ryll/TU Braunschweig



Zelltester XCTS Serie der Fa. BaSyTeC

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

Zell- und Modultester der Fa. Digatron

- 6 Kanäle ± 100 A, 0-6 V

Systemtester der Fa. Greenlight

- 1 Kanal ± 600 A, 5-200 V

Impedanzspektroskopie der Fa. Ametek und der Fa. Gamry Instruments

- 2 Kanäle ± 20 A, 0-10 V, 10 µHz – 1 MHz
- 24-fach Multiplexer ± 3 A, 0-32 V, 10 µHz – 1 MHz



3-Elektroden-Zelltester der Fa. EL-Cell

- Testsystem für Drei-Elektroden-Messzellen
- 32 Kanäle ± 0,1 A, 0-6 V, EIS
- 8 Dockingstationen für andere Zelltester
- -40 °C bis 180 °C und -20 °C bis 80 °C
- S* inkl. Schranklöschung, Abluft und Havariefilter



Foto: EL-Cell GmbH



Temperaturprüfschränke der Fa. Binder

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

Temperaturprüfschränke der Fa. Weiss und Vötsch

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



Foto: Battery LabFactory Braunschweig



Glovebox der Fa. M. Braun

- 0,8 m³ Boxvolumen
- Schleusenofen bis 120 °C



Foto: M.Braun GmbH



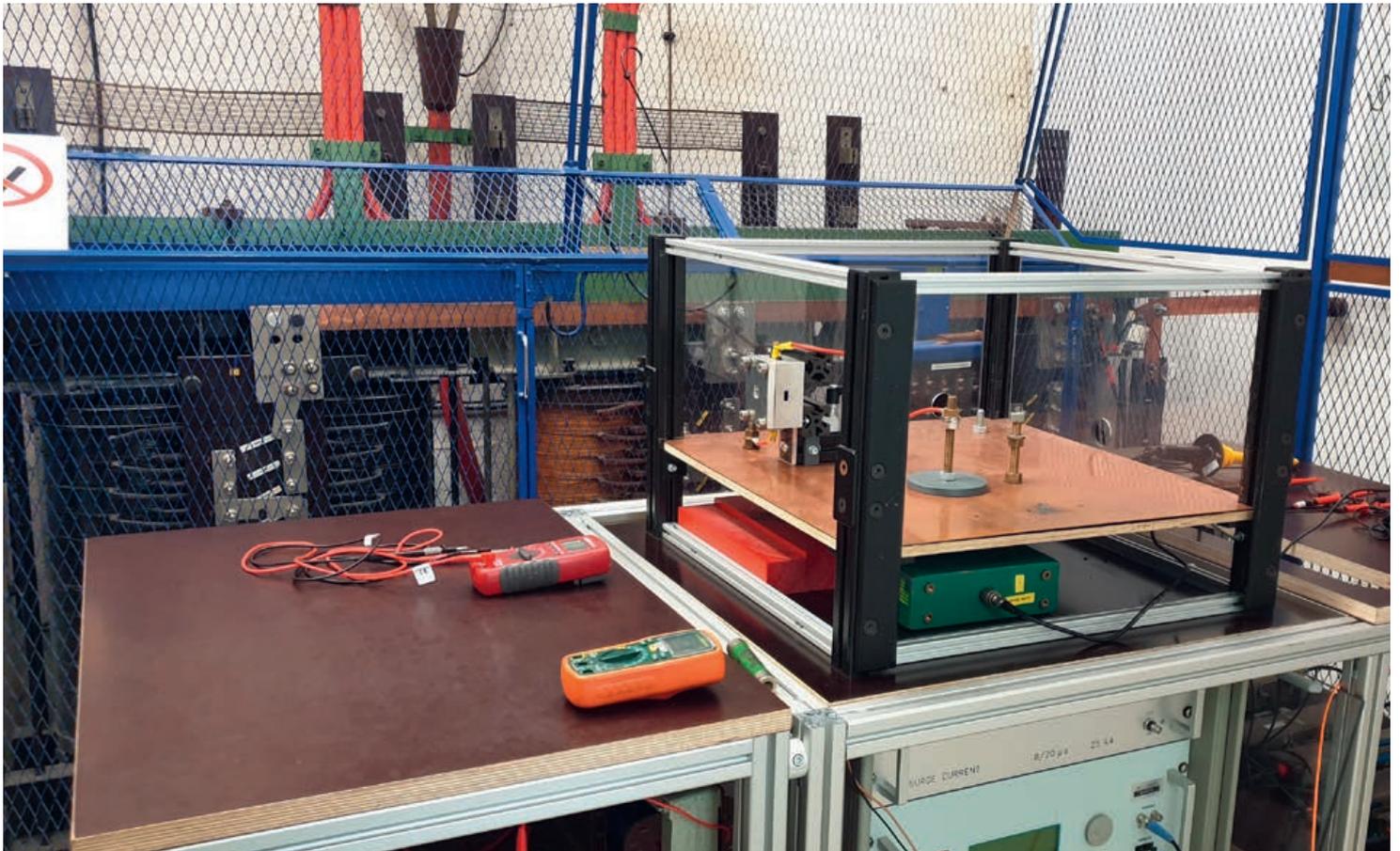
Keyence Digitalmikroskop VHX7000

- 20x – 2500x Vergrößerung 3D-Messsoftware



Foto: M.Braun GmbH

Blitzschutzlabor



KONTAKT

Enno Peters

☎ +49 531 391-7701
📠 +49 531 391-8106
✉ e.peters@tu-braunschweig.de

Tobias Kopp

☎ +49 531 391-7703
📠 +49 531 391-8106
✉ t.kopp@tu-braunschweig.de

AUFGABEN UND LEISTUNGEN

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

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 Schaltheandlungen 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.

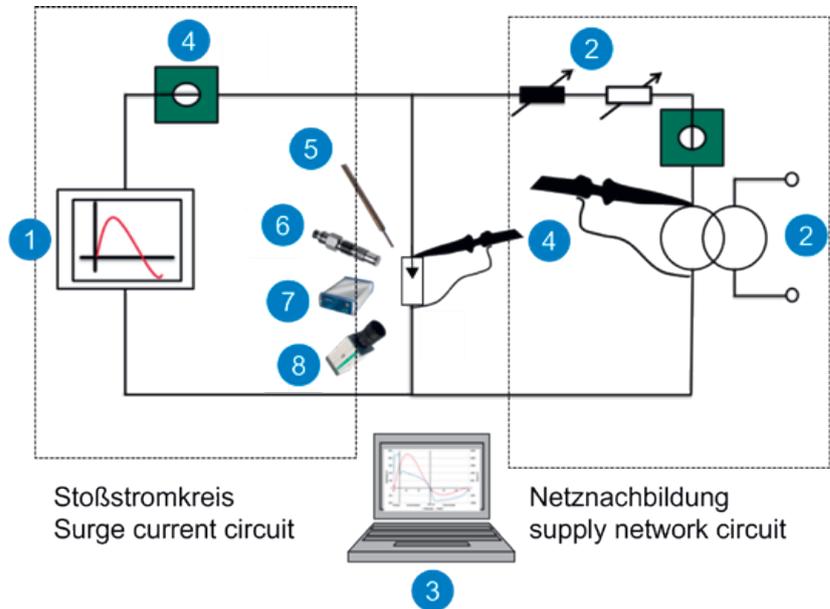
Der Stoßstrom wird mit Hilfe eines Stoßstromgenerators erzeugt (1). Es können $8/20 \mu\text{s}$ Impulse mit bis zu 25 kA aber auch $10/350 \mu\text{s}$ Impulse mit bis zu 600 A erzeugt werden. Die Netzeinspeisung ist realisiert über drei parallel geschalteten 130 kVA Transformatoren (2). Zur Einstellung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

Das aktuelle Ziel der Forschung ist es, den Übergang vom hochleitfähigen Plasma hin zum isolierenden Zustand nach der Stoßstrombelastung zu untersuchen. Mithilfe der in Abbildung 1 beschriebenen Messtechnik finden diese experimentellen Untersuchungen statt. In der letzten Zeit ist das Labor hinsichtlich der Kabelführung komplett erneuert worden. Insbesondere bei sehr hohen Stoßströmen kommt es zu EMV-Störungen der Prüflinge oder Messtechnik. Koppelpfade wurden hier weitestgehend minimiert. Auch sind die Prüfaufbauten nun modular erweiterbar, sodass die Prüfanordnung jederzeit verändert werden kann. Parallel zu elektrischen Messungen werden optische Untersuchungen durchgeführt. Für diese Untersuchungen sind neue Präzisionshalterungen im Labor installiert worden, welche die optische Ausrichtung der Messtechnik auf die Brennkammer der Modell-Funkenstrecken ermöglichen. Die Forschung ermöglicht es die Funkenstreckenableiter zu modellieren und damit eine zielgerichtete Entwicklung des Überspannungsschutzes zu gewährleisten. Mithilfe von elektro-thermisch parametrisierten Batteriemodellen kann der Einsatz der getesteten Batteriezellen für verschiedene Einsatzgebiete und Anwendungen überprüft werden.



Übersicht des Versuchsfeldes zur Bestimmung der Plasmavorgänge

- 1: Stoßstromgenerator EMC 2004
- 2: Niederspannungsnetz bis 750 VAC mit einstellbarer Netzimpedanz
- 3: BitGate System
- 4: Spannungs- und Strommessung
- 5: Leitfähigkeit über Potentialsonden
- 6: Druckmessung
- 7: Spektroskopie
- 8: Hochgeschwindigkeits-Kamera



Stoßstromgenerator EMC 2004

Stoßstromgenerator zur Erzeugung von Blitzteilströmen

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



BitGate System AD 3000 mit Messsatelliten

Hochauflösendes Messsystem zur simultanen Aufnahme der elektrischen Größen

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



Hochgeschwindigkeits-Kamera Nova S6

Hochgeschwindigkeitskamera zur Analyse der Plasmaverteilung mit Präzisionshalterung

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



DC-Demonstrationsnetzlabor



KONTAKT

Lars Claaßen

✉ l.claassen@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391-9715

Frederik Anspach

✉ f.anspach@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391-9736

Patrick Vieth

✉ p.vieth@tu-braunschweig.de

☎ +49531 391-9725

AUFGABEN UND LEISTUNGEN

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

GEFÖRDERT DURCH



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

DC-Demonstrationsnetzlabor

Untersuchung eines spannungsebenen-übergreifenden Gleichspannungsnetzes mit variabler Quell- und Lastcharakteristik

Einführung

Die voranschreitende Energiewende in Deutschland sowie technische Fortschritte in der Leistungselektronik führen dazu, dass DC-Technologie immer mehr an Bedeutung sowohl im industriellen Bereich als auch in der Energieübertragung und Mobilität gewinnt. Diese bietet ein weites Spektrum an Anwendungsvorteilen (Effizienz, Materialeinsparung, etc.) aber bringt auch Herausforderungen und Fragestellungen mit sich, welche es zu beantworten gilt, um eine sichere Nutzung zu gewährleisten.

Das DC-Demonstrationsnetzlabor ermöglicht die Untersuchung einer großen Bandbreite von Netztopologien durch einen flexiblen, schnell anpassbaren Aufbau und ein großes Spektrum verschiedener Quell- und Lasttypen.

Zwei Spannungsebenen (0–380 V und 1 kV) sind bereits im Einsatz und bis Mitte

2022 wird der Aufbau um eine 3 kV Spannungsebene erweitert.

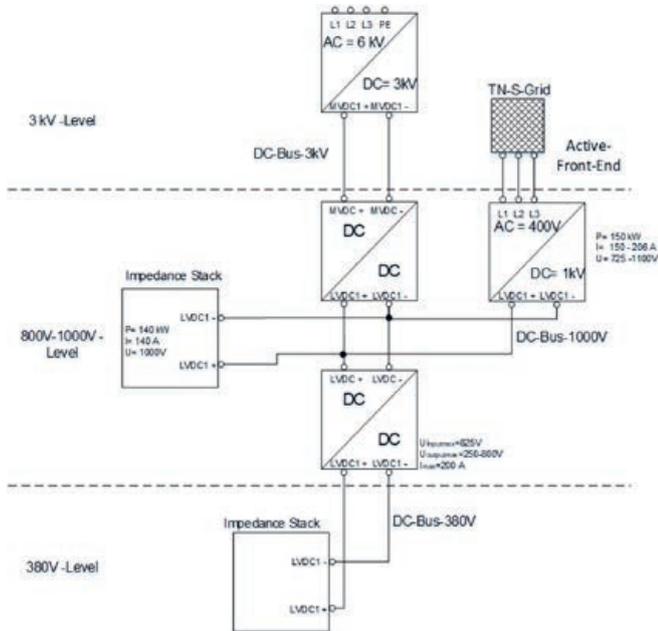
Aufbau, Komponenten und Untersuchungsgegenstand

Das Demonstrationsnetzlabor bietet ein breites Prüfspektrum zur Untersuchung von DC-Netztopologien. Die Leistungsdaten, der geplante Gesamtaufbau inklusive aller Spannungsebenen und die detaillierte Beschreibung der Laborkomponenten sind der Tabelle auf der nächsten Seite zu entnehmen. Derzeit wird im Demonstrationsnetzlabor an der allgemeinen Netzcharakterisierung und Modellbildung für DC-Netze gearbeitet. Ein möglichst großer Versuchsraum wird durch eine große Bandbreite variabler Lastimpedanzen und aktiver Quell- und Lastkomponenten erreicht. Außerdem wird ein DC-Schutzsystem entwickelt und in verschiedenen Fehlerszenarien untersucht. Neben Strom und Spannung können

auch die Zeitkonstante, Netztopologie und interne Regelung ausgewählter Quellen und Lasten angepasst werden. Ein weiterer Vorteil liegt in der einfachen Integrierbarkeit weitere Betriebsmittel in den bestehenden Aufbau. Die durchgeführten Messungen werden durch modernste Messtechnik aufgezeichnet. Die Netzzustände bei dynamischen Laständerungen sowie Schaltvorgängen und die Reaktion des Schutzsystems sind somit präzise analysierbar.

Ausblick

Die bestehenden Spannungsebenen werden in Zukunft durch eine weitere Spannungsebene ergänzt (3 kV). Das Spektrum der nachbildbaren Anwendungsfälle wird dadurch noch einmal erweitert. Das Prüffeld in seiner Bauform als Spannungsebenen-übergreifender Realaufbau ist eine Alleinstellungsmerkmal am elenia.



Netzstruktur

- Anschluss des Prüffeldes direkt an das 6 kV-Verteilnetz der Uni
- Transformator: 220 kVA, 6 kV/2*780 V
- Hinter Transformatoren befindet sich eine AFE, welche die Gleichrichtung auf 3 kV DC durchführt ($\pm 1,5$ kV)
- Weitere DC-Wandler speisen die 1 kV-Ebene aus der 3 kV-Ebene
- Zusätzlich wird die 1 kV Ebene aus geregelten DC-Quellen und einer zweiten AFE gespeist, welche mit dem Drehstromnetz verbunden sind
- Die 380 V-Ebene ist ebenfalls über einen DC-Wandler realisiert (1 kV/380 V)
- Durch die Kombination der Betriebsmittel können verschiedenste Anwendungsfälle nachgebildet werden
- Sowohl aktive, als auch passive Lasten abbildbar
- Nennstrom (3 kV-Ebene): 50 A
- Variable Prüfdauer und Parameter durch digitale Ablaufsteuerung einstellbar



Die Erfassung elektrischer Messdaten während der Untersuchungen erfolgt zur Auswertung über ein HBM-System, Tastköpfe und Präzisionsmessshunts und für das Schutzsystem über eigens durch die PTB gefertigte Sensorboxen

Transientenrekorder HBM Gen2i/Gen3T-2:

- 16 Messkanäle (isoliert, BNC und LWL)
- 12 Bit Auflösung
- Bis zu 100 MS/s Abtastrate

Sensoren der PTB für das Schutzsystem

- Dual Spannungsteiler für Hochfrequente und stationäre Signale und kontaktlose Strommessung
- Nennstrom der Sensoren 200 A
- Spannungsmessung bis 3,6 kV

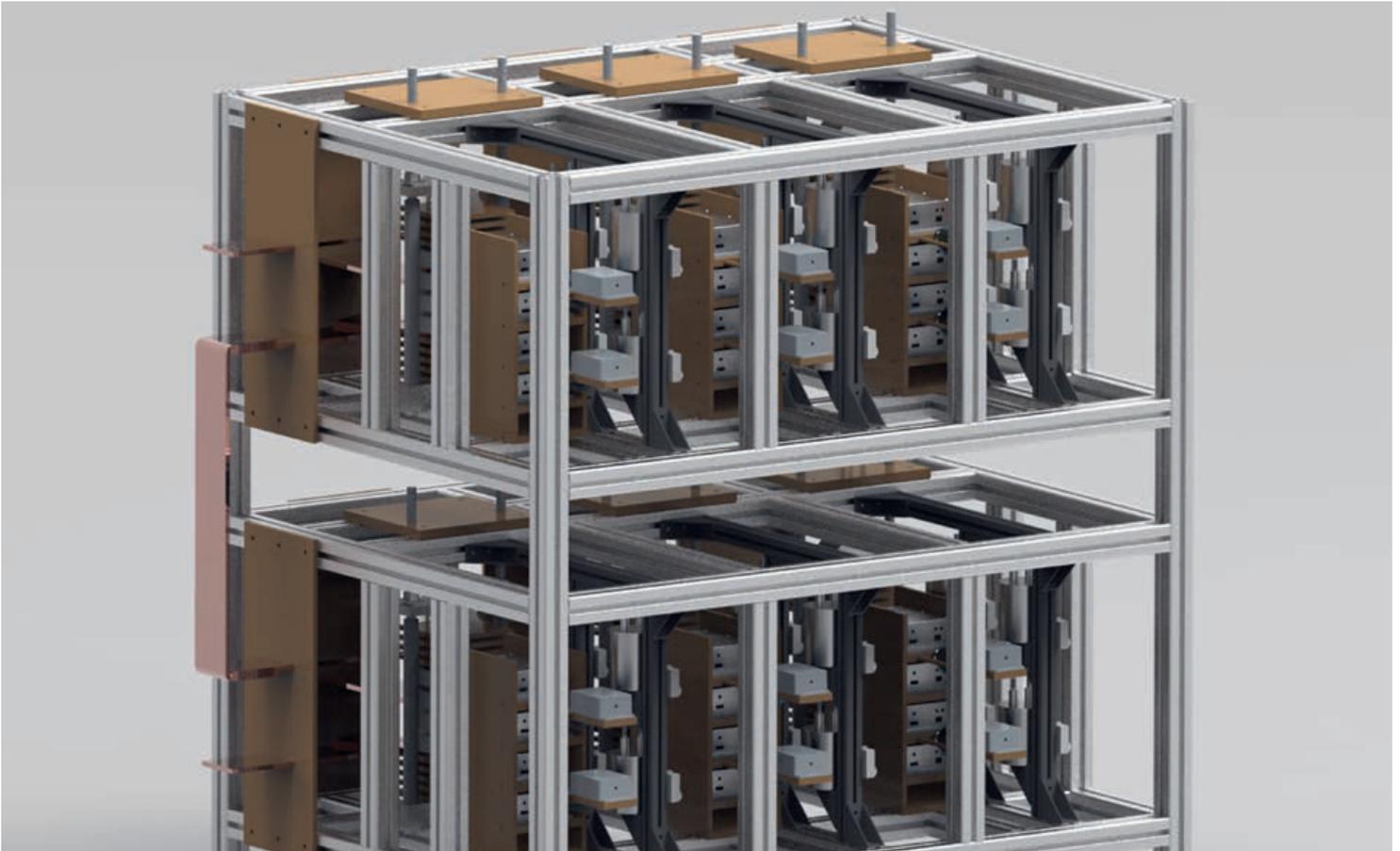


Verkabelung durch Stecksystem und interne Komponenten

- Breites Spektrum an Themen kann behandelt werden:
- Nachbildung einer Vielzahl von DC-Bordnetz-, Industrie- und Verteilnetzstrukturen
- Netzcharakterisierung und Modellbildung von DC-Netzen mithilfe statistischer Versuchsplanung
- Entwicklung, Untersuchung und Optimierung von neuartigen DC-Schutzsystemen mit Fokus auf die Schaltgerätekoordination bei Stromfehlern

Derzeit werden zudem noch Wiederverfestigungsuntersuchungen nach DC-Belastungen an verschiedenen Ableitern und in Schaltgeräten durchgeführt

Gleichstromprüffelder



KONTAKT

Patrick Vieth

☎ +49 531 391-9725

✉ p.vieth@tu-braunschweig.de

Frederik Anspach

☎ +49 531 391-9736

✉ f.anspach@tu-braunschweig.de

Lars Claaßen

☎ +49 531 391-9715

✉ l.claassen@tu-braunschweig.de

Dirk Bösche

☎ +49 531 391-7745

✉ d.boesche@tu-braunschweig.de

AUFGABEN UND LEISTUNGEN

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

GEFÖRDERT DURCH



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Gleichstromprüffelder

Vorstellung der Hochleistungsgleichstromprüffelder mit Fokus auf den Neubau DC.lab im Rahmen des Förderprojektes UPS

Der Anteil an Gleichstromnetzen nimmt immer mehr zu, auch in den Forschungsprojekten mit Beteiligung des elenia ist dies zu spüren. DC Industrie 2, SE²A, SMS 2 und UPS (siehe Forschungsvorhaben Kapitel 6) sind Beispiele von unseren Forschungsvorhaben, die diese Netzstrukturen und deren Komponenten untersuchen. Aktuelle und zukünftige Einsatzgebiete sind unter anderem Verteil-, Industrie- und Bordnetze in Elektrofahrzeugen, Schiffen oder Flugzeugen.

Zusätzlich zu unserem vorhandenen DC-Prüflabor mit einem maximalen Strom von 5 kA und einer Spannung von bis zu 561 V entsteht mit dem neuen Hochleistungsgleichstromprüffeld DC.lab im Zuge dieses BMWi-Projektes UPS am elenia ein neues Prüflabor für DC-Hochstromprüfungen. Die Auslegung des Prüffeldes hat mit dem Start des Projektes 2016 begonnen. Es wurden verschiedene Möglichkeiten zur Erzeugung einer Prüfgleichspannung untersucht. Es wird im nächsten Jahr eine maximale Prüfspannung (DC) von 12 kV DC und einen maximalen Prüfstrom von 30 kA erzeugen können. Auf Grund der angestrebten hohen Leistungen wird eine neue Netzanbindung, in enger Zusammenarbeit mit den zuständigen Stellen der TU

Braunschweig und dem örtlichen Netzbetreiber BS|Netz, aufgebaut.

Das Herzstück des neuen Labors bildet ein gesteuerter B12 Gleichrichter. Für die Prüfparameter ist keine Phasenschnittsteuerung des Gleichrichters notwendig. Das grundlegende Verhalten der Brücke wurde in Simulationen verifiziert. Der Gleichrichter wird über zwei neue Prüftransformatoren, 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 (Gleichrichter, Mess- und Prüftechnik) wird in der Hochspannungshalle des Institutes errichtet. Die Bauvorhaben im Rahmen des Projektes UPS sind mit dem Gebäudemanagement der TU Braunschweig geplant und werden aktuell umgesetzt.

Die Thyristortreiber senden anhand von Steuersignal und Spannungsfall über dem Thyristor selbstständig einen Zündimpuls. Zur Energieversorgung der Treiber wurden eigene Hochfrequenzwandler entwickelt. Sie arbeiten nach dem Transformatorprinzip, kommen jedoch ohne Eisenkern aus.

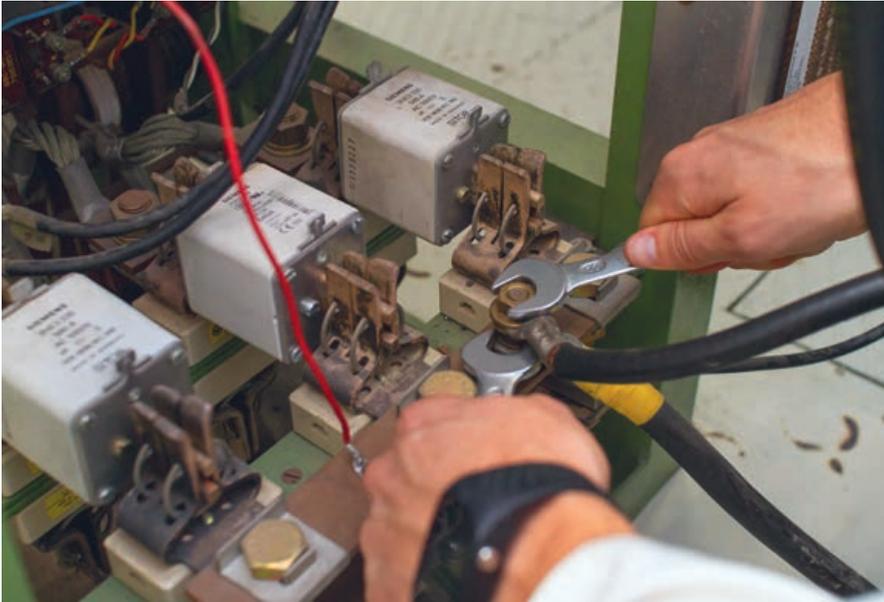
Um einen sicheren Betrieb des Gleichrichters sicherzustellen, überprüfen die Thyristortreiber ihre Anbindung an die Ablaufsteuerung. Sollte die Versorgung oder Kommunikationsleitung zu einem Treiber ausfallen, wird dies an die Steuerung gemeldet und ein Einschalten des Labors unterbunden.

Zur Absicherung der Thyristoren wurde ein Kurzschlussstrombegrenzer beschafft. Dieser wird in der Hochspannungshalle aufgestellt und unterbricht die 20 kV Stromversorgung der Transformatoren, wenn der maximal zulässige Strom überschritten wird.

Eine erste Inbetriebnahme wurde bereits durchgeführt. Hierzu wurden die Prüftransformatoren über einen Stell- und Mittelspannungstransformator mit 10 kV versorgt.

Der Gleichrichter arbeitete bei ersten Schaltversuchen wie vorgesehen.

In den kommenden Monaten wird die Mittelspannungsschaltanlage im Keller des Institutes errichtet und die Transformatoren dort aufgestellt. Das Institut wird dann über einen neue Übergabestation an das 20 kV Mittelspannungsnetz angebunden.



Erzeugung von Gleichstrom aus Wechselstrom über:

- eine aktive B6-Brückengleichrichterschaltung
- Thyristorbasierter Gleichrichter mit Schmelzsicherungen als Reserveschutz
- Max. DC-Prüfspannung: 561 V
- Max. DC-Prüfstrom: 5 kA
- Zündwinkeleinstellung
- Variable Prüfdauer durch digitale Ablaufsteuerung



Erzeugung von Gleichstrom aus Wechselstrom über:

- eine B12-Brückengleichrichterschaltung
- Thyristorbasierter Gleichrichter mit Is-Begrenzer als Reserveschutz
- Max. DC-Prüfspannung: 12 000 V
- Max. DC-Prüfstrom: 30 kA
- geringe Welligkeit
- Variable Prüfdauer durch digitale Ablaufsteuerung

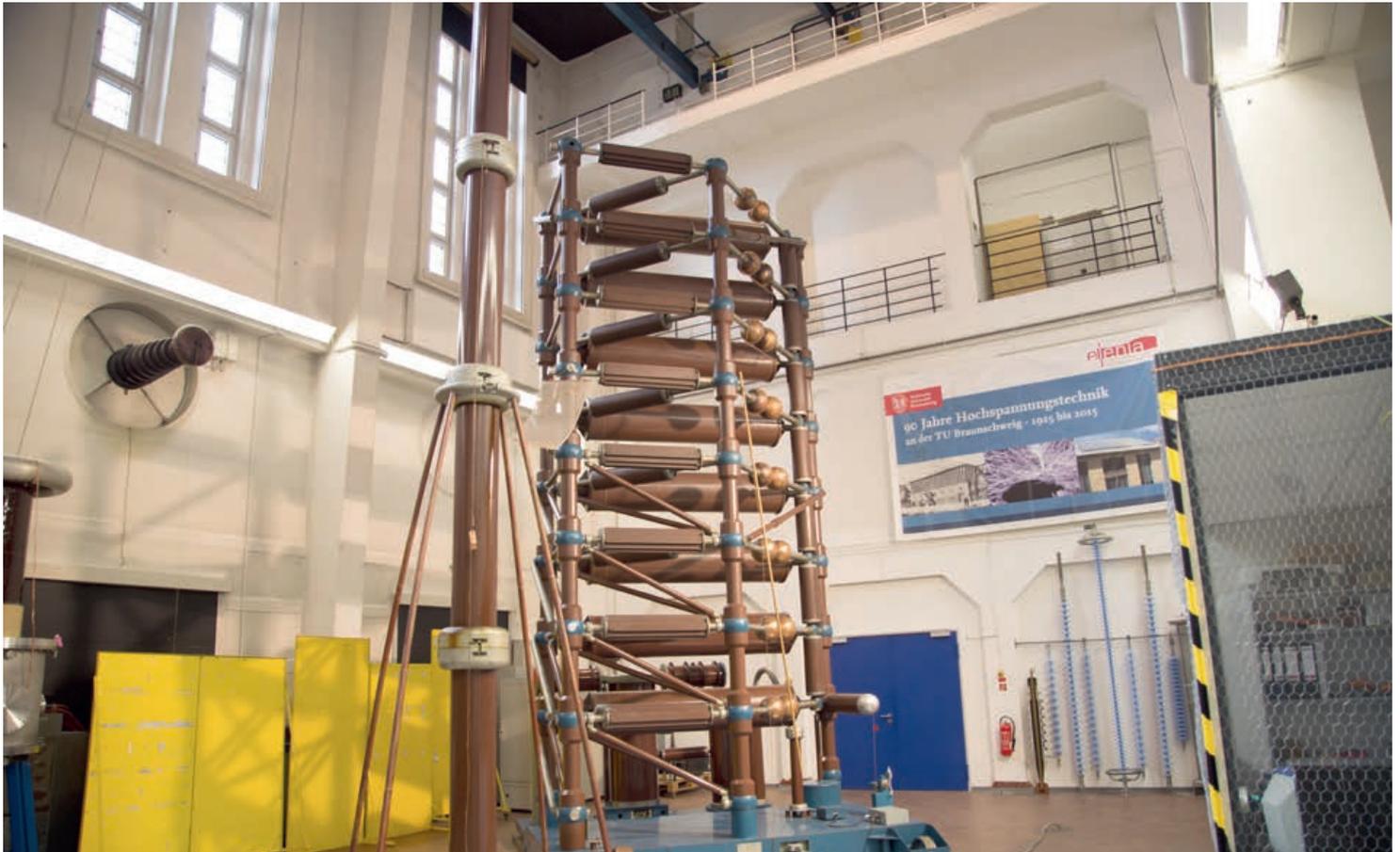


Erfassung elektrischer und optischer Messdaten durch:

- Transientenrekorder HBM Gen3T:
 - 4 Messkanäle (LWL)
 - 4 Messkanäle (differentiell)
 - 14 Bit Auflösung
 - 100 MS/s
- Schnellfilmkamera Redlake MotionPro X4:
 - Auflösung 512 x 512 Pixel
 - Schwarz-Weiß oder Farbaufnahmen
 - Max. Bildfrequenz von 200 fps
 - min. Belichtungszeit 1 μ s



Hochspannungshalle



KONTAKT

Karen Flügel, M. Sc.

✉ k.fluegel@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391-7785

AUFGABEN UND LEISTUNGEN

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

Hochspannungshalle

Viel Platz für Versuche der Mittel- und Hochspannungstechnik und für die Lehre zu Pandemiezeiten

Die Hochspannungshalle des Institutes gliedert sich in drei Bereiche. Das ist das große Prüffeld mit zwei Systemen zur Hochspannungserzeugung, Wechselspannungen und Blitzstoßspannungen, das DC-Leistungsprüffeld (detaillierter Laborbericht separat), 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 Spannungsbereich 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 der Experimentatoren 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 $\dot{U} = 200$ kV bei Temperaturen von -190 °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 die-

nen 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.

Die Größe der Hochspannungshalle ermöglichte während der Covid-19-Pandemie die Durchführung des Praktikums „Hochspannungstechnik“ in Präsenz, da stets die erforderlichen Abstände eingehalten werden konnten. So brachten die vielfältigen und hochspannenden Versuche Abwechslung ins online-Studium und die Begeisterung für Hochspannungstechnik konnte in einigen Studierenden geweckt werden.



Wechselspannungstransformator

- 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 °C und ca. 200 kV bis 3 bar Absolut-Druck



Stoßspannungsgenerator

- 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

Teilentladungs-Messkabine

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



Greinacher-Kaskade und Vakuumprüfgefäß

- 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



Isolierstofflabor



KONTAKT

Maik Kahn, M.Sc.

✉ m.kahn@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391-7741

AUFGABEN UND LEISTUNGEN

- 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
- Parallelprüfanlage für Durchschlagsprüfungen in Öl und Luft

Isolierstofflabor

Wiederinbetriebnahme eines Labors zur Erforschung neuer Isoliermaterialien und -systeme für DC- Systeme und Elektromobilität

Für Isolierstoffe im Bereich der Elektromobilität, die bspw. in Elektromotoren eingesetzt werden, werden immer höhere Anforderungen gestellt. Hierfür werden neben den klassischen Untersuchungsmethoden von Isolierstoffen neue Methoden und Herangehensweisen benötigt, um damit zu einer Verbesserung der Bewertung und der Lebensdauerabschätzung führen sollen.

In der Vergangenheit sind verschiedene wissenschaftliche Arbeiten zur Beurteilung der Isolierstoffqualität angefertigt. So haben u. a. Frank Gerdinand im Jahr 2004 mineralisch gefüllte Epoxidharzformstoffe untersucht und im Jahr 2009 von Michael Budde die Zustandsbewertung einer elektrischen Isolierung mittels Teilentladungsdiagnostik durchgeführt. Der Isolationszustand eines Isolierstoffs wird durch eine Vielzahl dielektrischer Parameter und Festigkeits-Kenngrößen charakterisiert. Derzeitig können bspw. die ϵ_r - und $\tan(\delta)$ -Messung in den Räumlichkeiten des ersten Obergeschosses durchgeführt werden. Für Teilentladungsuntersuchungen wird bisher die elektrisch geschirmte Teilentladungsmesskabine in der Hochspannungshalle

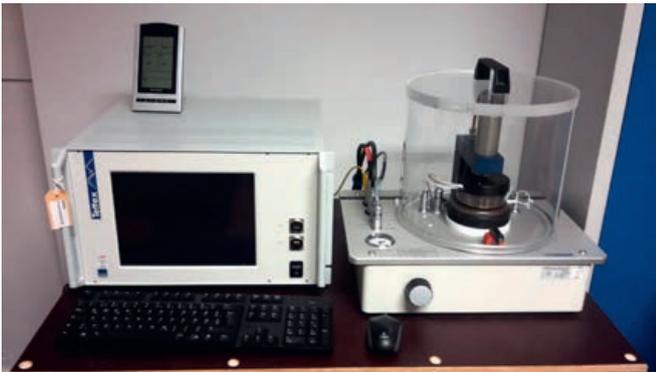
verwendet. Die im ersten Obergeschoss vorhandene elektrisch geschirmte Messkabine wird in zukünftigen Abschlussarbeiten für die Teilentladungsuntersuchungen eingerichtet. Mit der neuen Messkabine wird ein hochpräzises, störfreies und effektives Messen der Teilentladungen möglich werden. Damit kleinste Schwachstellen in der Isolierung erkannt und analysiert werden können.

Das Isolierstofflabor im Untergeschoss des elenia verweilt für längere Zeit als Lager. Die ersten Schritte zur Wiederinbetriebnahme des Isolierstofflabors wurden in den vergangenen Monaten eingeleitet. Die Gerätschaften vergangener Forschungsarbeiten wurden geprüft, generalüberholt oder in einen funktionierenden Zustand gebracht. Die zukünftigen Messungen sollen bei verschiedenen Umgebungsbedingungen stattfinden können, da Temperatur und Luftfeuchtigkeit die Messungen beeinflussen. Für Versuche bei höheren Temperaturen steht ein Vakuum-Trockenofen mit bis zu 180 °C zur Verfügung. Eine Konditionierung der Isolierstoffe kann im Exsikkator oder in Wasserbecken erfolgen. Für Versu-

che im Vakuum kann eine Vakuumglocke verwendet werden. Die Inbetriebnahme der Parallelprüfanlage im Isolierstofflabor ermöglicht es vier weitere Durchschlagsprüfungen zu der bereits vorhandenen Anlage mit zehn Proben in der Hochspannungshalle gleichzeitig durchzuführen.

Das Ziel der Wiederinbetriebnahme des Isolierstofflabors ist es Isolierstoffforschung auf höchstem Niveau und auf dem neuesten Stand zu betreiben. In künftigen Forschungsprojekten werden die gesammelten Kompetenzen in der Prüfung und Diagnostik der Isolierstoffe weitervertieft. Des Weiteren wird das Forschungsrepertoire am elenia erweitert. Dadurch wird das Interesse an der Isolierstoffforschung am elenia gestärkt, damit die Nachwuchsförderung in diesem Bereich gewährleistet wird. Dafür werden für die Lehre neue Versuche für das Hochspannungspraktikum geschaffen und alte wiederbelebt. Daraus soll langfristig ein neues Praktikum entstehen.

Fotos: Maik Kahn/TU Braunschweig



Schering-Messbrücke

- Messsystem zur Ermittlung der dielektrischen Eigenschaften
- Haefely Tettex 2830/2831 mit 2914 Temperatur-Messzelle
- Relative Permittivität (ϵ_r)
- Dielektrischer Verlustfaktor ($\tan(\delta)$)
- Frequenzbereich: 50 Hz
- Spannungsbereich: 2,5 kV



Impedanz-Messgerät

- Dielektrische Charakterisierung von festen Materialien im Zeit- und Frequenzbereich
- Omicron-Lab Messsystem „Spectano 100“ mit Probenhalter „DSH 100“
- Relative Permittivität (ϵ_r)
- Dielektrischer Verlustfaktor ($\tan(\delta)$)
- Frequenzbereich: 5 μ Hz–5 kHz
- Spannungsbereich: 0,1 V–200 V

Geschirmte Messkabine

- Teilentladungsmessung (TE-Messung)
- Spannungen bis 100 kV AC
- Grundstöörpegel <1 pC
- Umrichter bis 20 kHz
- Temperaturbereich: -40 °C bis 200 °C bei 50 Hz
- Datenerfassungssystem



Parallelprüfanlage

- Parallelprüfanlage für Durchschlagsprüfungen
- Durchschlagsprüfungen in Öl und Luft
- Vier gleichzeitige Prüfungen
- Festigkeitsprüfungen bis 100 kV, ohne Parallelanlage bis 200 kV
- Automatische Abschaltung bei Durchschlag



Kooperationslabor



KONTAKT

Marc René Lotz

✉ m.lotz@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391-9721

AUFGABEN UND LEISTUNGEN

Validierung von vermaschten DC-Systemen mit Echtzeitsimulationskonzepten

- Hardware-in-the-Loop (HiL)
- Power-Hardware-in-the-Loop (PHiL)
- Rapid Control Prototyping (RCP)

Modellbildung und Simulation

- Betriebs-, Regelungs- und Schutzkonzepte von MMC
- Regelungstechnik allgemein

Kooperationslabor

Validierung von laborskalierten DC-Netzen und Umrichtern mit Power-Hardware-in-the-Loop-Experimenten

Die Validierung von vermaschten DC-Netzen im Bereich der Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) stellt eine große Herausforderung aufgrund der Komplexität solcher Systeme dar. Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Validierung von Betriebs-, Regelungs- und Schutzkonzepten, wobei die Performance der eingesetzten Umrichter-technologien, darunter der Modular Multilevel Converter (MMC), von besonderer Bedeutung ist.

Hier existiert ein großer Bedarf nach dem Proof-of-Concept mit Hilfe von Prototypen im Labormaßstab. Diese prototypischen Implementierungen bilden die Schnittstelle zwischen Simulation und Realisierung im großen Maßstab. Die Experimente können gefahrlos und unter definierten Bedingungen im Labor durchgeführt werden, im Gegensatz zu Feldstudien. Die so gewonnenen Ergebnisse unterstützen die Aussagekraft der reinen Simulationen deutlich.

Aufgrund der Komplexität der betrachteten DC-Systeme können nicht alle Systemelemente im Labor nachgebildet werden. Mit Hilfe von Power-Hardware-in-the-Loop (PHiL) können jedoch einige Elemente in Echtzeitsimulationen ausgelagert werden. Der Laborprototyp interagiert dann mit den Elementen innerhalb der Echtzeitsimulation, und umgekehrt. Ein Leistungsverstärker bildet dabei die Schnittstelle. Simulierte Signale werden in Signale größerer Leistung umgewandelt, um den Laborprototyp anzuregen.

Da innerhalb dieses Forschungsbereichs eine enge Verknüpfung zwischen Entwicklung und Simulation von komplexen Topologien, und Validierung und prototypischer Implementierung im Labormaßstab, besteht, hat das elenia Institut für Hochspannungstechnik und Energiesysteme ein Kooperationslabor in Zusammenarbeit mit dem Institut für Elektrische Anlagen und Automatisierungstechnik (IfEA) der Ostfalia

Hochschule für angewandte Wissenschaften gegründet.

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

Im Labor werden der Prozess der Validierung und die Entwicklung eines skalierten Prototyps am Beispiel eines Dreiknoten-netzes erprobt. Ebenfalls werden Konzepte und Methoden für PHiL entwickelt, und mit Eigenentwicklungen von MMC-Komponenten validiert. Dafür verfügt das Kooperationslabor über Kernkompetenzen in den Bereichen Regelungstechnik, Leistungselektronik, Modellbildung und Simulation.



Foto: opal-rt.com



Foto: René Lotz/TU Braunschweig



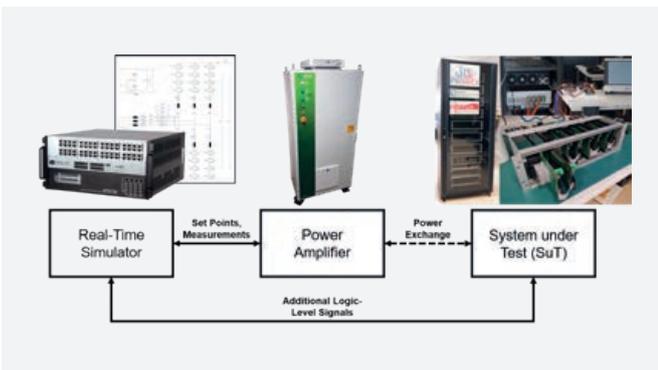
Echtzeitsimulator OPAL-RT OP5707

- Intel Xeon E5 series
- 16 Analog In, 16 Analog out
- 32 Digital in, 32 Digital out
- Ethernet, CAN, IEC 104, IEC 61850, SFP
- Optische Echtzeit-Kommunikationsschnittstelle mit Leistungsverstärker Triphase PM15



Leistungsverstärker Triphase PM15

- 15 kVA, ± 650 V
- Vierleiter-AC-Stromquelle
- Zweileiter-DC-Spannungsquelle
- Voller 4Q-Betrieb
- Betrieb beider Quellen gleichzeitig und unabhängig voneinander
- Echtzeitbetrieb mit Kommunikationsschnittstelle zum Echtzeitsimulator OPAL-RT OP5707



Versuchsaufbau für Power-Hardware-in-the-Loop (PHIL)

- Power-Hardware-in-the-Loop (PHIL)
- Echtzeitsimulation eines MMC auf dem Real-Time Simulator
- MMC-Komponenten im Labor als System unter Test (SuT)
- Sollwerte werden vom Real-Time Simulator zum Leistungsverstärker (Power Amplifier) gesendet, Messwerte werden zurückgesendet
- Leistungsaustausch mit SuT über Power Amplifier
- Gleichzeitige Validierung von Controller-Designs und leistungselektronischen Komponenten



MMC-Komponenten im Labor

- Ein MMC besteht aus zahlreichen leistungselektronischen Komponenten, den Kommutierungszellen
- Ein solcher Zellenstack wird im Labor mittels PHIL validiert
- Jede Zelle besteht aus einer Halbbrücke mit interner Kapazität und verfügt über eine eigenständige Regelung
- Dargestellt sind vier Kommutierungszellen mit entsprechenden Controllern

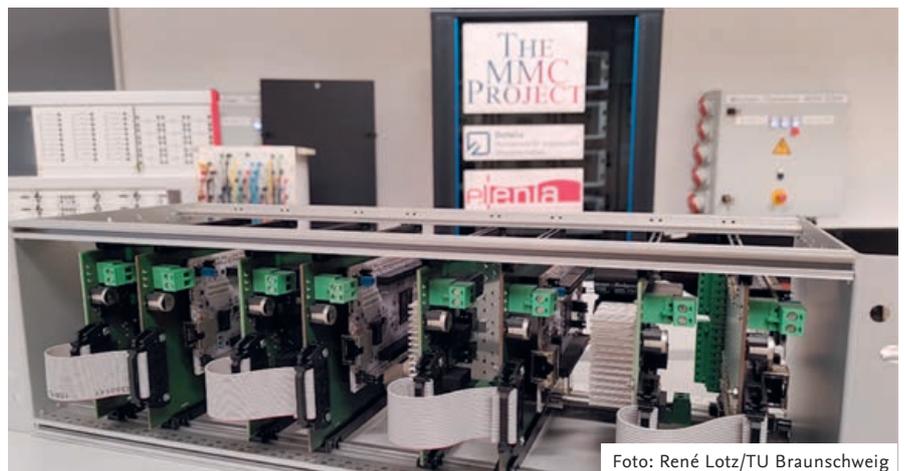


Foto: René Lotz/TU Braunschweig

Synthetisches Leistungsprüffeld



KONTAKT

Benjamin Weber, M. Sc.

✉ benjamin.weber@tu-braunschweig.de

Timo Meyer, M. Sc.

✉ timo.meyer@tu-braunschweig.de

INTERNET

www.tu-braunschweig.de/elena/forschung/synthetisches-leistungsprueffeld

AUFGABEN UND LEISTUNGEN

Leistungsprüfung

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

Kontaktgeometrieuntersuchung

- Untersuchung neuartiger Kontaktgeometrien

Thermografieuntersuchung

- Untersuchung von Oberflächentemperaturen bei verschiedenen Materialien



Synthetisches Leistungsprüffeld

Synthetische Erzeugung von Prüfbedingungen für Leistungsschalter der Mittel- und Hochspannungsebene

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

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

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

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

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



Hochstrom (links) / Hochspannungs- (rechts) Kondensatorbank

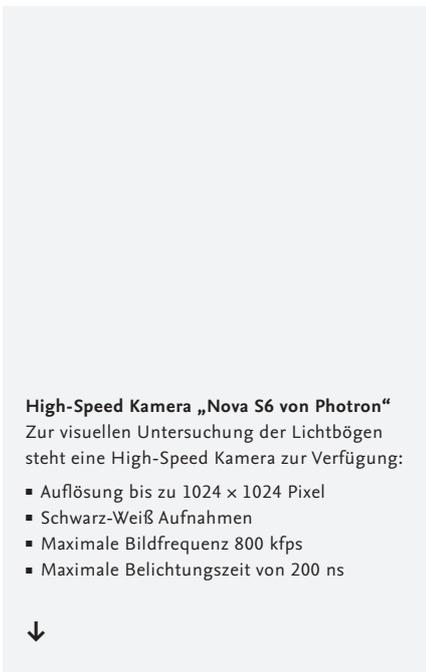
Einphasige, synthetische Prüfung von Leistungsschaltern

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

Vakuum-Versuchsschalter

Untersuchung der Plasmaphänomene zwischen Schaltkontakten möglich

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



High-Speed Kamera „Nova S6 von Photron“

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

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



Lötofen für Vakuumanordnungen „Carbolite Gero TS1“

Freistehender Klappofen zum Vakuumlöten von Prüfanordnungen und Kontaktstücken

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



Energiemanagementlabor



KONTAKT

Dr.-Ing. Frank Soyck

☎ +49 531 391-7739

✉ f.soyck@tu-braunschweig.de

Frederik Tiedt, B.Sc.

☎ +49 531 391-9799

✉ f.tiedt@tu-braunschweig.de

Gian-Luca Di Modica

☎ +49 531 391-7704

✉ g.di-modica@tu-braunschweig.de

Marcel Lüdecke

☎ +49 531 391-9726

✉ m.luedecke@tu-braunschweig.de

AUFGABEN UND LEISTUNGEN

- 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
- Kompatibilitätstest zur technischen Bewertung des Betriebs von Batteriespeichern mit Wechselrichtern eines führenden Herstellers

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 Ladefrastruktur sowie ein Wärmepumpenteststand bestehend aus einer Luft-Wasser-Wärmepumpe, einer Klimakammer und einem Heizkreislauf zurückgegriffen werden. 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 Aus-

wirkungen 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 soll mit dieser Steuerungsumgebung die Möglichkeit haben, 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 Forschungsvorhaben 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.



Effizienzmessung von PV-Speichersystemen

- 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“

Nachbildung von Verbrauchern

- 3 AC-Lasten: „Höcherl & Hackl ZSACRV 9826“ (je 9,8 kW)



Ladesäule am Mühlenfordthaus

- Forschung im Bereich erzeugungsorientiertes Laden und netzorientiertes Laden
- Die physikalische Kopplung der Ladeinfrastruktur mit dem Energiemanagementlabor ist möglich
- Zur informationstechnischen Einbindung wird das im Forschungsprojekt Fleets-GoGreen entwickelte Lademanagementsystem elias verwendet

Ladeinfrastruktur des elenia am Mühlenfordthaus

- Mennekes AC-Wallboxen mit Ladeleistungen bis 22 kW
- smartPion Ladesäule mit bis zu 2 x 11 kW
- Multicharger (CCS Typ 2- und CHAdeMO-Anschluss) für DC-Laden bis 22 kW



Heizlastemulation des Wärmepumpenteststandes

- Hardware-in-the-Loop-Wärmelastemulation im Zusammenspiel mit der Gebäudesoftware TRNSYS zur Emulation der Heiz- und Kühllast von Gebäuden
- Klimakammer mit Temperaturbereich von -5 °C bis 35 °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

Netzdynamiklabor



KONTAKT

Björn-Oliver Winter, M.Sc.

☎ +49 531 391-7748

✉ bjoern.winter@tu-braunschweig.de

Florian Rauscher, M.Sc.

☎ +49 531 391-7760

✉ f.rauscher@tu-braunschweig.de

Frederik Tiedt, B.Sc.

☎ +49 531 391-9799

✉ f.tiedt@tu-braunschweig.de

Timo Sauer, M.Sc.

☎ +49 531 391-7721

✉ t.sauer@tu-braunschweig.de

AUFGABEN UND LEISTUNGEN

Untersuchungen zu Themen wie:

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

Netzdynamiklabor

Netzstabilität in Zeiten 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. Das Labor und sein Team stellen sich vor:

Über das Labor – Zentrale Fragestellungen

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

Mittels Szenarien, in denen diese zukünftige Stromversorgungsinfrastruktur bereits heute im Labor abgebildet wird, sollen Chancen als auch Herausforderungen bei der Versorgung mit hohem Anteil er-

neuerbarer Energien und der Elektromobilität im Voraus erkannt und untersucht werden.

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

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

Das Netzdynamiklabor als Dienstleister für Forschung und Industrie



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

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

Vorstellung von Laborkomponenten

– Gekoppelter Maschinensatz

Die zentrale Frage unseres Energieversorgungssystems der nächsten Jahre wird der stabile Übergang auf eine CO₂-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. Über eine gesonderte Synchronisierungseinheit wird eine phasen- und amplitudengenaue Zuschaltung des Maschinensatzes zum Labornetz gewährleistet. 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 Versuchsfokus die Reaktion von Netzkomponenten auf schnelle, meist durch Fehler hervorgerufene Sprünge der Netzphase und –amplitude. In diesen tendierenden 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 Netzynamiklabor lädt zur Untersuchung dieser Fragestellungen ein.

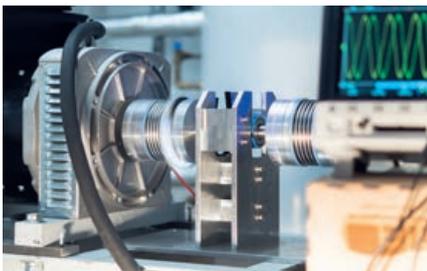


Abbildung 3: Gekoppelter Maschinensatz im Testbetrieb nach Ausrichtung und Kalibrierung des Wellenflansches

Vorstellung von Laborkomponenten – OPAL Real-Time-Simulator

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



Abbildung 4: Rechenstarker OPAL Echtzeitsimulator mit analogen Schnittstellen zur Ansteuerung von Komponenten im Labor

Zu diesem Zweck wurde das Labor um einen rechenstarken Echtzeitsimulator ergänzt. Der Echtzeitsimulator ermöglicht es, hybride Anwendungsfälle aus Simulation und Hardware in „quasi“-Echtzeit zu ermöglichen. Das hat mehrere Vorteile: Simulationen können schrittweise in das Labor überführt werden. Ein Teil des Versuchsaufbaus wird von Laborgeräten übernommen, der Rest findet im Echtzeitsimulator statt. Geräte und Simulationsmodell arbeiten dabei parallel und in Echtzeit zusammen. Analoge Messwerte, wie Spannung und Strom einzelner Geräte werden über Messeinrichtungen auf den Echtzeitsimulator geführt, dort intern unter Einbeziehung verschiedener Simulationsparameter verrechnet und als neue Stellgrößen analog ausgegeben. So entsteht ein sogenanntes Power-Hardware-In-The-Loop (PHIL) System – Die Verkopplung von sehr schnellen Simulationen mit elektrischer und mechanischer Hardware. Im Netzynamiklabor werden Simulationsschrittweiten von unter 100 μ s erzielt. Im Gegensatz zum reinen Laborbetrieb auf Hardwareebene ermöglicht ein Echtzeitsimulator die flexible Abbildung

von Elementen des Niederspannungsnetzes, z. B. Maschinen unterschiedlicher Trägheiten, Batterien mit unterschiedlichen Leistungen, Netze mit unterschiedlichen Anordnungen, welche im Labor nur mit hohem Aufwand nachzustellen wären. All das lässt sich hier einfach per Mausklick ändern. Fehlerfälle in spannungsführenden Elementen können in Simulationen abgebildet werden, ein Vorteil für die Personensicherheit und den Geräteschutz.

Neues aus dem Labor – Ergänzung des Labors um einen weiteren Netzsimulator

Mit der Beschaffung der REGATRON TC.ACS.30 Anfang des Jahres 2021, wurde die bereits bestehende Laborumgebung um eine leistungsfähige 4-Quadranten Spannungsquelle in Funktion eines weiteren Netzsimulators beschafft. Dieser Simulator kann, so wie der bereits bestehende, entweder als reiner Arbiträrgenerator oder als Verstärker genutzt werden. Ebenso ist ein Betrieb als elektronische RLC-Last möglich. Hiermit ergeben sich neue Anwendungsfälle und Szenarien für die Untersuchungen im Kontext der Netzemulation im bereits bestehenden PHIL System des Netzynamiklabors.

Die Ergänzung um einen weiteren Netzsimulator ermöglicht so exemplarisch den Betrieb verschiedener Umrichtersysteme an nun zwei „weichen“ Netzanschlusspunkten mit unterschiedlichen variabel einstellbaren Spannungen. Dies können beispielsweise zwei unterschiedliche Netzanschlusspunkte innerhalb eines Niederspannungsnetzes sein – Wechselwirkungen einzelner Netzabschnitte und Komponenten untereinander können so dargestellt werden. Darüber hinaus kann der Netzsimulator im Verstärkerbetrieb eigens entwickelte und parametrisierte Umrichter- und Maschinenmodelle elektrisch abbilden und somit die Anzahl und Flexibilität miteinander verkoppelbarer Komponenten erhöhen.

Ausbildung und Mitarbeit studentischer Hilfskräfte



Abbildung 5: Vielfältige Arbeits- und Lernbereiche an unterschiedlichen Laborschnittstellen

Mehrere hilfswissenschaftliche Mitarbeitende sind regelmäßig im Einsatz, um wissenschaftliche Mitarbeitende im Labor zu unterstützen. Unter anderem bei Aufgaben wie der softwareseitigen Implementierung und Ansteuerung von Komponenten im Labor mittels Programmen wie LabVIEW oder MATLAB/Simulink, oder auch der Installation von elektrischen Komponenten oder Hardware – Im Labor können Studierende praktische Erfahrungen im Bereich der Elektroinstallationen, aber auch im Bereich der anwendbaren Theorie von Regelungs- und Messtechnik sammeln.

Fakten & Zahlen zum Netzdynamiklabor

Verschiedene Komponenten wie Wechselrichter, AC- und DC-Quellen und Lasten aber auch ein 50 kVA Einzelstrangregler ermöglichen es, im Labor einen vollständigen

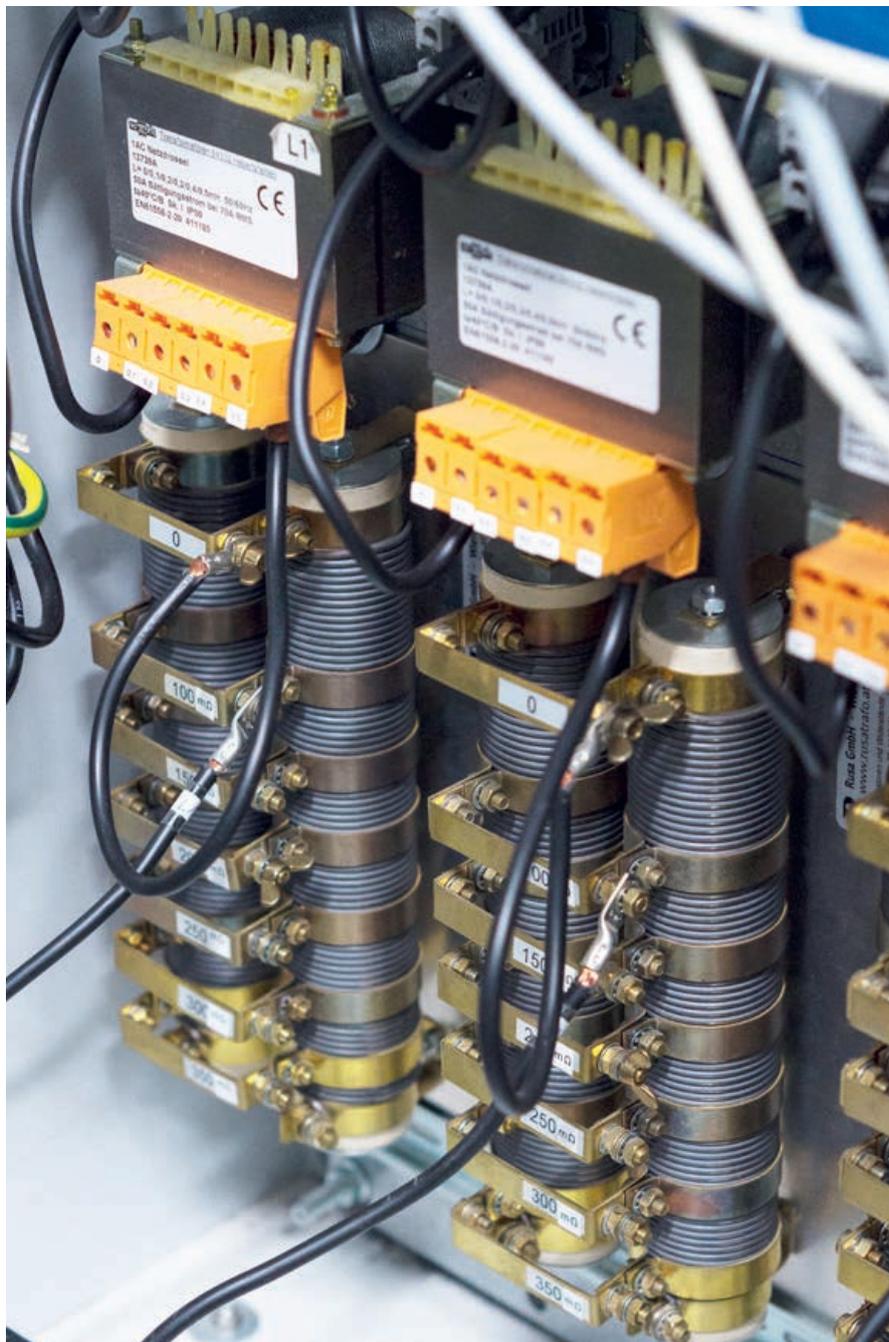


Abbildung 6: Leitungsnachbildende Elemente entsprechen bis zu 1,8 km Niederspannungskabel

Niederspannungsstrang nach- bzw. abzubilden. Um die Niederspannungsumgebung zu vervollständigen können bis zu 1,8 km Niederspannungskabel mittels flexibel einstellbarer Widerstände und Induktivitäten nachgebildet werden.

Ein leistungsstarkes und genaues Messsystem mit 16-Bit Messauflösung und einer Abtastrate von 500 kS/s ermöglicht ein genaues und präzises Arbeiten. Spann-

gen bis ± 1400 V und Ströme bis zu 200 A können an verschiedenen Messpunkten in der Laborumgebung aufgenommen und verarbeitet werden. Die Kernelemente und Versuchskomponenten, welche jedoch die zentralen Kernpunkte des Labors definieren sind auf der nächsten Seite finden.

Fotos: Frederik Tiedt/TU Braunschweig

Netzsimulator AMETEK MX-45

Voll rückspeisefähiger Netzsimulator zur Nachbildung verschiedener Netzzustände mit variablen Netzparametern:

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



OPAL 5700 Real-Time-Simulator

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

- Analoge/Digitale Ein- und Ausgänge zur Kopplung verschiedenster Laborkomponenten
- Kommunikationsschnittstellen über Protokolle wie MODBUS, EtherNet, EtherCAT, CAN, TimeStamp, GOOSE, etc.
- FPGA-Technik zur schnelleren Befehlsverarbeitung
- Arbeiten in der Entwicklungsumgebung von MATLAB/Simulink
- Echtzeitfähige Simulationen von Hardware und elektrischen Netzen mit Simulationsschrittweiten unter 100 µs



Netzsimulator REGATRON TC.ACS.30

Voll rückspeisefähiger Netzsimulator zur Nachbildung verschiedener Netzzustände mit variablen Netzparametern:

- 30 kVA Anschlussleistung
- Spannungen bis 305 VRMS und 800 VDC
- Ströme bis 43 ARMS
- Frequenzbereich 16-1000 Hz
- 4-adriger Anschluss (Unsymmetrische Belastung)
- Integriertes Messsystem
- Analoge Schnittstellen zur präzisen Ansteuerung einzelner Phasen im Verstärkerbetrieb
- Betrieb als simulierte RLC-Last
- Automatisierte Ablaufsteuerung mittels Python basierter Skripte
- Schnelle Flankenanstiegszeiten von bis zu 4 V/µs zur Untersuchung transienter Ereignisse



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
- Ansteuerung und Parametrierung über MATLAB/Simulink

30 kW gekoppelter Maschinensatz (Asynchronmaschine und Synchronmaschine)

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

- 30 kW Anschlussleistung bei 1500 rpm nominale Drehzahl und 150 Nm Nennmoment
- Synchronisierungseinheit zur Anbindung von externen Quellen an den Maschinensatzverbund
- Generatorischer und motorischer Betrieb möglich
- Ansteuerung mittels LabView und cRio-System

Mechanische Werkstatt



KONTAKT

Kerstin Rach

Meisterin im Maschinenbaumechaniker-Handwerk,
Werkstattleiterin und Ausbilderin

✉ k.rach@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391-7747

Frank Haake

Feinmechaniker

✉ f.haake@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391-7507 / 7749

Julia Musebrink

Feinwerkmechanikerin Fachrichtung Maschinenbau
/ Technikerin

✉ j.musebrink@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391-7507

Claas Narup

Industriemechaniker

✉ c.narup@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391-7507

AUFGABEN UND LEISTUNGEN

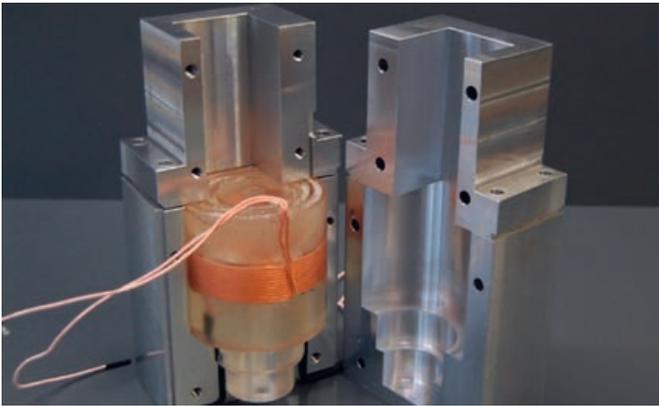
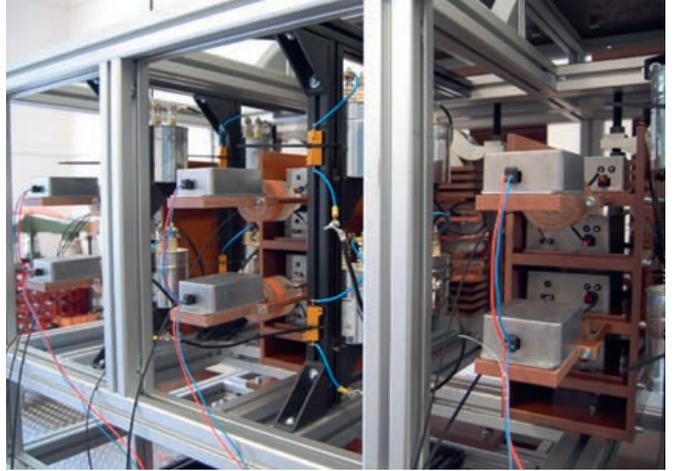
Wir in der mechanischen Werkstatt unterstützen die wissenschaftlichen Mitarbeiter und Studenten in der Anfertigung von Bauteilen und Anlagen für Lehre, Studien- und Abschlussarbeiten sowie Forschungsprojekte.

Fotos: Kerstin Rach/TU Braunschweig



→
Mechanische Befestigung der Treiberbeschaltung einer B12 Brücke

←
Mechanische Aufbau einer Hochleistungs B12 Brücke bis 30 kA



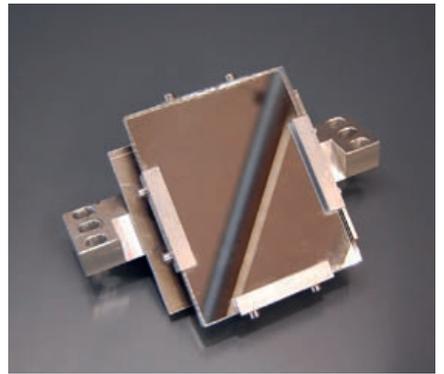
↑
Hochfrequenzüberträger in der halbierten Gießform

→
Einhausung Niederdruckkammer



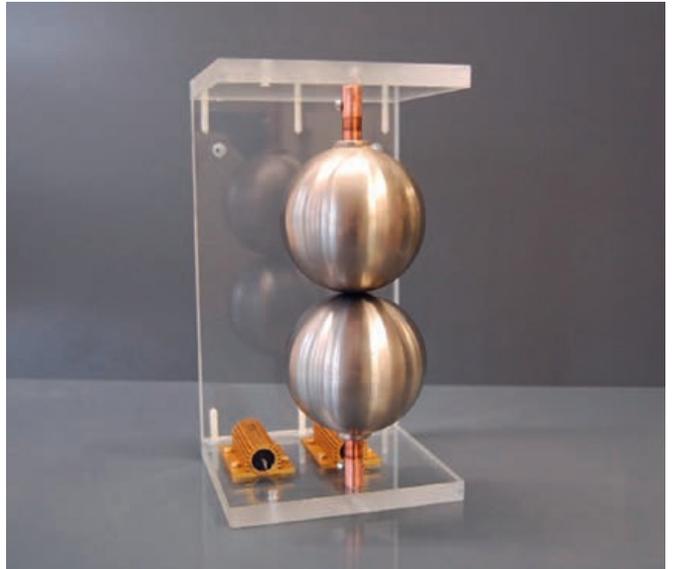
↓
Isolation der Thyristoren einer B12Brücke

→
Spiegelhalterung für experimentelle Untersuchung langer Schaltlichtbögen (Projekt: EUlaS)



Funkenstreckenhalterung:
Sicherheitseinrichtung für unsere Kondensatorbank, die im Weil- Dobke Prüfkreis eingesetzt wird.

↓



Elektrotechnische Werkstatt



KONTAKT

Christian Ryll

☎ +49 531 391-9731

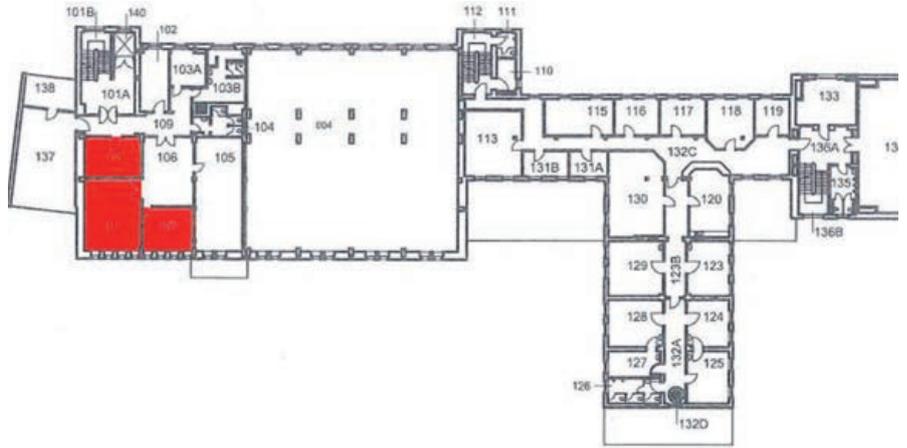
📠 +49 531 391-8106

✉ c.ryll@tu-braunschweig.de

- Seit Mitte 2020 präsentiert sich die Elektrotechnische Werkstatt nach umfangreichen Umbau- und Sanierungsarbeiten in neuen Räumlichkeiten des Mühlenpfordthauses.
- Neben voneinander getrennten Lager-, Arbeits- und Büroflächen verfügen die neuen Räumlichkeiten über eine eigene erweiterbare Raumverteilung mit ausreichend Reserven, diversen CEE Drehstromwandkupplungen sowie einzeln schaltbare LED Tageslicht Beleuchtungsstränge.
- Die neue Werkstatt umfasst zwei umfangreich ausgestattete Elektrolaborarbeitsplätze mit diversen Labornetzteilen, Trenntransformatoren, Oszilloskopen, Stromquellen sowie Löt- und Entlötstationen.
- Weiterhin steht ein Arbeitsplatz für mechanische Arbeiten mit standardmäßiger Ausstattung für einfache Metall- und Kunststoffbearbeitung zur Verfügung.
- Der Raum bietet zusätzlich Platz für studentische oder wissenschaftliche Mitarbeiter/ in, der/die hier unter Anleitung Versuchsaufbauten für Forschungsarbeiten realisieren können.

Fotos: Christian Ryll/TU Braunschweig

→
Flächenatlas 1.OG Mühlenfordthaus
Umzug von Raum 139 in die Räume 107 und 108 1.OG und Vergrößerung der Werkstatt und Bürofläche von 21 m² auf 65 m²



Arbeitsbereich Werkstatt



Arbeitsbereich Büro



Elektrolaborarbeitsplätze



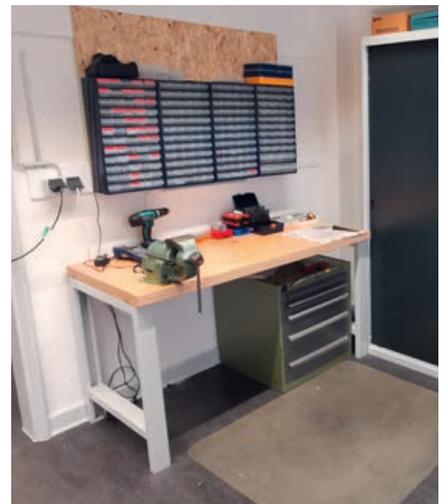
Kleinteilmagazine



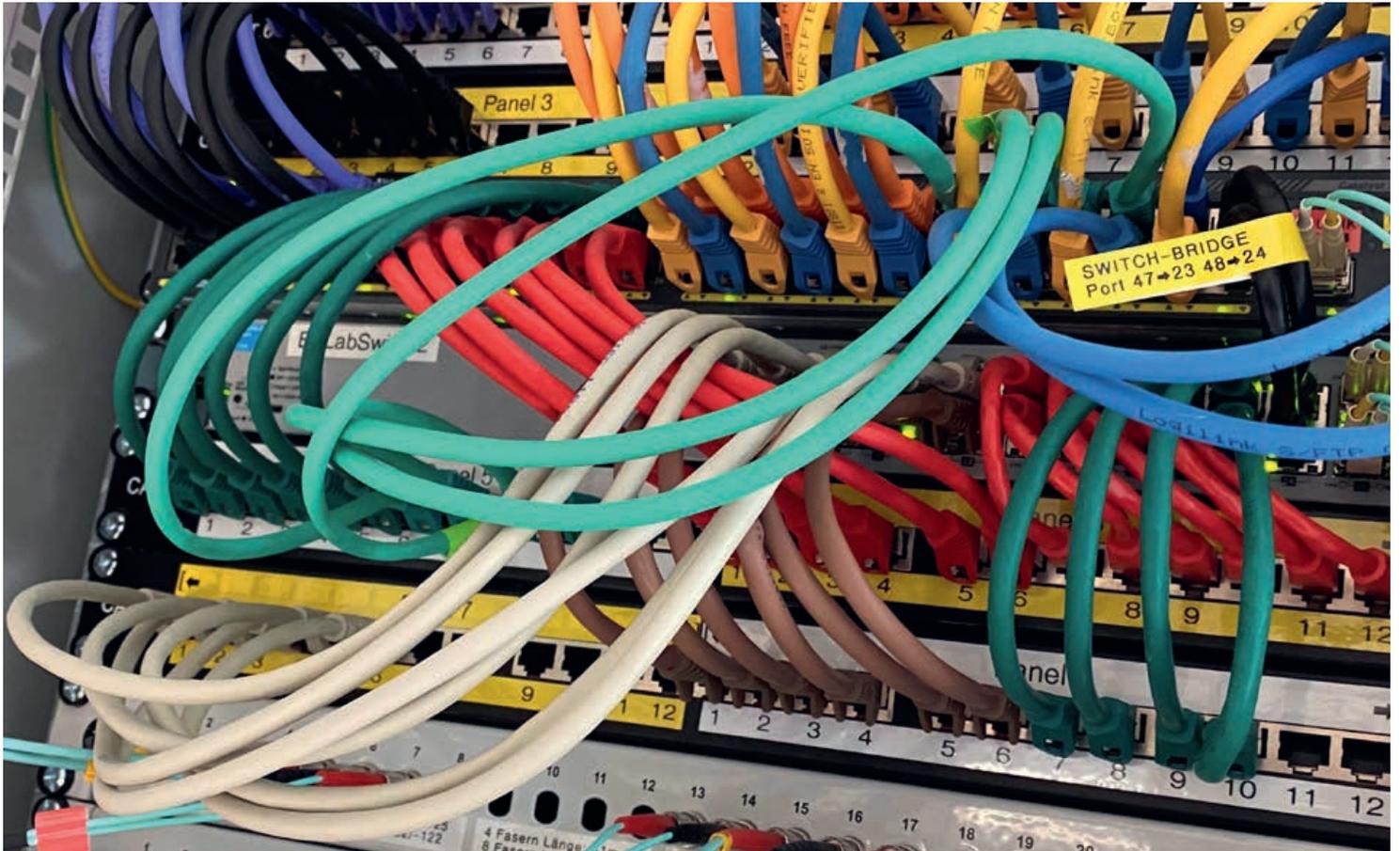
Lager



Werkbank und Bauteilmagazinen



IT-Abteilung



KONTAKT

Fabian Scholz

IT-Leitung

☎ +49 531 391-7753

✉ f.scholz@tu-braunschweig.de

Lukas Oppermann

IT-Administrator

☎ +49 531 391-9712

✉ lukas.oppermann@tu-braunschweig.de

AUFGABEN UND LEISTUNGEN

- Beschaffung, Wartung und Pflege der Server und Clients
- Bereitstellung von Arbeitsplätzen und Software
- Lizenzbeschaffung- und Verwaltung
- Betreuung und Schulung von Mitarbeitenden und Studierenden (Service Desk)
- Analyse und Definition der IT-Systeme nach DSGVO
- Ständige Überwachung und Wartung der Instituts- und Forschungsnetzwerke
- Aufbau und Wartung spezieller projektbezogener IT-Systeme
- Administration von Instituts- und Projektwebseiten

IT-Abteilung

Ein Überblick über die Informationstechnik (IT) des elenia in Zeiten von Home Office und Fernwartung

Aufgrund der stetig wachsenden Mitarbeiterzahl im elenia Institut und des weiterhin starken digitalen Wandels, wurde im Jahr 2017 durch die Einstellung von Fabian Scholz eine Instituts-IT eingerichtet. Diese unterstützt alle Mitarbeitenden und Studierenden des elenia bei Fragen und Problemen rund um die IT-Systeme des elenia und der TU Braunschweig. Zu den weiteren Aufgaben gehören u. a. die Mitarbeit und Planung von technischen Aufbauten in den Forschungsprojekten des elenia, sowie die Wartung und Instandhaltung der allgemeinen Netzwerk- und Serverstruktur, um ein unterbrechungsfreies Arbeiten zu gewährleisten.

Im Berichtszeitraum (Stand: August 2021) wurden über 1200 Anfragen per E-Mail und Ticketsystem beantwortet. Die

Anzahl der zu verwaltenden Accounts beläuft sich auf 166, welche an und mit den 381 bereitgestellten Systemen arbeiten. Diese bestehen aus verschiedenen Servern, virtuellen Maschinen, Workstations und Notebooks.

Eine besondere Herausforderung bildete der durch die Corona-Pandemie bedingte Lockdown zum Anfang des Jahres 2020. In kürzester Zeit mussten die Arbeitsplätze, Treffen und Veranstaltungen in das heimische Büro verlegt werden. Dazu wurden in Zusammenarbeit mit dem Gauß-IT Zentrum die Möglichkeit des Netzwerkzugriffs per VPN-Verbindung ermöglicht, sowie eine Plattform für Online-Meetings geschaffen. So können alle Mitarbeitenden ihrer Arbeit im Home Office weiter nachgehen.

Um weiterhin Promotionsprüfungen für angehende Doktor*innen anbieten zu können, wurde ein Audiosystem angeschafft.

Somit konnten die Professor*innen, Hochschulinterne und Gäste die spannenden Vorträge per Livestream von zu Hause aus verfolgen.

Während die meisten Institutsangehörigen im Home Office ihrer Arbeit nachgingen, wurden im Institut Baumaßnahmen durchgeführt, um den neuen Studierenden Arbeitsraum fertig zu stellen. Mit entsprechendem Hygienekonzept wurde dieser am 26.07.2021 offiziell eröffnet.

Seit Juli 2021 wird die IT durch die Einstellung von Lukas Oppermann in Teilzeit unterstützt.



Beispiel Systemüberwachung: Löschanlagen BLB

Für die BLB wurde ein Netzwerk-Überwachungssystem für die Brandmeldeanlagen der Batterietestgeräte aufgebaut. Hier können die Projektbetreuer*innen jederzeit den aktuellen Status der Anlagen einsehen. Bei einem Brandfall erhalten sie direkt eine Push-Benachrichtigung auf ihr Smartphone, um entsprechend schnell zu reagieren und weitere Maßnahmen einleiten zu können.

Dies ist nur eins der vielen Systembeispiele, welches für Forschungsprojekte aufgebaut wurde.

Foto: Fabian Scholz/TU Braunschweig



Audiosystem Doktorprüfungen

Um digitale Promotionsprüfungen durchführen zu können, wurde ein Audiosystem beschafft. Den Hauptteil des beschafften Audiosystems bildet das Mischpult, mit welchem die einzelnen Mikrofone entsprechend gesteuert werden können. Hiermit wird eine hohe Sprachqualität für die Online-Veranstaltungen gewährleistet.

Foto: Fabian Scholz/TU Braunschweig



Neuer Studierenden Arbeitsraum

Nach zweijähriger Umbauphase wurde am 26.07.2021 der neue Studierenden Arbeitsraum eröffnet. Dieser bietet Platz für insgesamt 28 Studierende, welche hier ihre Abschlussarbeiten verfassen oder an praktischen Lehrveranstaltungen teilnehmen können. Ein integriertes Mediensystem, sowie eine Klimaanlage stehen in dem modernen Raum zur Verfügung.

Foto: Laurenz Kötter/TU Braunschweig





Lehre

Lehrveranstaltungen	140
Hochspannungsversuch Agumented Reality	144
Studentische Arbeiten 2020	146
Studentische Arbeiten 2021	149

Lehrveranstaltungen

Vorlesungen: Arbeitsgruppe Energietechnologien

Vorlesung	Inhalt	Dozent
Technologien der Übertragungsnetze	Grundlagen der Übertragungsnetze: Struktur, Komponenten, Entwicklungen, Betriebsweisen, Herausforderungen; Berechnung von Übertragungsnetzen mit Ersatzschaltbildern: Freileitungen, Kabel, Synchrongeneratoren, Transformatoren, Kompensationselemente; Grundsätzliche Technologien der Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ): Konverter, Netztopologien, Offshore-Windparks	Dr.-Ing. Christian Schulz
Numerische Berechnungsverfahren	Grundlagen zur numerischen Lösung von Lineare Gleichungssystemen, DGL 1. Ordnung (Anfangswertprobleme), Partielle DGL (Finite Differenzen Methode), Rechnerübungen LT-Spice	Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat
Hochspannungstechnik I	Hochspannungsnetze, Überspannungen, Isoliersysteme, Gasentladungen, Isolierstoffe, Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung	Dr.-Ing. Michael Hilbert
Hochspannungstechnik II	Einführung, Grundlagen der Hochstrom- und Hochspannungsprüftechnik, Qualitätssicherung und Messunsicherheitsbestimmung, Erzeugung hoher Wechselfspannungen, Messung hoher Wechselfspannungen, Erzeugung hoher Gleichspannungen, Messung hoher Gleichspannungen, Erzeugung hoher Impulsspannungen, Messung hoher Impulsspannungen, Erzeugung hoher Ströme (AC, DC, Impuls), Messung hoher Ströme (AC, DC, Impuls)	Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat, Dr.-Ing. Johann Meisner
Aufbau und Funktion von Speichersystemen	Ladeinfrastruktur, Speicherkenngrößen, Systemauslegung, Speichertechnologien, Doppelschichtkondensator, Energiespeicherung in Form von Wasserstoff, Aufbau und Funktionsweise von Lithium-Ionen-Batteriespeichern, Batteriealterung und -diagnostik	Dr.-Ing. Frank Lienesch
Elektrische Energieanlagen I	Leitungs- und Netzformen, Ersatzschaltbilder von Betriebsmitteln, Synchronmaschine, verschiedene Transformatortypen, Freileitungen und messtechnische, Bestimmung der einzelnen Ersatzschaltbildkomponenten, Netzberechnungsverfahren für Lastflüsse Knotenpunktverfahren, Maschenverfahren und Überlagerungsverfahren, Einführung der symmetrischen Komponenten zur Kurzschlussstromberechnung. Berechnung von symmetrischen und unsymmetrischen Fehlerzuständen im Netz, Die dynamische Stabilität von Energieversorgungsnetzen, Physiologische Auswirkungen des Stromes auf den menschlichen Körper, Erdungstopologien und Schutzkriterien.	Dr.-Ing. Ernst-Dieter Wilkening
Elektrische Energieanlagen II	Thermische und mechanische Belastbarkeit von Betriebsmitteln, Verhalten der Netzspannung nach der Unterbrechung des Stromflusses und die Auswirkung auf die Schaltstrecke, Aufbau von verschiedenen Schaltgeräten und Sicherungen der unterschiedlichen Spannungsebenen, Aufbau von Schaltanlagen, Schutztechnik: Differentialschutz, Distanzschutz und Überstromschutz behandelt.	Dr.-Ing. Ernst-Dieter Wilkening
GSS – Aufbau und Berechnung von Gleichstromsystemen	Berechnung und Auslegung von Gleichstromnetzen, Betrieb von Gleichstromnetzen, Fehlerdetektion und -ortung, Anlagentechnik, Komponenten zur Stromerzeugung, Verteilung und Speicherung, Industrienetze, Inselnetze, Bordnetze	Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat

Vorlesung	Inhalt	Dozent
Grundlagen der elektrischen Energietechnik	Einführung in die Stromübertragung und -verteilung, Drehstromsysteme: Grundlagen und Berechnung, Transformatoren, Generatoren	Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat, Prof. Dr.-Ing. Markus Henke, Prof. Dr.-Ing. Regine Mallwitz
Electric Power Systems Engineering	Fundamental knowledge of Power Systems, Interpret / evaluate of texts and data from Power Systems, Formulate research problems, Select an adequate level of abstraction, Systematic approach, Use scientific theories and model concepts, Analyze social, economic or cultural consequences	Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat
HVDC Technology	Introduction to HVDC transmission systems, Operation of LCC and VSC based HVDC systems, Main components of HVDC converter stations, Interaction between AC and DC systems, Basic principles of modeling, analysis and control of dynamic systems, Control theory applications on HVDC Systems, Principles of developing DC grids, Use PSCAD/EMTDC as a simulation platform for power system analysis, Simulate and design various basic converter topologies, Perform basic control tests on HVDC systems	Dr.-Ing. Nasser Hemdan, Melanie Hoffmann

Vorlesungen: Arbeitsgruppe Energiesysteme

Vorlesung	Inhalt	Dozent
Innovative Energiesysteme	Rahmenbedingungen der Energiewende, Ausbau der Stromnetze, Beteiligung zukünftiger Erzeuger an den Systemdienstleistungen, Innovationen konventioneller Kraftwerke, Regenerative Energieformen, Virtuelle Kraftwerke und Demand Side Management, Zukunft elektrischer Speicher	Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel Dr.-Ing. Jonas Wussow
Elektrotechnik I für Maschinenbau	Einführung und Vermittlung von elektrotechnischen Grundlagen, Analyse und Berechnung von elektrostatischen Feldern, Gleichstromkreisen, Magnetfeldern, Eisenkreis, Laden von Elektrofahrzeugen, Gleichstrommaschine, Elektrische Sicherheit, Vertiefung der Lehrinhalte durch experimentelle Darstellung	Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel Dr.-Ing. Frank Soyck
Technologien der Verteilungsnetze	Rolle der Verteilungsnetze in der Energieversorgung, Netzstrukturen, Betriebsmittel (Kabel, Freileitungen, Transformatoren, Schaltanlagen), Schutzkonzepte, Systemdienstleistungen, Netzentgelte, Zukünftige Entwicklungen im Verteilnetz (Smart + X)	Dr.-Ing. Johannes Schmiesing
Energiewirtschaft und Marktintegration erneuerbarer Energien	Energiewirtschaft, Energiepolitik, Gesetze und Fördersysteme, Märkte (Strommarkt 2.0, Regelleistungsmarkt), Direktvermarktung / Bilanzkreismanagement, Virtuelles Kraftwerk, Großspeicher	Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel
Elektrische Bahnen	Wiederholung der relevanten Grundlagen der Elektrotechnik, Einführung in Schienenfahrzeugtechnik, Überblick Elektrische Bussysteme, Bahnstromsystemenational und international, DC und AC, Antriebe für elektrische Bahnen, Bremsen, Hilfsbetriebe, Signal-und Sicherungssysteme, Leittechnik auf Schienenfahrzeugen, Fahrgastinformation und Multimedia, Ausgeführte Fahrzeuge, Aktuelles und Entwicklungen	Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel
Elektrische Ausrüstung von Schienenfahrzeugen	Elektrische Traktion, Bremsen, Hilfsbetriebe, Signal-und Sicherungssysteme, Leittechnik auf Schienenfahrzeugen, Fahrgastinformation und Multimedia, Ausgeführte Fahrzeuge, Zukünftige Entwicklungen	Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel

Vorlesung	Inhalt	Dozent
Elektrische Grundlagen der Energietechnik für Umweltingenieure Teil 1 und 2	<p>Ab WiSe 21/22 „Elektrische Grundlagen der Energietechnik für das Verkehrs- und Umweltingenieurwesen“</p> <p>Elektrotechnische Grundlagen: Grundlagen des elektrischen und magnetischen Feldes, Grundzüge der Gleich- und Wechselstromnetze, Grundlagen elektrischer Energieversorgung, Komplexe Wechselstromrechnung und Drehstromsysteme, Netzbetriebsmittel und elektrische Sicherheit</p>	Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat, Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel, Prof. Dr.-Ing. Markus Henke
Systemtechnik in der Photovoltaik	Einführung in die Systemtechnik der Photovoltaik, Anlagenkonfigurationen, Wechselrichtertopologien, Funktionen der Wechselrichter, Weitere Komponenten der PV-Systemtechnik, Netzintegration von PV-Anlagen, Inselnetzanlagen, Netzgekoppelte PV-Anlagen mit Speicher, Zukünftige Entwicklungen	Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel
Elektrische Anlagen und Netze	Einführung in die elektrische Energieversorgung, elektrische Betriebsmittel wie Synchronmaschinen, Leistungsfluss- und symmetrische wie unsymmetrische Kurzschlussrechnungen, Stabilität, Sternpunktbehandlung, Schutzmaßnahmen	Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel
Regenerative Energietechnik	Grundlagen des Aufbaus des deutschen und europäischen Stromversorgungssystems und deren Komponenten, wie zum Beispiel Freileitungen, Kabel und Transformatoren, Technische Grundlagen des Netzbetriebes durch Netzbetreiber und deren Umgang mit Systemdienstleistungen, Überblick der Abläufe am deutschen Strommarkt und die Einflüsse durch die deutsche Energiewende, Einblick in die aktuellen und zukünftigen Herausforderungen durch die Transformation des Energieversorgungssystems in Deutschland	Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel
ÖPNV – Betrieb und Fahrzeuge	Grundlagen der Energietechnik, Grundlagen elektrische Maschinen, Mechanischer Antriebsstrang, Beispiele ausgeführte Fahrzeuge, Regionalstadtbahn Braunschweig, Innovative elektrische Busse	Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel
Regelung in der elektrischen Energieversorgung	Leitungsgleichungen für eine symmetrische Drehstromleitung, Ersatzschaltung, Wirk- und Blindstromübertragung, Statische und dynamische Stabilität, Vereinfachtes mathematisches Modell und Regelung der Synchronmaschine, Netzregelung (Wirkleistung, Frequenz, Blindleistung, Spannungen), Regelung von strom- und spannungseinprägenden Wechselrichtern, Systemdynamische Modelle	Dr.-Ing. Stefan Laudahn

Praktika

Labor	Inhalt	Dozent
Analyse, Simulation und Planung von Netzen	Einführung in die Netzberechnung und Einführung in PowerFactory, Statische Lastflussberechnung, Kurzschlussberechnung, Anschlussprüfung dezentraler Erzeugungseinheiten, Lastflussberechnung mit Profilen, Erstellung eines Simulationsmodells zur dynamischen Netzberechnung, Berechnungen zur Netzqualität	Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel
Elektromobilität	Batteriediagnostik, Elektrodenherstellung, Elektrodenpackaging, Leistungselektronik und elektrische Maschinen, Antriebsstrangsimulation	Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat
Hochspannungstechnik	Hochspannungsmesstechnik, Isolierstofftechnik, Erzeugung hoher Gleich- und Wechselspannung, Blitzstoßspannung, Durchschlaguntersuchungen, Einsatz von Augmented Reality	Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat
Innovative Energiesysteme	Photovoltaikzellen, PV-Wechselrichter, Inselnetzsysteme, Wärmepumpe, Energiemanagement	Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel

Seminare: Für Studierende

Labor	Inhalt	Dozent
Studienseminar Energiesysteme	Vortragsreihen und Präsentationstraining zu energietechnischen und energiewirtschaftlichen Themen	Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat, Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel
Seminar Elektrische Grundlagen der Energietechnik für Umweltingenieure	Technikfolgenbewertung	Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat, Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel, Prof. Dr.-Ing. Markus Henke

Seminare: Für Doktoranden

Labor	Inhalt	Dozent
Doktorandenseminar	Systemdenken kennen und verstehen, Verständnis der Systemtheorie, Nachhaltige Energiesysteme	Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat, Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel



Hochspannungsversuch Augmented Reality

Neuer Innovativer Versuche mit Augmented-Realitys

In vielen Laboren des elenia werden Hochspannungskomponenten eingesetzt und untersucht. In diesem Fall sind alle notwendigen Sicherheitsmaßnahmen und -einrichtungen zu verstehen und zu bedienen um Gefahren für Mensch und Umgebung zu gewährleisten. Das Hantieren solcher Komponenten und den entsprechenden Sicherheitsmaßnahmen werden anwendungsorientiert im Praktikum Hochspannungstechnik den Studierenden vermittelt. Dabei werden die Grundlagen zur Spannungserzeugung und -messung sowie Isolierstofftechnik an praktischen Versuchen durchgeführt.

Die Gefahren erkennen

Hohe elektrische Felder sind abhängig durch die Geometrie der Elektroden und der Spannung der Versuchseinrichtung. Elektrische Felder sind nicht sichtbar und daher bleiben die Gefahren in der Hochspannungstechnik oft unentdeckt. In den Versuchen des Praktikums Hochspannungstechnik werden typische Gefahren geschildert und anhand von Untersuchungen dargestellt. Durch die Komplexität der elektrischen Felder sind diese nur schwer zu verstehen. Daher wird in einem neuen Praktikumsversuch eine Augmented-Reality-Brille eingesetzt, die die elektrischen Felder sichtbar macht und so den Studierenden die Gefahren der hohen Spannungen didaktisch näherbringt. Bei der Unterstützung des Versuchs hat das Team von Jun.-Prof. Dr. Oliver Bodensiek vom Institut für Fachdidaktik der Naturwissenschaften geholfen.

Neuer Versuchsinhalt

In dem neuen Versuch wird an einer klassischen Hochspannungskomponente, der Kugel-Funkenstrecke eine Spannung so lange erhöht bis es zum sichtbaren und akustischen Durchschlag kommt, um die Gefahren aufzuzeigen.

In der Hochspannungstechnik müssen solche Durchschläge vermieden werden, um die Umgebung zu schützen. Das Vorhersagen solcher Durchschläge ist nur mit komplexen Berechnungen und Simulationen möglich. Um ein anwendungsorientiertes Verständnis für solche Phänomene zu schaffen soll das elektrische Feld sichtbar gemacht werden. Dadurch können Gefahren erkannt und abgeschätzt werden. Durch Studienqualitätsmitteln ist eine HoloLens-Brille der Firma Microsoft erworben, die dies ermöglicht. Die Brille wird live die Informationen der Spannungsmessung und der Geometrie der Versuchseinrichtung implementiert und kann anhand dieser Faktoren die elektrischen Feldlinien sowie die Äquipotentiallinien visualisieren. Dadurch wird eine sonst unsichtbare Gefahr erkannt und es können Gegenmaßnahmen eingerichtet werden. Weiterhin wird in dem neuen Versuch Kondensatoren aufgeladen und auf ihr gefährliches Ladeverhalten visuell hingewiesen, in dem mit der Brille die Spannungen an der kompletten Versuchseinrichtung dargestellt werden. Durch das Entladeverhalten von Kondensatoren kann auch nach sofortiger Abschaltung eine gewisse Restspannung vorhanden sein, die eine lebensbedrohliche Gefahr für Personen darstellt. Hinsichtlich der ersten erfolgreichen Anwendungen und Versuche sollen weitere Versuche entwickelt werden, die durch die Augmented-Reality-Brille sichtbar gemacht werden können.



Abbildung 1: Gefahren der elektrischen Felder an einer Kugel-Funkenstrecke
Abbildung 2: Fotografie durch die Augmented-Reality-Brille

LEHRVERANSTALTUNG

Praktikum Hochspannungstechnik

ART

Praktikum

LAUFZEIT

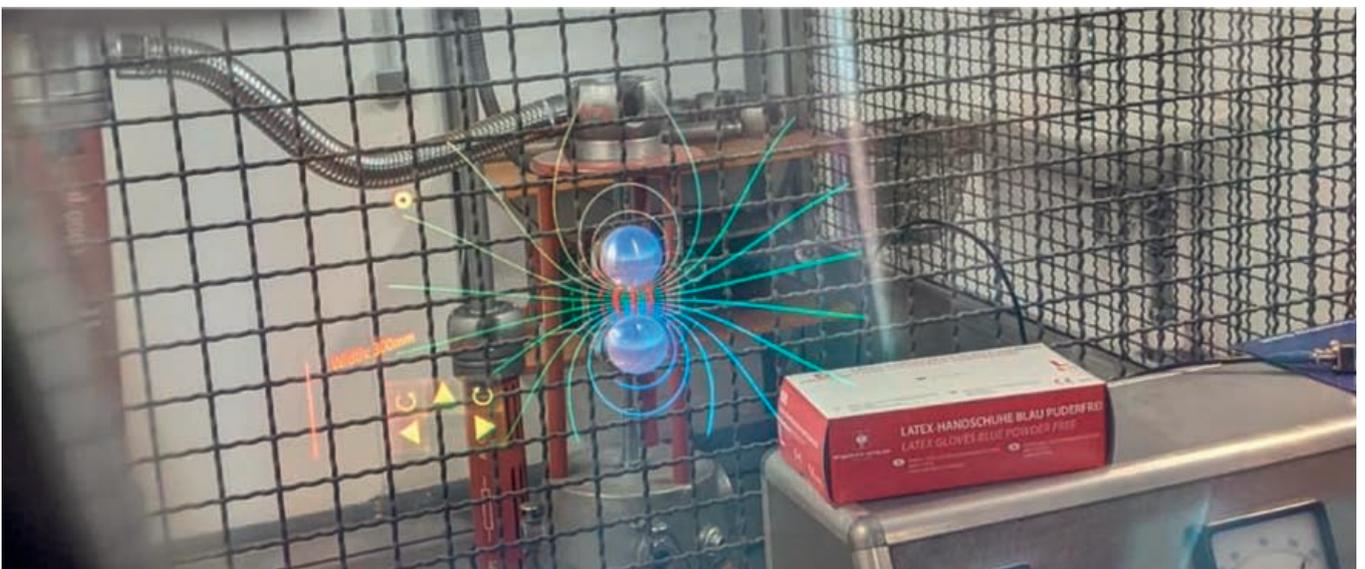
Jedes Wintersemester

ANSPRECHPARTNER / KONTAKT

Timo Meyer

✉ timo.meyer@tu-braunschweig.de

☎ +49 531 391-9739



Studentische Arbeiten 2020

Studienarbeiten

Autor*in	Titel der Arbeit
Chao Wei	Requirement Analysis for the Connection of Offshore Wind Farms in SysML with a subsequent Concept Study
Emil Weymann	Entwicklung und Vergleich von Regelungskonzepten zur Verringerung von schnellen Spannungsänderungen, Unsymmetrie, Flicker und Oberschwingungen im Niederspannungsnetz
Franca Dömer	Ansätze zur Modellierung von spannungsebenenübergreifenden Netz- Und Simulationsszenarien Im Kontext zukünftiger Netzentwicklungen in Deutschland
Kerstin Wetjen	Untersuchung rechtlicher und regulatorischer Rahmenbedingungen eines spannungsebenen- und netzbetreiberübergreifenden Blindleistungsmanagements
Lea Tesch	Steady-State-Modell für die thermische Gebäudesimulation nach DIN EN ISO 13790 (2009)
Marcel Lüdeck (BS Netz)	Konzept und Aufbau von Messwerterfassungen in Ortsnetzstationen – Übertragung, Speicherung, Auswertung und Erstellung eines Monitoring Systems

Bachelorarbeiten

Autor*in	Titel der Arbeit
Ahmed Madiouni	Erstellung von Prognosen für ein dynamisches Flottenlademanagement
Daniel Rausch (pe-systems)	Potentialabschätzung von Kleinwindkraftanlagen im internationalen Kontext und simulative Bewertung von möglichen Anwendungsbereichen
Felix Korff	Untersuchung der Effizienz der flächendeckenden Blindleistungsbereitstellung durch erneuerbare Energieanlagen in den unteren Netzebenen
Florian Pröpsting	Prüfung, Inbetriebnahme und Erprobung einer AC-Ladesäule in Laborumgebung
Frederike Paul	Entwurf und Evaluierung einer Methodik zur Modellierung von Einspeise- und Last-Zeitreihen aus aggregierten Messzeitreihen
Henrik Buhl	Preisbildung bei simultaner Mehrfachnutzung von Batteriespeichern in Mehrfamilienhäusern
Jannik Pohl (avacon)	Identifikation und Bewertung von Anwendungsfällen für die Nutzung detaillierter Verbrauchswerte von Haushaltskunden
Julius Rieckmann	Untersuchung der alterungsabhängigen Schnellladefähigkeit von Lithium-Ionen-Batterien mithilfe eines Batteriemodells
Kai Neumann	Anforderungsanalyse und Inbetriebnahme eines Blockierschalters für einen Weil-Dobke-Prüfkreis zur Prüfung von Leistungsschaltern
Karsten Laaken	Validierung der Qualitätsbewertung von Lithium-Ionen Batteriezellen im Wareneingang durch zyklische Alterung
Lia Stücke	Identifikation und Modellierung von PV-, PV-Batteriespeicher und Elektromobilitätsszenarien in hochintegrierten Quartiersenergiesystemen
Muhammad Kemal Ichwandi	System Structure Definition Including Component Analysis for HVDC Transmission System Development
Sarah Schnetzke	Entwicklung und Bewertung von Szenarien für eine nachhaltige Energieversorgung in der Landwirtschaft
Sönke Niemann (PTB)	Echtzeitsimulation der Zündfähigkeit eines explosionsfähigen Gasgemisches für den semi-empirischen Konformitätstest von eigensicheren elektrischen Geräten

Autor*in	Titel der Arbeit
Valentina Tognoli Gonzalez	Verification of Technical Requirements for a HVDC Grid Connection Topology as part of the Systems Engineering Methodology
Yvon Gouné	Sensitivitätsanalyse eines statischen Flottenlademanagements

Masterarbeiten

Autor*in	Titel der Arbeit
Alexander Stefani	Elektrochemische Untersuchung und Modellierung von Lithium-Ionen-Batterien mittels der Elektrochemischen Impedanzspektroskopie
Annika Stein	Untersuchung verschiedener Methoden zur elektro-thermischen Charakterisierung von Lithium-Ionen-Batterien
Chang Zhao	Entwicklung einer Methode zur Optimierung von HGÜ Netzanschlusskonzepten anhand eines Fallbeispiels
Christian Körte	Modellbildung von PEM-Brennstoffzellen für den Einsatz in All-Electric-Aircraft
Christoph Rempé	Analyse der Herausforderungen für induktives Laden und Entwicklung von Zukunftsszenarien
Clemens Schmidt	Analyse und allgemeingültige Bewertung der Spannungsqualität (schnelle Spannungsänderungen, Flicker, Unsymmetrie, Oberschwingungen) im Niederspannungsnetz
Daniel Kehl	Anpassung eines PXI basierten Batteriemanagementsystems für Lithium-Ionen-Batteriemodule zur Integration in einer Second-Life-Anwendung
Dawei Huang	Anwendbarkeitsstudie der Clusteranalyse zur Klassifizierung von Lithium-Ionen-Batteriezellen mittels Kenngrößen der Formierung
Demian Kufeld	Entwicklung und Validierung einer Methodik zur Prognose von Blindleistungsbedarfen in elektrischen Energieversorgungsnetzen
Fabian Herdle	Vergleich und Erhebung von entwicklungs- sowie nutzungsrelevanten Parametern von All-Solid-State-Batterien und Lithium-Ionen-Batterien
Fabian Katschewitz	Untersuchung des Kapazitätsnutzungsgrads von Lithium-Ionen-Batteriezellen unter verschiedenen Ladebedingungen
Felix Klabunde	Energetische Modellierung, Analyse und Bewertung landwirtschaftlicher Versorgungsstrukturen im Kontext der deutschen Energiewende
Franca Dömer	Untersuchung der Steigerung der Ressourceneffizienz im Bilanzsystem von abwassertechnischen Anlagen durch Sektorenkopplung
Gloria Kreft	Sektorenkopplung: Entwicklung eines Modells zur technisch-ökonomischen und praktisch umsetzbaren Konzeption eines Systems aus Photovoltaikanlage und Ladeinfrastruktur für gewerbliche Unternehmen
Heeba Shaheen	Optimierung der Begrenzungsspannung einer Multicarbon-Funkenstrecke mit niedrigem Schutzpegel für 48 V DC- Anwendungen
Heiko Köhler	Vermessung eines DC-Netzes und Analyse des transienten Verhaltens der elektrischen Größen zur Bestimmung des Fehlerortes unter Beeinflussung von leistungselektronischen Komponenten
Henning Köhler	Wirtschaftlichkeitsuntersuchung von Flexibilitätsoptionen im Kontext der Bilanzkreisbewirtschaftung
Joke Frerichs	Optimierte Bereitstellung von Flexibilität im Querverbund thermischer und elektrischer Erzeugungs- und Verbrauchseinheiten
Jonathan Ahrens	Charakterisierung von Li-Ion-Batterien aus Elektrofahrzeugen für Second-Use-Anwendungen

Autor*in	Titel der Arbeit
Justus Friedrich	Methodenentwicklung und Parameterbestimmung zur elektrochemischen Simulation von Lithium-Ionen-Zellen
Kenan Torunoglu	Investigation of a method for increased efficiency of the operation of large PV plants utilizing tap-changing transformers
Marcel Lüdecke (avacon)	Bewertung der Auswirkungen ausgewählter strombasierter Technologien auf den Sektor bezogenen Energieverbrauch und deren Treibhausgasemissionen im ländlichen Raum
Mariem Bedoui	Entwicklung eines dreiphasigen EV-Lademodells mit netzorientierten Funktionen in Python
Okan Özdemir	Spannungshaltungsverfahren eines netzbildenden Umrichters im Parallelbetrieb mit einem Synchrongenerator
Patrick Vieth	Untersuchung und Bestimmung von Optimierungspotentialen von Hybridschaltgeräten im Spannungsbereich bis 3 kV
Robin Langemann	Einsatzmöglichkeiten von Windenergieanlagen im Kontext von regenerativen Wärmeversorgungen
Simon Weinmann	Untersuchung des Parallelbetriebs von Strom- und spannungseinprägenden Umrichtersystemen zur statischen Spannungshaltung
Sitong Lu	Entwicklung eines elektro-thermischen Batteriemodells zur Ableitung von Schnellladeprofilen
Tianzhu Cang (PTB)	Measurement uncertainty determination of novel high-voltage impulse dividers
Torben Jennert	Charakterisierung von Lithium-Ionen-Batteriemodulen mittels elektrochemischer Impedanzspektroskopie
Yvonne Bruchmann	Verfahren zur Verbesserung der Spannungsqualität insbesondere der Unsymmetrie in der Niederspannung- Analyse und wirtschaftliche Einordnung

Studentische Arbeiten 2021

Praktikumsarbeiten

Autor*in	Titel der Arbeit
Manuel Wagner, Dimitry Suhanov	Entwicklung eines Ladekonzepts für alle Mitglieder der TU Braunschweig

Studienarbeiten

Autor*in	Titel der Arbeit
Christian Schläger	Entwicklung eines Softwaretools zur Bestimmung des elektrischen Flexibilitätspotenzials von thermischen Anlagen auf Haushaltsebene
Duc Anh Nguyen	Analyse und Modellierung regenerativ versorgter Elektrolyseure
Johann Fetkötter	Entwicklung von Anreizmechanismen für netzdienliches Verhalten privater Ladestationen im Verteilungsnetz auf Basis von Netzdaten
Justin Herdegen	Elektrochemische Modellierung und Simulation von Lithium-Ionen-Zellen

Bachelorarbeiten

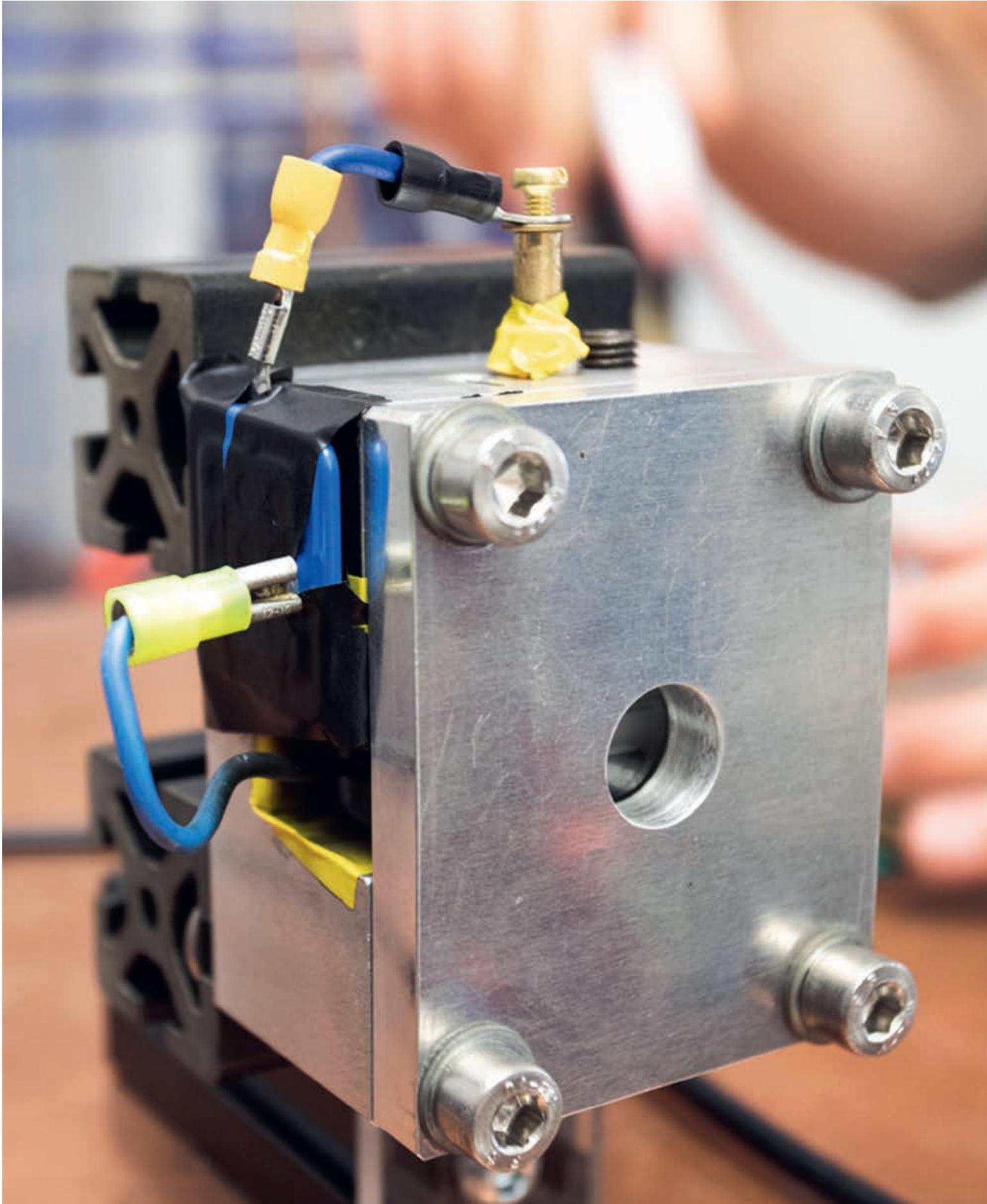
Autor*in	Titel der Arbeit
Alexandra Düe	Sanierung eines denkmalgeschützten Nicht-Wohngebäudes und Bewertung unterschiedlicher Versorgungsvarianten am Beispiel des Kreishauses Heide (Holst.)
Artur Schmidt	Modellierung und Analyse eines Brennstoffzellensystems im Gebäude
Chris Aaron Schneider	Entwicklung eines Messaufbaus zur Reduzierung der magnetischen Einkopplung durch Impulsströme
David Skorupa	Erstellung und Ansteuerung eines Laboraufbaus zur Validierung von Ladealgorithmen
Emmanuel-Wilson Bauni Kamga	Implementierung einer State Estimation im Kontext einer spannungsebenenübergreifenden Netzführung
Eray Cinkaya	Entwicklung eines Referenzmodells einer vermaschten HGÜ-Topologie für die Simulation von Betriebs-, Schutz- und Regelungskonzepten
Felten Feldt	Synchronisation, Messung und Digitalisierung der Emissionsspektren von Metaldampfplasma in Abhängigkeit von Zeit und Stromstärke
Firas Jmili	Lag bei Redaktionsschluss noch nicht vor
Frederike Paul	Entwurf und Evaluierung einer Methodik zur Modellierung von Einspeise- und Last-Zeitreihen aus aggregierten Messzeitreihen
Gengatharan, Garsan	Untersuchung des Zündverhaltens von Modellfunkenstrecken zur Bestimmung von Leitwert und Zündenergie
Huize Cheng	Planung und Konzeptionierung einer Schaltung zur optischen Strahlungsmessung
Julius Trützschler	Entwicklung eines Tools zur datengetriebenen Analyse und Auswertung von spannungsebenen- und netzbetreiberübergreifenden Netzdaten
Kevin Preißner	Entwicklung und Untersuchung eines breitbandigen Referenzspannungsteilers für 1400 V
Leonie Maria Brümmer	Entwicklung eines Fachkonzepts für eine digitale und kollaborative Forschungsplattform zur Stärkung der Energieforschung in Niedersachsen

Autor*in	Titel der Arbeit
Manuel Hernandez Manas	Requirements Engineering for Scaled Laboratory MTDC Systems
Maximilian Jantos	Technische und wirtschaftliche Analyse der Power-to-X-Nutzung im Kontext einer 9 MW Photovoltaikanlage
Merle Heinrichs	Analyse von netzdienlichen Betriebskonzepten eines Batteriespeichers bei der Herstellung von grünem Wasserstoff
Philipp Barner	Marktuntersuchung aktueller Wärmepumpensysteme auf Haushaltsebene mit Fokus auf die Beeinflussung des Spannungsbandes
Redlich, Daniel	Methodische Entwicklung und Analyse zukünftiger Netzzenarien für ein Modell eines realen Hochspannungsnetzes
Rico Wosnitza	Analyse von transienten Überspannungen im DC-Netz
Sebastian Brauer	Verwendung von Open-Source- Ansätzen zur Umsetzung von Betriebsstrategien zur simultanen Mehrfachnutzung von Speichersystemen in Mehrfamilienhäusern und Quartieren
Stefanie Walujski	Umsetzung einer geeigneten Netzlast für dynamische Laboruntersuchungen in einem Echtzeitsystem
Timo Haakert	Untersuchung dynamischer Öffnungskurven von Vakuumschaltern mittels eines regelbaren Servomotors
Xuan Thien Le	Ermittlung der Betriebscharakteristik eines Batteriespeichers
Yu Zhang	Untersuchung der elektrischen Festigkeit einer Vakuum-Modellanordnung

Masterarbeiten

Autor*in	Titel der Arbeit
Andre Rehbock	Lag bei Redaktionsschluss noch nicht vor
Anna-Lena Müller	Erstellung eines regenerativen und nachhaltigen Energiekonzeptes für ein Bestandsgebäude mittels Systems Engineering
Behrooz Moeilsiahrodkolai	Untersuchung möglicher Beiträge zur Frequenzhaltung durch stromgeregelte Umrichter im Netzwiederaufbau
Chao Wei	Requirement Validation of a Grid Connection System for Offshore Wind Farms as part of the Systems Engineering Methodology
Christopher Prange	Zeitabhängige Computersimulationen zur Untersuchung der Vorgänge eines Lichtbogenplasmas in Luft
Dennis Uhde	Umsetzung und Untersuchung von Regelungen zur Verbesserung der Spannungsqualität insbesondere der Unsymmetrie im Niederspannungsnetz
Fabian Kabus	Methodenentwicklung zur effizienten Ermittlung von elektro-thermischen Eigenschaften von Lithium-Ionen-Batterien
Guannan Xin	Entwicklung einer kompakten Ladeschaltung für einen Weil-Dobke-Schwingkreis
Marvin Hugo	Quasistationäre Beschreibung einer örtlichen Leitfähigkeitsverteilung und weiterer Plasmaeigenschaften in einer Modellfunkenstrecke unter Stoßstrombelastung
Jens Brüggemann	Untersuchung der Frequenzstabilität mittels einer Power Hardware-in-the-loop Systems
Julian Studt	Modellierung und Evaluation statistischer und maschinell lernender Methoden zur Prognose von elektrischen Spotmarktpreisen
Julian Wehr	Untersuchung der Beeinflussung von Inselnetzerkennungsverfahren von Bestandsumrichtern im Verbundbetrieb mit netzbildenden Wechselrichtern

Autor*in	Titel der Arbeit
Keno Brüning	Analyse der geographischen Verteilung von Wind- und solarer Einspeisung und deren Einflüsse auf das elektrische Energienetz
Kerstin Wetjen	Entwicklung und Untersuchung von Fallback-Strategien im Falle von Kommunikationsunterbrechungen in elektrischen Energieversorgungsnetzen
Lars Groppe	Konzeptionierung, Entwicklung und Erprobung von erzeugungsorientierten Ladealgorithmen
Lenard Faber	Modellbasierte Entwicklung und Erprobung verschiedener Schnelladestrategien im Rahmen der Formierung von Lithium-Ionen-Batterien
Maik Kahn	Methodische Entwicklung zur Etablierung des High Potential Tests als Qualitätstest in der Batteriezellproduktion
Mariem Bedoui	Entwicklung eines dreiphasigen EV-Lademodells mit netzorientierten Funktionen in Python
Marius Matern	Entwicklung und Validierung einer Methodik zur Vorhersage der Blindleistung in elektrischen Energiesystemen unter Anwendung eines maschinell lernenden Prognoseverfahrens
Mike Stefan Skroch	Erstellung typischer Fahrprofile von Kraftfahrzeugen und Hot-Spot-Analyse von Ladepunkten und -Zeiten auf Basis empirischer Daten
Niklas Bestian	Unsymmetrie in verschiedenen Niederspannungsnetzen unter Berücksichtigung der Elektromobilitäts- und der Wärmeentwicklung — technische und wirtschaftliche Simulation und Analyse
Nils Menebröker	Entwicklung von Formierungsstrategien für Hochenergiebatteriezellen und Evaluierung der elektrochemischen Performance
Oliver Landrath	Theoretische Untersuchungen der Plasma Elektrodenkopplung eines Lichtbogenplasmas in Luft mit Computersimulationen
Paul Hendrik Sasse	Optische und messtechnische Untersuchung der Wiederkehrspannung einer gekapselten Modella-nordnung nach Strombelastungen im Betriebsbereich eines LVDC Hybridschalters
Rene Schilling Johnson	Entwicklung von Verfahren zur Inselnetzerkennung durch spannungseinprägende Umrichter im Verbundbetrieb mit Bestandsanlagen
Robin Herman	Messung, Auswertung und Bewertung der Auswirkungen von Komponenten auf Spannungsqualitätsmerkmale im Niederspannungsnetz
Saleh Abolaila	Entwicklung und Validierung eines Evaluationsschemas für Bereitstellung von Systemdienstleistungen durch umrichtergekoppelte Erzeugungsanlagen
Tim Göttert	Technisch-wirtschaftliche Bewertung der Bereitstellung von Momentanreserve durch leistungselektronische Systeme
Timo Sauer	Strombegrenzung von spannungseinprägenden Wechselrichtern in Netzfehlersituationen mittels eines Power Hardware-in-the-Loop Systems
Tom Hemme	Vergleich von Formierungsstrategien für Lithium-Ionen Batteriezellen hinsichtlich der elektrochemischen Performance
Xiaoyu Li	Bewertung gezielter Binderanteilsvariation in mehrlagigen Silizium-Graphit-Anoden und Evaluierung des Einflusses auf die elektrochemische Performance und Tortuosität
Xin Cheng	Modellbildung eines 1 kV DC Labornetzes mittels Systemanalyse und statistischer Versuchsplanung
Ziang Wang	Identifikation, Analyse und Umsetzung von Betriebsstrategien zur simultanen Mehrfachnutzung von Speichersystemen in Mehrfamilienhäusern und Quartieren



Chronologie

Veröffentlichungen 2020	154
Veröffentlichungen 2021	156
Veranstaltungen und Events	158
Beteiligung an der Selbstverwaltung 2020	162
Beteiligung an der Selbstverwaltung 2021	163
Impressum	164

Veröffentlichungen 2020

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

Breaking operations of a vacuum test interrupter setup using a common servo drive with belt transmission

TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY 2020. JG.(2020).

Drees, R., Kurrat, M.:

Model-based Fast Charging Formation

BATTERIEFORUM DEUTSCHLAND, BERLIN, 22.–24. JANUAR 2020

Biedermann, C., Simon, S., Vanselow, A., Przibylla, J., Golobart, M., Modica, G., Garn, T., Willenberg, D., Witzmann, R., Engel, B.:

Spannungsqualität vor dem Hintergrund des Anstiegs an Photovoltaik, Elektrofahrzeugen, PV-Batteriespeichersystemen und Power-to-Heat

ENERGY FOR FUTURE – WEGE ZUR KLIMANEUTRALITÄT, ENINNOV2020–16. SYMPOSIUM ENERGIEINNOVATION, GRAZ, GRAZ/AUSTRIA: VERLAG DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT GRAZ, 12.–14. FEBRUAR 2020, S. 88–89. ISBN 978-3-85125-734-2

Reinhold, C., Ries, J., Kahl, L., Hadlak, M., Engel, B.:

Einsatz netzdienlicher Flexibilität im koordinierten Verteilnetzbetrieb aus elektrischen und thermischen Anlagen in Gebäuden

ENERGY FOR FUTURE – WEGE ZUR KLIMANEUTRALITÄT, ENINNOV2020–16. SYMPOSIUM ENERGIEINNOVATION, GRAZ/AUSTRIA, GRAZ: VERLAG DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT GRAZ, 12.–14. FEBRUAR 2020, S. 307–308. ISBN 978-3-85125-734-2

Ries, J., Reinhold, C., Engel, B., Roos, M.:

Prosumer im Netzbetrieb der Zukunft

EU-Projekt: PV-PROSUMERS4GRID (PVP4GRID), BERLIN, 1. MARCH 2020

Schefer, H., Fauth, L., Kopp, T. H., Mallwitz, R., Friebe, J. und Kurrat, M.:

Discussion on Electric Power Supply Systems for All Electric Aircraft

IEEE ACCESS, VOL. 8, PP. 84188–84216, 2020, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2991804

Lotz, M., Hoffmann, M., Könemund, M.:

A Closed-Loop Power-Hardware-in-the-Loop Testbed for Low Voltage Modular Multilevel Converter Design Validation

PCIM EUROPE DIGITAL DAYS 2020, PCIM EUROPE DIGITAL DAYS 2020–INTERNATIONAL EXHIBITION AND CONFERENCE FOR POWER ELECTRONICS, INTELLIGENT MOTION, RENEWABLE ENERGY AND ENERGY MANAGEMENT, DEUTSCHLAND, 7.–8. JULI 2020, S. 103. ISBN 978-3-8007-5245-4

Puls, S, Hegerfeld, J., Austermann,

J., Borcherdig, H.:

Transient Overvoltage Protection Solutions for Drive Inverters operating on an Open Industrial DC Grid

PCIM EUROPE DIGITAL DAYS 2020, PCIM EUROPE DIGITAL DAYS 2020–INTERNATIONAL EXHIBITION AND CONFERENCE FOR POWER ELECTRONICS, INTELLIGENT MOTION, RENEWABLE ENERGY AND ENERGY MANAGEMENT, DEUTSCHLAND, 7.–8. JULI 2020, S. 1–8. ISBN 978-3-8007-5245-4

Schierding, C., Möckel, D., Thedens, M., Beyer, M., Kurrat, M.:

Further developments of metrological and simulation-based characterization of the non-contact measurement of electrostatic charge by means of electric field meters

PROCEEDINGS OF THE 21ST INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING VOLUME 1, 21ST INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING, BUDAPEST, HUNGARY, SWITZERLAND: SPRINGER NATURE SWITZERLAND AG, 25.–29. AUGUST 2019, S. 55–66. ISBN 978-3-030-31675-4

Claaßen, L., Anspach, F., Wilkening, E., Kurrat, M.:

Investigation of a Mechanical Switch within a Hybrid Circuit Breaker for Protection in DC Grids

2020 IEEE 66TH HOLM CONFERENCE ON ELECTRICAL CONTACTS AND INTENSIVE COURSE (HLM), SAN ANTONIO, TX, USA, 30. SEPTEMBER–7. OCTOBER 2020. DOI: 10.1109/HLM49214.2020.9307840

Klabunde, F., Reinhold, C., Engel, B.:

Modelling and Simulation of All-Electric Machines and Renewable Electric Power Systems in Agricultural Operations

PROCEEDINGS ASIM SST 2020, 25. SYMPOSIUM SIMULATIONSTECHNIK, VIRTUELL, 14.–15. OCTOBER 2020, S. 273–280. ISBN 9783901608933. DOI: 10.11128/AREP.59.A59039

Wagner, H., Wussow, J., Engel, B.:

NOVA Measures in Suburban Low Voltage Grids with an Inhomogeneous Distribution of Electric Vehicles

E-MOBILITY INTEGRATION SYMPOSIUM, DIGITAL, 3. NOVEMBER 2020

Kehl, D., Jennert, T., Lienesch, F., Kurrat, M.:

Characterization of Li-Ion battery modules for second-life applications

INTERNATIONAL BATTERY PRODUCTION CONFERENCE, BRAUNSCHWEIG, 2.–4. NOVEMBER 2020

Hoffmann, L., Ryll, K., Doose, S.:

Classification and risk assessment of lithium-ion battery cells by parameter-based methods

INTERNATIONAL BATTERY PRODUCTION CONFERENCE, PRESENTATION, BRAUNSCHWEIG, 2.–4. NOVEMBER 2020

Drees, R., Kurrat, M.:

Electro-thermal Optimization of Safe Fast Charging Strategies

IBPC 2020 – INTERNATIONAL BATTERY PRODUCTION CONFERENCE, BRAUNSCHWEIG, 2.–4. NOVEMBER 2020

Meyer, T., Weber, B., Gentsch, D., Kurrat, M.:

Design of experiments for characterization of a high voltage circuit generating a transient recovery voltage

VDE HIGH VOLTAGE TECHNOLOGY, BERLIN, 9.–11. NOVEMBER 2020. P-ISSN: 978-3-8007-5353-6

Anspach, F., Claaßen, L., Wilkening, E., Kurrat, M.:

Overview about different 500 V low voltage DC-Switchgear topologies and comparison of their switch off performance

VDE HIGH VOLTAGE TECHNOLOGY 2020; ETG-SYMPOSIUM, BERLIN, 9.–11. NOVEMBER 2020. ISBN 978-3-8007-5353-6

Rauscher, F., Sauer, T., Engel, B.:

Experimental validation of current limitation methods for grid forming inverters

VIRTUAL 19TH WIND INTEGRATION WORKSHOP, ONLINE, 11.–12. NOVEMBER 2020

Qudaih, M., Engel, B., Truijen, D., De Kooning, J., Stockman, K., Hoffstädt, J., Jarquin-Laguna, A., Ansorena Ruiz, R., Goseberg, N., Bricker, J., Fahlbeck, J., Nilsson, H., Bossi, L., Joseph, M., Zangeneh, M.:

THE CONTRIBUTION OF LOW-HEAD PUMPED HYDRO STORAGE TO A SUCCESSFUL ENERGY TRANSITION, DE-CARBONIZATION OF ENERGY SECTORS

VIRTUAL 19TH WIND INTEGRATION WORKSHOP, ONLINE, 11.–12. NOVEMBER 2020, S. 1–8

Lotz, M., Kurrat, M.:

Evaluation of Temporary Overvoltages Considering Current Standards and Regulations with Extensive Renewables Integration, 2020.

Schierding, C., Thedens, M., Beyer, M.:

Measurement Uncertainty Consideration of Electric Field

SMSI 2020 – SYSTEM OF UNITS AND METROLOGICAL INFRASTRUCTURE, SMSI 2020, S. 382–383. ISBN 978-3-9819376-2-6

Bösche, D., Wilkening, E.:

Method for detecting a current caused by a fault

APPLICATION NO. EP20710900, PUBLICATION NO. WO2020212021, 2020

Hoffmann, M., Chamorro, H., Lotz, M., Maestre, J., Rouzbehi, K., Gonzalez-Longatt, F., Kurrat, M., Alvarado-Barrios, L., Sood, V.:

Grid Code-Dependent Frequency Control Optimization in Multi-Terminal DC Networks

HG. VON ENERGIES, 13. AUFL., SWITZERLAND: MDPI, 2020. ISBN

M. Alija, Y. Cressault, P. Teulet, M. Kurrat:
Thermodynamic and Transport properties for Air and Argon thermal plasmas at atmospheric pressure

SEMINAR TALK, UNIVERSITÉ TOULOUSE III – PAUL SABATIER, FRANCE, 9. DECEMBER 2020

Winter, Björn Oliver; Engel, Bernd (2020):
Voltage imbalance resilience and mitigation using grid forming inverters in low-voltage distribution grids.

ENERGYNAUTICS GMBH (HG.): 10TH SOLAR & STORAGE INTEGRATION WORKSHOP. INTERNATIONAL WORKSHOP ON INTEGRATION OF SOLAR POWER AND STORAGE INTO POWER SYSTEMS. 10TH SOLAR & STORAGE INTEGRATION WORKSHOP. DARMSTADT, GERMANY, 05.11.2020. ONLINE VERFÜGBAR UNTER [HTTPS://WWW.RESEARCHGATE.NET/PUBLICATION/349138829_VOLTAGE_IMBALANCE_RESILIENCE_AND_MITIGATION_USING_GRID_FORMING_INVERTERS_IN_LOW_VOLTAGE_DISTRIBUTION_GRIDS](https://www.researchgate.net/publication/349138829_VOLTAGE_IMBALANCE_RESILIENCE_AND_MITIGATION_USING_GRID_FORMING_INVERTERS_IN_LOW_VOLTAGE_DISTRIBUTION_GRIDS).

Rauscher, Florian; Winter, Björn Oliver; Seidel, Julia; Engel, Bernd (2020):

Bewertung verschiedener Regelungsansätze für Speichersysteme zur Verbesserung der Kurzzeitfrequenzstabilität.

ENINNOV2020 TU GRAZ (HG.): 16. SYMPOSIUM ENERGIEINNOVATION 2020. 16. SYMPOSIUM ENERGIEINNOVATION 2020. GRAZ, 12.02.–14.02. ONLINE VERFÜGBAR UNTER [HTTPS://WWW.TUGRAZ.AT/FILEADMIN/USER_UPLOAD/TUGRAZEXTERNAL/4778F047-2E50-4E9E-B72D-E5AF373F95A4/FILES/LF/SESSION_H6/866_LF_RAUSCHER.PDF](https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/tugrazexternal/4778f047-2e50-4e9e-b72d-e5af373f95a4/files/lf/session_h6/866_LF_RAUSCHER.PDF).

M. R. Lotz, M. Kohn, T. Öznur and M. Könemund:

Hardware-in-the-Loop Setup for Low Voltage Modular Multilevel Converter Control Development

2020 IEEE 29TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INDUSTRIAL ELECTRONICS (ISIE), 2020, PP. 126–133, DOI: 10.1109/ISIE45063.2020.9152270

M. R. Lotz, M. Hoffmann and M. Könemund:

A Closed-Loop Power-Hardware-in-the-Loop Testbed for Low Voltage Modular Multilevel Converter Design Validation

PCIM EUROPE DIGITAL DAYS 2020; INTERNATIONAL EXHIBITION AND CONFERENCE FOR POWER ELECTRONICS, INTELLIGENT MOTION, RENEWABLE ENERGY AND ENERGY MANAGEMENT, 2020, PP. 1–8.

M. R. Lotz:

Power-Hardware-in-the-Loop Tests of DC Systems in Scaled Laboratory Environments RT20 VIRTUAL EDITION. 12TH CONFERENCE ON REAL-TIME SIMULATION. OPAL-RT. 2020

Veröffentlichungen 2021

Klabunde, F., Reinhold, C., Engel, B.:

Simulative Untersuchung der Netzintegration von vollelektrischer Landmaschinen in ländliche Verteilnetze

TAGUNGSBAND ZUKÜNFTIGE STROMNETZE 2021, ZUKÜNFTIGE STROMNETZE, ONLINE, 27. JANUAR–4. FEBRUAR 2021, S. 280–300. ISBN 978-3-948176-12-9

Drees, R., Kurrat, M.:

Modellbasierte Auslegung von sicheren Schnellladestrategien für Lithium-Ionen-Batterien

HEV HYBRID AND ELECTRIC VEHICLES 2021, ONLINE-KONFERENZ, 23.–24. FEBRUAR 2021

Biedermann, C., Modica, G.,

Przibylla, J., Engel, B.:

Messung und Bewertung der Netzrückwirkungen von neuartigen elektrischen Erzeugern und Verbrauchern im Niederspannungsnetz – im Projekt U-Quality

ZUKÜNFTIGE STROMNETZE, ONLINE (BERLIN), BERLIN: CONEXIO, 27. JANUAR–4. MARCH 2021, S. 128–147. ISBN 978-3-948176-12-9

M. Alija, Y. Cressault, P. Teulet, M. Kurrat:

Calculation of thermophysical properties and computational modeling for higher temperature and pressure air plasma

SICT PLASMATECH 2021 JOINT CONFERENCE, PARIS, FRANCE, 7.–9. APRIL 2021

Kehl, D., Lienesch, F., Kurrat, M.:

PXI based second-life battery management and characterization system

ADVANCED BATTERY POWER, DIGITAL, 28.–29. APRIL 2021

Drees, R., Kurrat, M.:

Model-based Design and Assessment of optimized Fast Charging Strategies for the Formation of Lithium-Ion Batteries

ADVANCED BATTERY POWER 2021, DIGITAL, 28.–29. APRIL 2021

Modica, G., Biedermann, C.,

Garn, T., Engel, B.:

Influence of Electric Vehicles, PV Systems, Home Storage Systems and Heat Pumps on the Voltage Quality in the Low-Voltage Grid

ETG-FB. 163: ETG-KONGRESS 2021, ETG KONGRESS 2021, ONLINE (WUPPERTAL), FRANKFURT: VDE VERLAG, 18.–19. MAI 2021, S. 1–6. ISBN 978-3-8007-5549-3

Hadlak, M., Reinhold, C., Ries, J.,

Wagner, H., Engel, B., Herr, H.:

Regulatory Framework for Sales Options of Flexibilities at Distribution Grid Level

ETG KONGRESS, DIGITAL, 18.–19. MAI 2021, S. 744–748. ISBN 978-3-8007-5549-3

Wussow, J., Babazadeh, D., Beutel, V.,

Buchholz, S., Geissendörfer, S., Gerlach, J.,

Majumdar, N., Maydell, K., Narayan, A.,

Hoffmann, M., Kahl, L. (Paper),

Leveringhaus, T., Lotz, M., Scheunert, A.,

Teimourzadeh Baboli, P., Tiemann, P.,

Huxoll, N., Wegkamp, C. (Vortrag),

Werth, O., Agert, C., Breitner, M., Engel, B.,

Hoffmann, L., Könemund, M., Kurrat, M.,

Lehnhoff, S., Nieße, A., Weyer, H.:

SiNED-Ancillary Services for Reliable Power Grids in Times of Progressive German Energiewende and Digital Transformation

ETG KONGRESS, DIGITAL, 18.–19. MAI 2021

Hoffmann, M., Wei, C., Kurrat, M.:

Requirement Analysis with SysML for Concept Design of Offshore Wind Farm Grid Connection

VDE ETG KONGRESS 2021, DIGITAL, 18.–19. MAI 2021

Anspach, F., Vieth, P., Claaßen, L.,

Bösche, D., Wilkening, E., Kurrat, M.:

Investigation and Optimization of a Hybrid Circuit Breaker for Low- and Medium Voltage DC-Grids

PROCEEDINGS ICEC 2020, 30TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL CONTACTS, ST. GALLEN / RORSCHACH, 7.–11. JUNE 2021, S. 141–148. ISBN 978-3-907255-11-7

Steens, T., Telle, J., Hanke, B., von

Maydell, K., Agert, C., Modica,

G., Engel, B., Grottke, M.:

A Forecast-Based Load Management Approach for Commercial Buildings Demonstrated on an Integration of BEV

ENERGIES 14. JG.(2021), H. 12, S. 3576–3601. DOI: [HTTPS://DOI.ORG/10.3390/EN14123576](https://doi.org/10.3390/EN14123576)

M. Alija, Y. Cressault, P. Teulet,

A. Hleli, M. Kurrat:

Thermophysical and radiative properties of an air arc plasma for high pressure and temperature

15ÈME COLLOQUE SUR LES ARCS ELECTRIQUES CAE 15, CORIA-ROUEN, FRANCE, 28.–29. JUNE 2021

Rebak, E., Winter, B. O., Engel, B.:

Grid-friendly fallback strategy for prosumer households in case of wide-spread communication failures

NEIS 2021, HAMBURG, 13.–14. SEPTEMBER 2021

Weber, B., Kühn, B., Gentsch,

D., Kurrat, M.:

Investigation of vacuum arcs between with varying gaps up to 40 mm, XXIX Int. Symp. on Discharge and Electrical Insulation in Vacuum

ISDEIV, PADUA, IEEE, 26. SEPTEMBER–1. OCTOBER 2021, S. 0. ISBN TBA

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

Computer-aided evaluation of movement and appearance of vacuum arcs, XXIX Int. Symp. on Discharge and Electrical Insulation in Vacuum

ISDEIV, PADUA, IEEE, 26. SEPTEMBER–1. OCTOBER 2021, S. 0. ISBN TBA

Meyer, T., Kühn, B., Gentsch,

D., Kurrat, M.:

Lightning impulse conditioning of a combined field grading and shielding arrangement for vacuum double break

29TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON DISCHARGE AND ELECTRICAL INSULATION IN VACUUM (ISDEIV), PADOVA, ITALIEN, 26. SEPTEMBER–1. OCTOBER 2021

Kühn, B., Kopp, T., Weber, B., Dorsch, C., Kurrat, M., Hinrichsen, V.:
Physical characterization of the optical transmission path for digital high-speed camera observation of vacuum arcs
XXIX INT. SYMP. ON DISCHARGE AND ELECTRICAL INSULATION IN VACUUM, ISDEIV, PADUA, IEEE, 26. SEPTEMBER–1. OCTOBER 2021

Kehl, D., Jennert, T., Lienesch, F., Kurrat, M.:
Electrical Characterization of Li-Ion Battery Modules for Second-Life Applications
BATTERIES 2021. JG.(2021), S. 1–15. DOI: [HTTPS://DOI.ORG/10.3390/BATTERIES7020032](https://doi.org/10.3390/BATTERIES7020032)

Drees, R., Lienesch, F., Kurrat, M.:
Fast charging lithium-ion battery formation based on simulations with an electrode equivalent circuit model
JOURNAL OF ENERGY STORAGE 0. JG.(2021), H. 102345, S. 1–10. DOI: [DOI.ORG/10.1016/J.EST.2021.102345](https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102345)

Klabunde, F., Reinhold, C., Engel, B.:
Modelling and Simulation of All-Electric Machines and Renewable Electric Power Systems in Agricultural Operations
SNE SIMULATION NOTES EUROPE 31. JG.(2021), H. 2, S. 57–64. DOI: [10.111128/SNE.31.TN.10562](https://doi.org/10.111128/SNE.31.TN.10562). E-ISSN: 2306-0271. P-ISSN: 2305-9974

Hoffmann, L., Kasper, M., Kahn, M., Ventura Silva, G., Gramse, G., Herrmann, C., Kurrat, M., Kienberger, F.:
High Potential Test for Quality Control of Separator Defects in Battery Cell Production
BATTERIES 2021 JG.(2021), 7, 1–12. [HTTPS://DOI.ORG/10.3390/XXXXX](https://doi.org/10.3390/XXXXX), E-ISSN: 2313-0105

Seidel, J., Rauscher, F., Engel, B.:
Enhanced Contribution of Photovoltaic Power Systems to Frequency Control in Future Power Systems
IET RENEWABLE POWER GENERATION 2021

Modica, G., Choi, W., Dietrich, T., Ebbert, L., Effenberger, R., Meins, J., Schillingmann, H., Wussow, J., Engel, B., Henke, M.:
LISA4CL – Development and Grid Integration of an Inductive Charging System for City Logistics
NEIS 2021 — CONFERENCE ON SUSTAINABLE ENERGY SUPPLY AND ENERGY STORAGE SYSTEMS, DIGITAL, 13.–14. SEPTEMBER 2021

Rauscher, F., Nuschke, M., Engel, B.:
Determination of the damping and inertia time constant of grid forming inverters by laboratory measurements
NEIS 2021, HAMBURG, 13.–14. SEPTEMBER 2021

Schuster, M., Kufeld, D. N., Koeppe, H., Engel, B.:
Development Approach for Short-term Forecasting of Reactive Power at the Interface Distribution and Transmission Grid
ETG KONGRESS, DIGITAL, 18.–19. MAI 2021, S. 222–227. ISBN 978-3-8007-5549-3

Wagner, Henrik; Eckhoff, Sarah; Fayed, Sarah; Penaherrera V., Fernando; Ofenloch, Annika; Werth, Oliver et al. (2021):
Analysis of the Grid Capacity for Electric Vehicles in Districts with a Major Need for Sustainable Energy Refuelling: The Case of a District in Lower Saxony
GESELLSCHAFT FÜR INFORMATIK (HG.): ENVIROINFO 2021. BERLIN, 27.–29. SEPTEMBER 2021

Anspach, F., Vieth, P., Bösch, D., Claaßen, L., Wilkening, E.D., Kurrat, M.:
Presentation of a novel and laboratory proved method to determine efficiently the minimum deionization time in hybrid circuit contactor
2021 IEEE 67TH HOLM CONFERENCE ON ELECTRICAL CONTACTS (HLM)

Ryll, K., Hoffmann, L., Landrath, O., Lienesch, F., Kurrat, M.:
Key Figure Based Incoming Inspection of Lithium-Ion Battery Cells
BATTERIES 2021. JG.(2021), S. 1–22. DOI: [HTTPS://DOI.ORG/10.3390/BATTERIES7010009](https://doi.org/10.3390/BATTERIES7010009)

Winter, Björn Oliver; Torunoglu, Kenan; Hussain, Waqas; Vielhauer, Armin; Engel, Bernd (2021):
Increasing energy yield of PV Parks by controlling On-Load Tap Changers to optimize inverter utilization
INTERNATIONAL ASSOCIATION ON ENVIRONMENT AND ELECTRICAL ENGINEERING (HG.): 21ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENT AND ELECTRICAL ENGINEERING (EEEIC2021). EEEIC2021 BARI. BARI, ITALY, 07.09.2021. IEEE.

Winter, Björn Oliver; Rauscher, Florian; Engel, Bernd (2021):
Islanding Dependencies and Detection in low-Voltage grids with grid forming Inverters
THE IET (HG.): RENEWABLE POWER GENERATION CONFERENCE (RPG DUBLIN). RPG DUBLIN, 01.03.2021.

M. R. Lotz and M. Kurrat:
Evaluation of Temporary Overvoltages Considering Current Standards and Regulations with Extensive Renewables Integration
ETG CONGRESS 2021, 2021, PP. 1–6.

M. R. Lotz and M. Könemund:
Challenges of Commutation Cell Tests with Voltage Source Inverters in Power-Hardware-in-the-Loop Simulations
PCIM EUROPE DIGITAL DAYS 2021; INTERNATIONAL EXHIBITION AND CONFERENCE FOR POWER ELECTRONICS, INTELLIGENT MOTION, RENEWABLE ENERGY AND ENERGY MANAGEMENT, 2021, PP. 1–8.

M. R. Lotz and M. Könemund:
A System-in-the-Loop Methodology for the Validation of DC-Connected Converters
2021 IEEE FOURTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON DC MICROGRIDS (ICDCM), 2021, PP. 1–8, DOI: [10.1109/ICDCM50975.2021.9504636](https://doi.org/10.1109/ICDCM50975.2021.9504636)

M. R. Lotz et al.:
Potentials and Technical Requirements for the Provision of Ancillary Services in Future Power Systems with Distributed Energy Resources
NEIS 2021, CONFERENCE ON SUSTAINABLE ENERGY SUPPLY AND ENERGY STORAGE SYSTEMS, SEPTEMBER 2020, IEEE CONFERENCE.

Veranstaltungen und Events 2020

07.01.2020

„Einsatzmöglichkeiten eines batterieelektrischen Triebzugs im Raum Braunschweig“, VDI-AK Bahntechnik Vortragsreihe (WS2019/2020) an der TU Braunschweig „Zukunft der Mobilität in Niedersachsen“
B. ENGEL

08.01.2020

VDE-Vorstands- u. Beirats-sitzung
M. KURRAT

13. und 14.01.2020

Doktorandensymposium (PTB)
B. ENGEL, M. KURRAT

22.01.2020

VDE-Neujahrsempfang
B. ENGEL, M. KURRAT

22.01.2020

Campustag
B. ENGEL, M. KURRAT

28.01.2020

Wirtschaftsempfang, Laboratory for Emerging Nanometrology LENA
M. KURRAT

29. und 30.01.2020

Treffen Beirat Tagung „Zukünftige Netze“
B. ENGEL

03.02.2020

Messe z. Studienseminar „Folgen der Energiewende-Mobilitätswende“
B. ENGEL, M. KURRAT

03.02.2020

Postersession zum Studienseminar „Folgen der Energiewende-Mobilitätswende“
M. KURRAT

07.02.2020

Schülertag Physik
M. KURRAT

19.02.2020

„Zentrale und dezentrale Elemente im Energiesystem“ ETG-Fachbereich V1 in Frankfurt
B. ENGEL

03. und 04.03.2020

Klausurtagung EITP, Kloster Wöltingerode
B. ENGEL, M. KURRAT

05.03.2020

Kick-Off SiNED
B. ENGEL, F. SOYCK, J. WUS-SOW, M. R. LOTZ, M. HOFFMANN, L. KAHL, S. CELAN

05.03.2020

„Warum brauchen wir Wasserstoff für die Energiewende in Niedersachsen?“
1. Jahrestagung des EFZN-Forschungsverbundes Wasserstoff Niedersachsen, 05. und 06.03.2020 Goslar
B. ENGEL

05.03.–06.03.2020

ZIEHL-Konferenz, Berlin
M. KURRAT

02.–03.04.2020

Kick-Off ALPHEUS
B. ENGEL, M. QUDAIH

03.04.2020

Programmausschuss VDE Hochspannungstechnik
M. KURRAT

15.04.2020

Vorstandssitzung + MV Stadt der Zukunft
M. KURRAT

29.04.2020

Jahreshauptversammlung VDE Stiftung Erwin-Marx
M. KURRAT

26.05.2020

„Erfahrungen als E-Mobilist und Prosumager“, Scientists for Future Braunschweig, Digitale Vortragsreihe Klimaschutz –Antworten der Wissenschaft
B. ENGEL

27.05.2020

VDE-Vorstands- u. Beirats-sitzung
M. KURRAT

10.06.2020

Vorstandssitzung + MV Stadt der Zukunft
M. KURRAT

18.06.2020

Neuer BA-Studiengang Energietechnologien
B. ENGEL, M. KURRAT

23.06.2020

NFF-Hauptversammlung
B. ENGEL, M. KURRAT

24.06.2020

Neuer BA-Studiengang Energietechnologien
B. ENGEL, M. KURRAT

24.06.2020

AG Globale Minderausgabe
B. ENGEL, M. KURRAT

07.07.2020

Kick-Off LISA4CL
B. ENGEL, G.-L. DI MODICA, J. WUSSOW

07.07.2020

AG Globale Minderausgabe
B. ENGEL, M. KURRAT

18.08.2020

AG Ausflug
M. KURRAT

19. – 20.08.2020

AG-Workshop
Energietechnologien
M. KURRAT, ARBEITSGRUPPE
ENERGIETECHNOLOGIEN

26. und 27.08.2020

AG-Klausur
B. ENGEL

30.08.2020

Workshop HZB/TUBS
M. KURRAT

01.09.2020

„PV + Batterie + X – Zukünftige Wechselrichter-gespeiste Netze“ Photovoltaik-Symposium (online)
B. ENGEL

04.09.2020

VDE-Vorstands- u. Beirats-sitzung
M. KURRAT

18.09.2020

Externe Promotionsprüfungen als Zweitgutachter: Farina Wille (Fakultät für Lebenswissenschaften)
B. ENGEL

07.10.2020

Kick-Off
FastChargeLongLife
M. KURRAT, F. KATSCHWITZ

15.10.2020

Programmausschuss VDE
Hochspannungstechnik
M. KURRAT

16.10.2020

Kolloquium + Verleihung
Gauß-Medaille
M. KURRAT

20.10.2020

„Photovoltaik: Ausbaupfade und Perspektiven für technologische Weiterentwicklung“, ETG Online-Fachtagung: Erzeugung und Speicherung elektrischer Energie
B. ENGEL

20.10.2020

Vorstandssitzung + MV
Stadt der Zukunft
M. KURRAT

26.10.2020

Cluster Symposium 2020 – Sustainable and Energy Efficient Aviation
M. KURRAT

27. – 28.10.2020

Industrietag und Forschungskolloquium Kompetenzcluster Batteriezellproduktion (ProZell)
M. KURRAT, R. DREES,
L. HOFFMANN

02. und 03.11.2020

International Battery Production Conference 2020 (IBPC)
M. KURRAT, R. DREES, L. HOFFMANN, D. KEHL

06.11.2020

„Netzbildende Umrichter-warum?“ Online-Workshop
FNN Netzregelung
B. ENGEL

10.11.2020

VDE-Podiumsdiskussion zur Energiewende: Wasserstoff/Brennstoffzelle vs. Batterie
B. ENGEL, M. KURRAT

10.11.2020

VDE-ETG Q2-Sitzung
M. KURRAT

11.11.2020

VDE-Vorstands- u. Beirats-sitzung
M. KURRAT

19.11.2020

„Statusbericht FNN Workshop 6.11.2020 – von der Forschung in die Regelung“ Digitale Sitzung
FNN-Lenkungskreis Systemfragen und Netzcodes
B. ENGEL

24. – 27.11.2020

Europäische Konferenz zur Batteriezellfertigung
R. DREES, L. HOFFMANN,
F. KATSCHWITZ; D. KEHL

02.12.2020

Betriebsversammlung
M. KURRAT

08.12.2020

Vorstandssitzung + MV
Stadt der Zukunft
M. KURRAT

11.12.2020

ETG Congress 2021-Programmausschuss
B. ENGEL, M. KURRAT

Laufend

Energetechnische Gesellschaft (ETG) im VDE, Vorstandssitzung
B. ENGEL

Laufend

Energieforschungszentrum Niedersachsen (EFZN), Vorstandssitzung
B. ENGEL

Laufend

Scientist for Future
B. ENGEL

Ohne Datum

Treffen Beirat Tagung „Photovoltaik Symposium“
B. ENGEL

Laufend

Mitgliederversammlung Energieforschungsknoten Braunschweig (1 x pro Semester)
B. ENGEL

Laufend

BWG (Klassensitzung, Plenarversammlung, Haupt- u. Wahlsitzung)
M. KURRAT

Veranstaltungen und Events 2021

05.01.2021

VDE-Vorstands- u. Beirats-
sitzung
M. KURRAT

20. und 27.01.2021

Vortragsreihe
Batterieforum 2021
R. DREES, L. HOFFMANN,
F. KATSCHWITZ; D. KEHL

20.01.2021

FSP-Metrologie mit MIB
MB
M. KURRAT

27. und 28.01.2021

Treffen Beirat Tagung „Zu-
künftige Netze“
B. ENGEL

02. und 09.02.2021

Vortragsreihe Batteriefo-
rum 2021
R. DREES, L. HOFFMANN, F. KAT-
SCHWITZ; D. KEHL

03. und 04.02.2021

Treffen Beirat Tagung „Zu-
künftige Netze“
B. ENGEL

17.02.2021

Vorstandssitzung FSP Stadt
der Zukunft
M. KURRAT

23.02.2021

„Netzbildende Wechselrich-
ter für ÜNB“ SMA Innova-
tion & Technology Day 2021
(online)
B. ENGEL

26.02.2021

Erfahrungsaustausch akkre-
dittierter Prüflabore
M. KURRAT

01.03.2021

85. FF-Vorstandssitzung
M. KURRAT

02.03.2021

VDE-Vorstands- u. Beirats-
sitzung
M. KURRAT

03.–04.03.2021

Kick-Off BMBF-
Kompetenzcluster
Batterienutzungskonzepte
(Battnutzung)
M. KURRAT, R. DREES,
L. HOFFMANN, F. KATSCHWITZ

16.–17.03.2021

Kick-Off BMBF-
Kompetenzcluster
Intelligente
Batteriezellproduktion
(InZePro)
M. KURRAT, R. DREES,
L. HOFFMANN

19.03.–25.03.2021

Klausurtagung EITP (online)
B. ENGEL, M. KURRAT

23.–24.03.2021

Forschungskolloquium
BMBF-Kompetenzcluster
Batteriezellproduktion
(ProZell)
M. KURRAT, R. DREES,
L. HOFFMANN

14.04.2021

Vorstandssitzung FSP Stadt
der Zukunft
M. KURRAT

21.04.2021

„Forschungsroadmap ‚Sys-
temdienstleistungen““
Forschung und Inova-
tionsplattform des For-
schungsnetzwerkes Energie
des BMWi (online)
B. ENGEL

27.04.2021

elenia Open Research Day
(online)
B. ENGEL, M. KURRAT

28.–29.04.2021

Kraftwerk Batterie
R. DREES, L. HOFFMANN,
F. KATSCHWITZ; D. KEHL

29.04.2021

Treffen BMWi Forschungs-
feld Hochtemperatur-Sup-
raleitung
M. KURRAT

29.04.2021

Mitgliederversammlung iv-
Supra
M. KURRAT

30.04.2021

Jahreshauptversammlung
VDE Stiftung Erwin-Marx
M. KURRAT

30.04.2021

VDE-Prof Date
M. KURRAT

18.05.2021

ETG Poster Schlüsselkomp.
M. KURRAT

19.05.2021

Leitung ETG Session D5
M. KURRAT

26.05.2021

„Zielbild klimaneutrale
Energieversorgung 2045“,
VDE Prof.Date 2021 (online)
B. ENGEL

07.06.–11.06.2021

ICEC-Konferenz
M. KURRAT

08.06.2021

Externe Promotionsprüfungen als Zweitgutachter: Christian Aigner (TU München) – online

B. ENGEL

11.06.2021

Kick-Off BMWi-Projekt NEWBIE

L. HOFFMANN, D. KEHL

15.06.2021

VDE-Vorstands- u. Beirats-sitzung

M. KURRAT

15.06.2021

„PV-Eigenverbrauch als Treiber der Energiewende“ 4. Niedersächsisches Forum Solarenergie (online)

B. ENGEL

23.–24.06.2021

11. Braunschweiger Energieseminare

M. HOFFMANN, T. MEYER

24.06.2021

BS-Energieseminar

M. KURRAT

30.06.2021

„Quartiersenergiesysteme für die Energiewende“, EFZN-Forschungsworkshop 2020/21 Teil 2 (online)

B. ENGEL

02.07.2021

Vorstandssitzung FSP Stadt der Zukunft

M. KURRAT

22.07.2021

Externe Promotionsprüfungen als Zweitgutachter: Florian Rewald (TU Dortmund)

B. ENGEL

09.09.2021

Externe Promotionsprüfungen als Zweitgutachter: Tim Plößler (TU Darmstadt)

B. ENGEL

14.–15.09.2021

AG-Workshop Energietechnologien

M. KURRAT, ARBEITSGRUPPE ENERGIETECHNOLOGIEN

21.09.2021

VDE-Vorstands- u. Beirats-sitzung

M. KURRAT

22.09.2021

„Begrüßung und Einführung durch das EFZN“, Göttinger Energietage von BNetzA und EFZN

B. ENGEL

22.09.2021

Vorstandssitzung FSP Stadt der Zukunft

M. KURRAT

23.09.2021

„System Splits und andere Systemstörungen – Lösen netzbildenden Wechselrichter die Herausforderungen zukünftiger Stromnetz – Einführung in das Thema“, Workshop: Netzbildende Wechselrichter für einen stabilen Netzbetrieb, 22. Forum Neue Energiewelt, Berlin

B. ENGEL

24.09.2021

„Das Smart Home für den Prosumer als Schlüssel zur Energiewende“ Herbsttagung 2021 der Sachverständigen-Fachgruppe Elektrotechnik und Informationstechnik (online)

B. ENGEL

27.09.–01.10.2021

ISDEIV-Konferenz, Padova/Italien

M. KURRAT

Laufend

Energietechnische Gesellschaft (ETG) im VDE, Vorstandssitzung

B. ENGEL

Laufend

Energieforschungszentrum Niedersachsen (EFZN), Vorstandssitzung

B. ENGEL

Laufend

Scientist for Future

B. ENGEL

Ohne Datum

Treffen Beirat Tagung „Photovoltaik Symposium“

B. ENGEL

Ohne Datum

Mitgliederversammlung Energieforschungsknoten Braunschweig (1 x pro Semester)

B. ENGEL

Ohne Datum

Berufungskommission TU Clausthal, Nachfolge Prof. Beck

B. ENGEL

Laufend

BWG (Klassensitzung, Plenarversammlung, Haupt- u. Wahlsitzung)

M. KURRAT

Beteiligung an der Selbstverwaltung 2020

Universität

MICHAEL KURRAT

- Dekanerunde (Videokonferenz)
19.01. | 20.03. | 24.03. | 26.03. |
31.03. | 21.04. | 05.05. | 07.05. |
27.05. | 25.06. | 11.06. | 14.05. |
19.05. | 02.07. | 16.07. | 28.07. |
19.08. | 24.09. | 17.12.
- Findungskommission, 01.06. |
13.11. | 14.12.
- Sprecher AG
Kandidat*innenauswahl in
Berufungsverfahren, 23.04. |
19.05. | 04.06. | 06.07. | 21.07. |
27.08. | 06.10. | 25.11.
- Senatssitzung (Videokonferenz),
20.01. | 17.02. | 17.03. | 22.04. |
13.05. | 17.06. | 08.07. | 26.08. |
16.09. | 09.12.

BERND ENGEL

- Energiebeirat 05.03. | 18.06. |
05.11.
- AG Nachhaltigkeit

Fakultät

MICHAEL KURRAT

- Dekan der Fakultät EITP
- Sprecher Planungsrunde EITP
seit 28. Mai 2020
- FVV-Planungsrunde (FK EITP) –
28.05. | 12.06. | 03.07. | 28.08. |
29.10. | 20.11.
- FVV 17.01. | 07.02. | 23.04. |
14.05. | 28.05. | 18.06. | 16.07. |
05.11., | 03.12.

BERND ENGEL

- Fakultätsratssitzung 20.01. |
27.4. | 18.5. | 22.6.
- Fachvertreter-Versammlungen

elenia Institut

MICHAEL KURRAT

- Institutsrunde (Vorstand)
(monatlich)
- Statussitzungen
(Mitarbeiter*innen-Versamm-
lung) (monatlich)
- Projektmanagement Office
(nach Bedarf)
- Teamleitersitzungen (monatlich)
- Novizengruppe (Doktoranden-
seminar, monatlich)
- Mentorentreffen 15.01. | 28.04. |
19.05. | 28.10. | 25.11.
- Erstsemesterbegrüßung
28.10.2020

BERND ENGEL

- Geschäftsführender
Institutsleiter
- Statussitzungen
(Mitarbeiter*innen-Versamm-
lung) Sitzungstermine (1 x im
Monat)
- Teamleitersitzungen der AG
Energiesysteme
- Mentorentreffen 1 x pro
Semester

Beteiligung an der Selbstverwaltung 2021

Universität

MICHAEL KURRAT

- Dekanerunde 28.01. | 02.02. | 25.03. | 20.05.
- Findungskommission 29.01.2021 | 10.03.2021
- Sprecher AG
Kandidat*innenwahl in Berufungsverfahren, 10.02.2021
- Senatssitzung 20.01. | 08.02. | 17.02. | 17.03. | 16.06.

BERND ENGEL

- Senatssitzung Videokonferenz öffentlicher Teil, 20.01.
- Energiebeirat
- AG Nachhaltigkeit

Fakultät

MICHAEL KURRAT

- Dekan der Fakultät bis zum 31. März 2021
- Prodekan seit dem 1. April 2021
- Sprecher Planungsrunde EITP als Prodekan seit dem 28. Mai 2020
- FVV-Planungsrunde (FK EITP) – 08.01.2021 | 05.02.2021 | 21.05. | 25.06. | 16.07. | 17.09

BERND ENGEL

- Fachvertreter-Versammlungen

elenia Institut

MICHAEL KURRAT

- Geschäftsführender Institutsleiter seit dem 1. April 2021
- Institutsrunde (Vorstand) (monatlich)
- Statussitzungen (Mitarbeiter*innen-Versammlung) (monatlich)
- Projektmanagement Office (bei Bedarf)
- Teamleitersitzungen (monatlich)
- Novizengruppe (Doktoranden-seminar) (monatlich)
- Mentorengruppe (Studierendenberatung) – Termine 27.01. | 12.07.
- Erstsemesterbegrüßung Studiengang Elektromobilität 13.04.2021

BERND ENGEL

- Geschäftsführender Institutsleiter bis 31.03.2021
- Institutsrunde (Vorstand)
- Statussitzungen (Mitarbeiter*innen-Versammlung) – Sitzungstermine (1 x im Monat)
- Projektmanagement Office (wöchentlich)
- Teamleitersitzungen der Arbeitsgruppen (2 x monatlich)
- Mentorengruppe (Studierendenberatung) 1 x pro Semester Energiesysteme
- Mentorentreffen 1 x pro Semester

Impressum

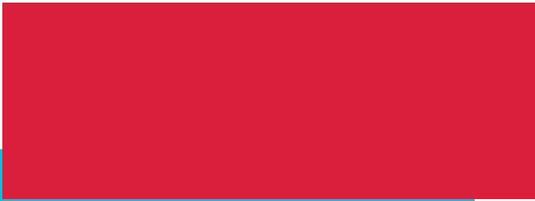
© 2021 Technische Universität Braunschweig
elenia Institut für Hochspannungstechnik
und Energiesysteme

Schleinitzstraße 23
38106 Braunschweig
Telefon +49 531 391-7700
Telefax +49 531 391-8106

elenia@tu-braunschweig.de
www.tu-braunschweig.de/elenia

Redaktion: Muhamet Alija
Gestaltung: Jakob Piest
Fotos: Wenn nicht anders angegeben elenia/TU Braunschweig

Berichtszeitraum: 01/2020–10/2021



© Technische Universität Braunschweig
elenia Institut für Hochspannungstechnik
und Energiesysteme

Schleinitzstraße 23
38106 Braunschweig
Telefon +49 531 391-7700
Telefax +49 531 391-8106

elenia@tu-braunschweig.de
www.tu-braunschweig.de/elenia