



TU Clausthal

Jahresbericht 2018/2019

des

Institutes für Elektrische Energietechnik
und Energiesysteme



Clausthal-Zellerfeld
April 2020

IEE-Bericht Nr. 29/30

Inhaltsverzeichnis

	Vorwort	1
1	Lehre	5
1.1	Vorlesungen	5
1.2	Übungen, Praktika, Mentoring	9
1.3	Seminarvorträge	12
1.4	Studien-, Bachelor-Diplom- und Masterarbeiten	13
2	Veröffentlichungen, Dissertationen, Habilitationen	28
2.1	Zeitschriften- und Tagungsaufsätze, Patente /- anmeldungen	28
2.2	Seminare	31
2.3	Veranstaltungen, Exkursionen, Gastaufenthalte	32
3	Forschungsarbeiten + Forschungsgebiete des Institutes	35
3.1	Geförderte Forschungsvorhaben	35
3.2	Projektübersichten	39
4	Personelle Besetzung	141
4.1	Hauptamtliche Mitarbeiter des Instituts	141
4.2	Honorarprofessoren und Lehrbeauftragte	146
4.3	Wissenschaftliche Hilfskräfte	147
4.4	Mitgliedschaften in wissenschaftlichen Vereinigungen und in den Selbstverwaltungsgremien der Universität	147
5	Links	148
6	Anlagen	148

Vorwort

Liebe Freunde und Förderer des Institutes,

die Institutsleitung legt mit diesem Bericht, der die laufende Nr. 29/30 trägt, den 29. Jahresbericht des IEE vor. Damit wird deutlich, dass seit Beginn der Berichterstattung 30 Dienstjahre des Unterzeichnenden vergangen sind und damit das Dienstende am 31.03.2019 erreicht wurde.

In den vergangenen 30 Jahren seit Dienstbeginn am 01.10.1989 hat sich natürlich die TUC und das IEE sehr verändert. Dies soll in diesem Zweijahresbericht das Thema sein.

Im Jahre 1990 hatte die TUC noch sieben Fachbereiche gehabt, die in zwei Fakultäten organisiert waren. Die Fachbereiche Mathematik und Informatik, Physik, Chemie und Geowissenschaften hatten sich in der Mathematik-Naturwissenschaftlichen Fakultät I zusammengefunden. Die Fachbereiche Bergbau und Rohstoffe, Metallurgie und Werkstoffwissenschaften, Maschinen- und Verfahrenstechnik gehörten der Fakultät II für Bergbau, Hüttenwesen und Maschinenwesen an. Insgesamt hatte die TUC damals rd. 120 Professuren; heute gibt es noch 80 Professuren, die den drei Fakultäten für Natur- und Materialwissenschaft, Energie- und Wirtschaftswissenschaften und Mathematik/Informatik und Maschinenbau mit angehören. Zusätzlich gibt es vier Forschungszentren für Energiespeichertechnologien (EST), Materialwissenschaften (CZM), Simulationswissenschaften (SWZ) und Umwelttechnik (CUTEC). Diese Forschungszentren sollen die vier Forschungsfelder (früher Forschungsschwerpunkte)

- 1.) Nachhaltige Energiesysteme (NE)
- 2.) Neuartige Materialien und Prozesse für wettbewerbsfähige Produkte (MP)
- 3.) Offene Cyberphysische Systeme und Simulation (OCSS)
- 4.) Rohstoffsicherung & Ressourceneffizienz (R & R)

spiegeln, die in dem vom Ministerium genehmigten Masterplan des Jahres 2016 festgeschrieben wurden und heute noch gültig sind (vgl. Jahresbericht der TUC für 2019). Sie sollen die in den Instituten vorhandenen disziplinären Forschungseinrichtungen und die in den vier Zentren gebündelten fachübergreifenden Infrastrukturen zusammenführen, um sie effizienter nutzen zu können. Die vier Forschungszentren sind inzwischen unter dem Dach des neu gegründeten sog. House of Research (HoR) der TUC angesiedelt, das in Zukunft die Plattform der interdisziplinären Forschung sein soll und dem neuen Präsidium unter dem Vorsitz des neuen Präsidenten Prof. Dr. Schachtner (seit Ende 2018) entsprechende Empfehlungen und

Beschlussvorlagen unterbreiten. Der Unterzeichnende hat im Berichtszeitraum das Forschungsfeld “Nachhaltige Energiesysteme (NE)” koordiniert.

Eine wichtige Aufgabe des HoR ist auch, die strategische Ausrichtung der wiederzubesetzenden Professuren, wozu auch die des Unterzeichnenden gehört (geplant “Allgemeine Elektrotechnik und Elektrische Energiespeichertechnik” (W3)), zu definieren.

Das Wiederbesetzungsverfahren durch die TUC (Fakultät, Präsidium) ist zwar angelaufen, auf Grund der noch fehlenden Berufungsstrategie der TUC (von den 80 Professuren sind in den nächsten fünf Jahren ca. 25 frei werdende Professuren neu zu besetzen) wurde die gewählte Denomination bisher nicht freigegeben (Stand April 2020). Der Unterzeichnende vertritt sich daher derzeit, voraussichtlich bis zur Wiederbesetzung der ab 01.04.2019 freigewordenen Professur “Grundlagen der Elektrotechnik und Elektrische Energietechnik, selber.

Dieser personelle Wandel in der Institutsleitung ist jedoch nicht der einzige im IEE. Mit der Pensionierung des Unterzeichnenden ist auch der stellvertretende wissenschaftliche Direktor, Herr Dr.-Ing. E. A. Wehrmann, am 28. November 2019 nach mehr als 40 jährigem Dienst im IEE in den Ruhestand verabschiedet worden. Dies ist hier eine Gelegenheit, meinem sehr geschätzten Kollegen nachhaltig für seinen unermüdlichen und gewissenhaften Einsatz in der IEE-Forschung und -Lehre zu danken.

Mit Herrn Dr. Wehrmann sind weitere Honorarprofessuren des IEE:

- Prof. Baake (Uni Hannover, Theorie der elektromagnetischen Felder)
- Prof. Wenzl (Osterode, Elektrochemische Speicher)
- Prof. Maubach (München, Düsseldorf, Elektrizitätswirtschaft)

und Lehrbeauftragte

- Dr. Heldt (Osterode, Elektrische Maschinen)
- Dipl.-Ing. Darrelmann (Osterode, Autonome Netze)

ausgeschieden.

Auch diesen Kollegen danke ich für ihre langjährige einschlägige Unterstützung der wissenschaftlichen Arbeit im IEE sehr herzlich.

Was folgt nun für den IEE-Institutsbetrieb aus diesen einschneidenden personellen Veränderungen? In Zeiten des Wandels sollte die IEE-Identität bekannt und konsolidiert sein, um nicht von der Außenwelt in Frage gestellt zu werden. Wir vom IEE können als eines der zwei TUC-Institute, die den Begriff Energie im Institutsnamen führen, mit Fug und Recht behaupten, dass wir im Forschungsfeld Nachhaltige Energiesysteme (NE) sowie in der diesbezüglichen Lehre zukunftsorientiert aufgestellt sind:

- Wir sind nach wie vor eine tragende Säule in den Studiengängen Energietechnologien (Entech, BA) und Energiesystemtechnik (EST, MA) und zukünftig auch
- im BA-Studiengang Elektrotechnik (Beginn ab WS 18/19)
- Die Lehrveranstaltungen Grundlagen der Elektrotechnik und Elektrische Energietechnik sind nach wie vor Pflichtveranstaltungen für Ingenieure.

Die Studiengänge Entech und EST werden auf Beschluss des Präsidiums vom 05.05.2020 aufgrund der profilgerechten Ausrichtung passend zum Forschungsfeld 1 (NE) erneut akkreditiert. Die Federführung dazu liegt im IEE.

Forschung

Wir verkörpern im Forschungsfeld NE ein Kerninstitut und im

- Energieforschungszentrum für Energiespeichertechnologien der TU Clausthal (EST) und in Niedersachsen (EFZN, Standort Goslar) mit den Forschungsgruppen bzw. Abteilungen
 - Elektrische Energiesysteme
 - Leistungsmechatronik
 - Elektrische Energiespeichersysteme mit der assoziierten Abteilung
 - Energiesystemintegration der CUTEC und der Arbeitsgruppe
 - Nichtelektrische Energiesysteme (z. B. Power to X),

geführt von Prof. Faulstich (ab 01/2018), einen ausgewiesenen Arbeitsschwerpunkt. Die aufgelistete Struktur, die sich in den letzten Jahrzehnten bottom-up durch einschlägige Aktivitäten herausgebildet hat (vgl. Jahresberichte seit 1990), basiert auch auf der erfolgreichen Evaluation des Energieforschungszentrums Niedersachsen in Goslar (www.efzn.de/fileadmin/Presse/Evaluation/WKN_Evaluation_CUTEC_EFZN_TUCL_161118.pdf).

Zur besseren Übersicht findet der (die) LeserIn dazu im Kapitel 3 eine entsprechende Grafik zur Organisationsstruktur des IEE, die die Grundlage bildet für die angelaufene Wiederbesetzung des vorhandenen Lehrstuhles.

Mit dieser gezeigten Struktur, die mindestens bis zur Wiederbesetzung der Professur für Grundlagen der Elektrotechnik und Elektrische Energietechnik und den genannten fünf wissenschaftlichen Abteilungsleitern gelten soll, wird auch die entfallende Lehrkapazität durch die o. a. Honorarprofessuren und Lehrbeauftragte kompensiert werden:

- Elektrizitätswirtschaft - Prof. Faulstich (früher CUTEC) (Nachfolge Prof. Maubach)
- Energiespeichertechnik - Dr.-Ing. R. Benger (Nachfolge Prof. Wenzl)
- Energiesystemintegration - Dr.-Ing. J. zum Hingst (Nachfolge Dr.-Ing. Wehrmann)

- Elektrische Energiesysteme - Prof. Beck (Verwaltungsauftrag)
- Theorie elektromagnetischer Felder - Prof. Rembe (Inst. Für Elektr. Informationstechnik)
(Nachfolge Prof. Baake)

Den beiden ausgeschiedenen Lehrbeauftragten folgen zwei neue mit einem mehr dem MA EST-Studiengang angepassten Lehrangebot im Rahmen von zwei neuen Wahlpflichtfächern

- Dr.-Ing. St. Mecke (Salzgitter-Stahl) mit der Vorlesung “Grundstoffindustrie und Energiewende” und
- Dr.-Ing. W. Siemers (TUC-Forschungszentrum CUTEC) mit der Vorlesung “Berechnung und Bewertung der Emissionen von nachhaltigen Energiesystemen und Energieprozessen”

Offen ist noch die Frage, inwieweit die vier genannten IEE-Abteilungen durch weitere neu zu berufende Professuren strukturbildend langfristig verstetigt werden können. Fakt ist, dass die derzeit bestehende Kernprofessur

- Grundlagen der Elektrotechnik und Elektrische Energietechnik (Nachfolge Beck)
- wieder besetzt werden soll und muss, um die Lehre im Grundlagenbereich weiterhin vom IEE aus zu bedienen. Eine zweite hauptamtliche W3-Professur für Elektrische Energiespeichersysteme ist im Masterplan für das Forschungsfeld Nachhaltige Energiesysteme genannt, aufgrund des nicht größer werdenden Budgets der TUC bisher aber nicht etatisiert.

Eine zweite Professur für die Nachbesetzung der von Herrn Dr. Wehrmann bis Ende 2019 geleiteten Abteilung für Elektrische Energiesysteme ist zumindest strukturell auch in der neuen, vom Präsidium genehmigten Institutsordnung des IEE vorgesehen. Ob und wann sie mit einer W2-Professor besetzt werden kann, hängt vom Abschluss des beschriebenen Wandlungsprozesses der TUC (Verabschiedung der Berufungsstrategie) ab. Die fachlichen Weichen für eine positive Gutachterentscheidung sind zumindest aus IEE-Sicht hierfür zielführend gestellt. Wenn die TUC sich bewegen möchte: wir sind darauf vorbereitet. Inwieweit das stimmt, kann dem vorgelegten Jahresbericht 2018/2019 entnommen werden.

Glück auf!

Univ.-Prof. Dr.-Ing. H.-P. Beck

1 Lehre

1.1 Vorlesungen

Die Studierendenzahlen sind in den zurückliegenden zwei Jahren TUC-weit zurückgegangen (derzeit rd. 4000 Studierende). Im Mittel gibt es am IEE pro Jahr trotzdem immer noch 1000 Studierende im Grund- und Hauptstudium (vgl. anliegende Tabelle). Die ausreichende Zahl an fortgeschrittenen Studierenden resultiert aus den vielen Wahlpflichtfächern, die vom haupt- und nebenamtlichen Lehrpersonal angeboten werden. Insbesondere den Lehrbeauftragten und den Honorarprofessoren des IEE sei an dieser Stelle für die erbrachte Lehrleistung herzlich gedankt. Ein wissenschaftlicher Studiengang Energietechnologien (BA) und Energiesystemtechnik (MA) wie der am IEE, wäre ohne diese Expertise der externen Lehrkräfte nicht einschlägig. Das gilt auch für den geplanten Bachelorstudiengang Elektrotechnik (Beginn ab WS 2018/2019).

Die "Renner" in der Lehre (gemessen an den Studentenzahlen >30) sind, wie man der folgenden Tabelle entnehmen kann, in diesem Berichtszeitraum die Fächer

- Grundlagen der Elektrotechnik
- Energiesysteme
- Elektrische Energietechnik
- Elektrizitätswirtschaft
- Leistungsmechatronische Systeme
- Theorie der elektromagnetischen Felder
- Regenerative Energiequellen

Sie tragen 3/4 der Studierendenzahlen. Ähnliches gilt für die dazugehörigen Übungen. Was die Promotionen angeht, gab es einen Stau in den Jahren 2015/2016, was dazu geführt hat, dass in den Folgejahren im Schnitt pro Jahr 3 bis 4 Promotionen anstanden. Dies ist deshalb erfreulich, weil der Schnitt an der TUC bei nur einer Promotion pro Professor im Jahr liegt.

		2018*	2019*
Beck/Wehrmann	Grundlagen der Elektrotechnik I/II (W 8800 / S 8801) Elektrotechnik für Ingenieure I/II (W8800 / S 8801)	671	621
Beck/Turschner	Elektrische Energietechnik (S 8803)	36	30
Beck/Turschner	Regelung Elektrischer Antriebe (W 8808)	7	3
Beck	Energieelektronik (W 8811)	11	3
Beck/Turschner u. a.	Energiesysteme (W 8804)	105	45
Heldt (bis WS 2018/19)	Sonderprobleme Elektrischer Maschinen (W 8805)	5	-
zum Hingst	Elektrische Energieverteilung (W 8812)	25	12
Wehrmann	Elektrische Energieerzeugung (S 8815)	30	18
Turschner	Leistungmechatronische Systeme (S 8826)	40	33
Turschner	Leistungmechatronische Regelungssysteme (S 8824)	3	-
Jahn	Regenerative Elektrische Energietechnik (W 8818)	20	25
Maubach (bis SS 2019)	Elektrizitätswirtschaft (S 8819)	32	11
Baake (bis SS 2018) Rembe (IEI) (ab SS2019)	Theorie Elektromagnetischer Felder (S 8817)	33	-
Benger	Batteriesystemtechnik und Brennstoffzellen (W 8816)	10	10
Benger	Sicherheit und Zuverlässigkeit von Batteriesystemen (S 8839)	-	9
Faulstich	Dyn. Systeme in Natur, Technik und Gesellschaft (S 8825)	6	18

* ausgezählter Mittelwert der Teilnehmer im Hörsaal

		2018*	2019*
Lülf	Optimierung und Instandhaltung von Elektroenergieanlagen (S 8828)	13	7
Kühl	Regenerative Energiequellen (W 8830)	36	38
Beck/ Darrelmann	Autonome Netze (W 8832)	8	8
Buddenberg	Fossile und regenerative Energieressourcen (W 8831)	25	10
Mecke	Grundstoffindustrie und Energiewende (SS 8837)	5	8
Siemers	Berechnung und Bewertung der Emissionen von nachhaltigen Energiesystemen und Energieprozessen (W 8834)	8	7

Insgesamt fanden im Verlauf des Berichtszeitraums 1728 Bachelor- und Masterprüfungen statt, die von den prüfungsberechtigten Hochschullehrern, Honorarprofessoren und Lehrbeauftragten des Institutes abgenommen wurden.

Dies sind 8 % weniger als im vorangegangenen Berichtszeitraum aber noch eine Stabilisierung auf relativ hohem Niveau. Zu erwähnen ist auch die relativ hohe Anzahl von Bachelor-, Projekt- und Masterarbeiten, deren Anzahl im Vergleich zum vorangegangenen Berichtszeitraum mit rd. 50-60 Arbeiten pro Jahr nicht abgenommen hat. Die thematische Ausrichtung der Arbeiten findet der Leser in den folgenden Abschnitten.

Der guten Tradition der TUC entsprechend wurden die Prüfungen im Haupt- bzw. Fachstudium (5.-10. Semester) mündlich bzw. halbschriftlich abgenommen. Mündliche Prüfungen sind, nach unserer Auffassung, im Gegensatz zu Klausuren auch Lehrveranstaltungen, weil eine Interaktion und Kommunikation zwischen Prüfer, Beisitzer und Prüfling stattfindet, die darüber hinaus auch die Situation der späteren Berufswelt spiegelt. Da diese Prüfungsform des reinen Gespräches aus Kapazitätsgründen nicht immer eingehalten werden kann, gibt es u. a. im Praktikum „Grundlagen der Elektrotechnik I, II“ nach wie vor ein mündliches Vortestat (“Quickie”) mit einem vorgeschalteten schriftlichen Fragenteil zur Messung der Eingangsleistung der PraktikumssteilnehmerInnen. Ein nicht Bestehen des Quickies bedeutet eine Wiederholung des Tests. Damit werden Laboreinrichtung und Nerven des Aufsichtspersonals geschont.

Ein Problem in den ersten Semestern sind nach wie vor die sinkenden Eingangsqualifikationen der Abiturienten. Hier wird seitens des Institutes mit Sondermitteln der Fakultät durch zusätzliche Angebote (Vorkurse, Mentorenprogramm, Tutoren, Klausuraufgaben-Übungen in den Vorlesungen, mehr Zeit für die Klausurbearbeitung bei gleichem Schwierigkeitsgrad etc.) entgegen gewirkt. Die Bestehensquoten in den Grundlagenfächern lassen dennoch zu wünschen übrig.

Der Schwerpunkt der IEE-Lehrleistung liegt nach wie vor in den angebotenen Kursen Grundlagen der Elektrotechnik I, II. Folgende Studiengänge der Fakultäten I, II und III nutzen das Angebot:

- Energie und Rohstoffe
- Energietechnologien
- Maschinenbau
- Materialwissenschaft und Werkstofftechnik
- Technische Informatik
- Verfahrenstechnik/Chemieingenieurwesen
- Wirtschaftsingenieurwesen
- Elektrotechnik (ab WS 2018/19)

Im Rahmen des Fachstudiums können die entsprechenden Lehrangebote des IEE in den folgenden Studiengängen als Pflicht-, Wahlpflicht- und Schwerpunktfach genutzt werden. Die Anzahl der TeilnehmerInnen geht aus den gezeigten Tabellen hervor :

- Maschinenbau, Studienschwerpunkt "Mechatronik"
- Energietechnologien (BA)
- Energiesystemtechnik (MA/FH-Absolventen)
- Wirtschaftsingenieurwesen, Studienrichtung Rohstoffe und Energie
- Energie- und Materialphysik
- Elektrotechnik (BA)

Die relativ hohen Studierendenzahlen in der Vorlesung Leistungsmechatronische Systeme (40/33) sind auf die Umstellung des Lehrangebotes im Fach zurückzuführen.

Für Mechatronikanlagen größerer Leistung ($> 10 \text{ kW}$) haben wir den Begriff "Leistungsmechatronik" geprägt und zwar in Analogie zur Elektronik/Leistungselektronik. Leistungsmechatronik enthält als Kerngebiete Leistungselektronik, Antriebstechnik, Regelungstechnik und Technische Informatik; sie ist damit ein Gebiet der (elektrischen) Energiesystemtechnik. Sie

unterscheidet sich von der bisherigen Antriebstechnik durch die additiven Wissensgebiete: mathematische Modellbildung, Simulation und Validierung. So ist z. B., wie in einem laufenden Forschungsprojekt, auch die Dynamik des Windangebotes einer Windenergieanlage inklusive der elektrischen Generator- oder Umrichtertechnik (VISMA) mit Regelung Teil des Gesamtmodells, weil nur durch diese Weiterfassung der Systemgrenzen die Selbsterregungseffekte im Gesamtsystem beherrscht werden können. Ein neues Forschungsprojekt hier zu betrifft zum Beispiel die Collective Dynamik elektrischer Netze unter Berücksichtigung der Generator- und Umrichtereinspeisung (Condynet II).

Neben der Leistungsmechanik gehören die regenerative dezentrale elektrische Energietechnik und die Speichersysteme mit Elektroenergie-Zugang zu den Fachgebieten des IEE, was auch die Belegung der entsprechenden Lehrveranstaltungen abbildet. Das gesamte Arbeitsgebiet wird unter dem Begriff Elektrische Energiespeichersysteme als Teil des grundständigen MA-Studienganges Energiesystemtechnik zusammengefasst.

1.2 Übungen, Praktika, Mentoring

Im Berichtszeitraum wurden folgende Übungen und Praktika durchgeführt. Die Zahlen geben jeweils die gezählten Teilnehmerzahlen in den Lehrveranstaltungen an. Der sehr starke Einbruch bei den Übungsteilnehmerzahlen in den Grundlagen ist vermutlich auf das veränderte Studierverhalten der Studierenden zurückzuführen (Einfluss der Digitalisierung? sowie weniger Übungen im Lehrplan). Beeindruckend ist die immer noch größere Teilnehmerzahl in den Praktika (660/555). Dies ist sehr erfreulich, weil es beweist, dass das abstrakte Fach Grundlagen der Elektrotechnik auch aus Sicht der Studierenden nicht nur digital virtuell erschlossen werden kann.

		2018	2019
Große Übung	Grundlagen der Elektrotechnik I/II (Wehrmann/Spielmann/Reineke/Kreth)	591	173
Tutorien	Grundlagen der Elektrotechnik I/II (Wehrmann/Spielmann/Kreth/wiss. Hilfskräfte)	500	150

		2018	2019
Übung	Elektrische Energietechnik (Turschner/Lin)	36	30
Übung	Regelung Elektrischer Antriebe (Turschner)	7	3
Übung	Leistungsmechatronische Systeme (Turschner)	40	33
Übung	Leistungsmechatronische Regelungssysteme (Turschner)	3	-
Übung	Energieelektronik (Turschner/Klaas)	11	3
Übung	Elektrische Energieerzeugung (Wehrmann/Fries)	30	18
Übung	Regenerative Elektrische Energietechnik (Jahn)	20	25
Übung	Elektrische Energieverteilung (Tkalcec)	25	12
Übung	Batteriesystemetechnik und Brennstoffzellen (Beushausen/Oberland/Orazov/Grabow)	10	10
Übung (bis SS2018)	Theorie der elektromagnetischen Felder (Baake)	33	-
Übung (bis WS 2018/19)	Sonderprobleme elektrischer Maschinen (Heldt)	5	-
Übung	Dyn. Systeme in Natur, Technik und Gesellschaft (Faulstich/Hashemifar zad/Fiesinger)	8	18
Übung	Optimierung und Instandhaltung von Elektroenergieanlagen (Lülf)	13	7
Übung	Regenerative Energiequellen (Kühl)	36	38
Übung	Autonome Netze (Darrelmann)	8	8

		2018	2019
Übung	Fossile und regenerative Energieressourcen (Buddenberg)	25	10
Übung	Elektrizitätswirtschaft (Koring)	32	11
Übung	Grundstoffindustrie und Energiewende (Mecke/Beushausen)	5	8
Übung	Berechnung und Bewertung der Emissionen von nachhaltigen Energiesystemen u. Energieprozessen (Siemers)	8	7
Praktika	Grundlagen der Elektrotechnik I/II (Wehrmann/Ufkes/wiss. Hilfskräfte)	660	555
Praktikum	Energieelektronik (Gollenstede/Deblon)	5	2
Praktikum	Elektrische Energiespeicher (Tchoupou Lando/Oberland/Orazov/Göken)	4	5
Praktikum	Elektrische Maschinen (Turschner/Gollenstede/Deblon)	4	12
Praktikum	Regenerative Elektrische Energietechnik (Ufkes/Tkalcec)	14	7
Praktikum	Hochspannungstechnik (Wehrmann/Kreth/Klaas)	7	9
Grundpraktikum	Ingenieurwissenschaft im Bachelor Energietechno- logien (Turschner/Gollenstede/Deblon)	9	10
Gemeinschafts- seminar	Gemeinschaftsseminar zur Elektrischen Energie- technik und Energiesystemtechnik (Koring/Fries)	13	13

1.3 Seminarvorträge**2018**

Eterwei Madago Foresto, Priskila Liane	E-Mobility: comparing Germany, France and Norway for electric vehicle adoption
Kolosova, Anna	Kommunikationsschnittstellen von Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge
Mao, Chengxue	Antriebskonzepte von Windenergieanlagen
Bagoglu, Cankat	Vergleich von Hochleistungs-Energiespeichersystemen
Reichrath, Timo	Aktuelle Second Life Projekte unter Verwendung von Lithium-Ionen-Batterien
Baier, Gustav	Was kommt Lithium-Ionen-Batterien?
Flohr, Daniel	Elektrische Hausspeicher in Kombination mit PV- und KWK-Anlagen
Foorden Heider Lasse	Power-to-X
Al-Moeyed, Adi Mohammed Ali	Power-to-Gas
Spieß, Roderick	Vergleich verschiedener technischer Möglichkeiten für Elektrolyse bzw. Brennstoffzelle
Meyer, Max	Rotierende USV
Aliaj, Ardit	Eigenschaften und Vergleich von Wechselrichterkon- zepten mit IGBTs bzw. Thyristoren

2019

Al-Sharafi, Murad A. A. Ibraheem, Fadi	Druckluftspeicherkraftwerke Generelle Funktionsweise von unterschiedlichen Batte- riemanagementsystemen
Griemert, Rudolf	Stand der Technik und aktuelle Herausforderungen in der Halbleitertechnik

Thies, Alexander	Virtuelle Kraftwerke
Ahmadi, Mahour	Nachtspeicherheizungen und die Energiewende?
Al-Hammadi, Sondos Khaled	Stromerzeugung durch Wasserkraft im Harz
Ayayda, Mohammad	Elektrochemische Speicher
Candra, William Christian	Wärmepumpen
Dreesch, Meinhard	Speichermöglichkeiten von regenerativ erzeugtem Wasserstoff
Kruse, Ulrike Eike	Smart Meter
Odendahl, Felix Connor	Wellen- und Gezeitenkraftwerke - Stromerzeugung mit der Energie
Trabelsi, Mohamed Ali	Vergleich potentialgetrennter Sensorik für Strommessungen
Yousif, Yousif	Ladetechnologien für Elektrofahrzeuge

1.4 Studien-, Bachelor-, Diplom- und Masterarbeiten

Bachelorarbeiten

2018

Bösenberg, Moritz	Erstellung synthetischer Haushaltslastprofile Betreuer: Dr. Wehrmann, Prof. Wenzl, Dipl.-Ing. Spielmann
Hainke, Britta	Modellierung des thermischen Bedarfs eines Einfamilienhauses Betreuer: Dr. Wehrmann, Prof. Beck, Dipl.-Ing. Spielmann
Klink, Jacob	Untersuchung der gegenseitigen Beeinflussung von parallelen 110 kV-Baueinsatzkabeln Betreuer: Dr. Wehrmann, Prof. Beck, Dipl.-Ing. Kröger (Schleswig-Holstein Netz AG)

Djamen, Jorel	Modellierung eines Vergasers mit Hinblick auf der Temperatur-distribution des Feststoffes Betreuer: Dr. Mancini (IEVB), Prof. Beck
Alidou, Nourou	Charakterisierung von elektrischen Ersatzschaltbildern der Lithium-Batterie unter Anwendung der elektrochemischen Impedanzspektroskopie Betreuer: Prof. Wenzl, Prof. Kunz (ICVT), Dipl.-Ing. Tchoupou Lando
Stenger, Simon	Energieprozessanalyse bei der Johnson Matthey Chemicals GmbH Betreuer: Dr. Mancini (IEVB), Prof. Beck
Dreher, Miriam	Degradationsmechanismen von Lithium-NMC- und LFP-Batterien: Eine Untersuchung mittels Inkrementeller Kapazitätsanalyse Betreuer: Prof. Wenzl, Dr. Benger, Dipl.-Ing. Oberland
Hartleb, Michael	Bewertung der elektrischen Eigenschaften von Lithium-Ionen-Zellen unter Berücksichtigung der mechanischen Verspannung Betreuer: Prof. Wenzl, Dr. Benger, Dipl.-Ing. Oberland
Keßler, Fabian	Schnellladeverfahren bei unterschiedlichen Bauformen, sowie Zellchemien von Lithium-Ionen-Batterien Betreuer: Dr. Benger, Prof. Wenzl, Herr Thiele, M. Eng.
Heim, Tobias Thomas	Carbon Footprint eines Drehstrom-Asynchronmotors nach EVPG mit Wirkungsgradklasse IE3 im Vergleich zu einem SINOCHRON [®] Motor mit Wirkungsgradklasse IE4 im Life Cycle Modell Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Wenzl, Dipl.-Sicherheitsing. (FH) Bartmann (ABM), Dipl.-Ing. Fickentscher (ABM)

- Lotfi Abardeh, Nazanin Area Potential Analysis for Wind Farms in Lower Saxony in 2050
Betreuer: Dr. Zum Hingst, Herr Hashemifarzad, M. Sc.
- Al-Ahwal, Hareth Untersuchung der Speichereinsatzstrategien zur Nutzung der negativen Residuallast des zukünftigen Energieversorgungssystems
Betreuer: Prof. Wenzl, Dr. Wehrmann
- Bockwinkel, Daniel Energetische Bilanzierung von Nichtwohngebäuden als Basis für die Bewertung der Nachhaltigkeit
Betreuer: Prof. Kühl (Hochschule Braunschweig/Wolfenbüttel), Prof. Beck
- Föppl, Tilmann Blindleistungsbereitstellung durch Windenergieanlagen
Betreuer: Dr. Wehrmann, Prof. Beck, Dipl.-Ing. Leske (Enertrag AG), Herr Klaas, M. Sc.
- Qiu, Yizhou Optimierte Zustandsschätzung in einem Mittelspannungsübertragungsnetz
Betreuer: Prof. Beck, Dr. Turschner, Lin, M. Sc.

2019

- Krogmann, Felix Funktionsweise und Inbetriebnahme eines magnetoelastischen Drehmomentsensors am Prüfstand
Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Beck
- Nikolai, Lukas Georg Entwicklung und Bewertung kombinierter Kühlkonzepte für stationäre Batterie-Wechselrichtersysteme
Betreuer: Prof. Beck, Dr. Benger

Pötsch, Jens Karl	Thermische Modellierung eines Umrichtersystems zur Erbringung von Momentanreserve Betreuer: Dr. Bengler, Prof. Beck, Dipl.-Ing. Deblon
Brandt, Maria Luana	Wirtschaftliche Betrachtung eines AC -gekoppelten PV-Batteriespeichersystems im Bereich der Eigenversorgung Betreuer: Dr. Wehrmann, Prof. Schenk-Mathes (WiWi), Dipl.-Ing. Spielmann
Basse, Jannik	Technische Voruntersuchung einer Pilotanlage einer regenerativen Ladestation Betreuer: Dr. Bengler, Prof. Beck, Kreth, M. Sc., Dipl.-Wirtsch.-Ing. Fuhrmeister (Landwind Verwaltungs GmbH & Co. KG)
Tillmanns, Marcus Franz	Schutzmaßnahmen in DC-Netzen Betreuer: Dr. Wehrmann, Prof. Beck, Kreth, M. Sc.
Mordhorst, Marcel	Analyse von Anforderungen an die Ladeinfrastruktur und Maßnahmen zur Integration in Quartierslösungen Betreuer: Dr. Wehrmann, Prof. Beck, Kreth, M. Sc.
Dweiat, Abdallah	Steuerung von Schrittmotoren für eine Trommelapplikation mithilfe einer FPGA-basierten Steuerung Betreuer: Prof. Siemers (IEI), Dr. Turschner
Weiß, Jennifer Annabell	Alterungsuntersuchung von Lithium-Ionen-Batterien der Zellchemie NMC/Graphit mit Hilfe der inkrementellen Kapazitätsanalyse Betreuer: Dr. Bengler, Prof. Wenzl, Grabow, M. Sc.
Martinez Martinez, Alberto	Entwicklung eines Verfahrens zur Initiierung von internen Kurzschlüssen, aufgrund von dendritischer Kupferabscheidung in Lithium-Ionen-Batterien Betreuer: Prof. Wenzl, Dipl.-Ing. Oberland

Aliaj, Ardit Maksim	Verfahren zur Zustandsanalyse von Lithium-Ionen-Batterien Betreuer: Prof. Wenzl, Dr. Benger, Dipl.-Ing. Oberland
Lange, Helma Anneliese Elli	Auswirkungen der Elektromobilität auf Verteilnetze Betreuer: Dr. Wehrmann, Prof. Beck, Kreth, M. Sc.
Rohde, Hendrik	Entwicklung von übertragbaren synthetischen elektrischen Haushaltslastprofilen aus gemessenen Lastgängen Betreuer: Dr. Wehrmann, Prof. Beck, Dipl.-Ing. Spielmann
Muhsmann, Sönke	Potential des bidirektionalen Ladens von Elektrofahrzeugen zur Bereitstellung von Regelleistungen Betreuer: Prof. Beck, Dr. Wehrmann, Kreth, M. Sc.
Depner, Tobias	Energetische Optimierung von Biogasanlagen - Einflüsse auf den Stromverbrauch unterschiedlicher Rührwerkstypen Betreuer: Dr. Siemers, Prof. Beck, Kreth, M. Sc.
Schade, Curd	Ökonomische, technische und ökologische Analyse des Second-Life Konzepts für Lithium-Ionen-Batterien Betreuer: Prof. Wenzl, Dr. Benger
Winning, Frank	Entwicklung eines Verfahrens zur reproduzierbaren Ent- stehung von irreversiblen Lithium-Plating Betreuer: Prof. Wenzl, Dr. Benger, Dipl.-Ing. Oberland, Grabow, M. Sc.
Hebenbrock, André	Ladezustandsbestimmung von Lithium-Ionen-Zellen im dynamischen Betrieb Betreuer: Prof. Wenzl, Prof. Kunz (ICVT), Grabow, M. Sc.
Müller, Nils-Hendrik	Überarbeitung des Energiekonzepts zur autarken Strom- versorgung für eine Wanderbaude mit Ausflugsstätte Betreuer: Dr. zum Hingst, Prof. Beck, Kreth, M. Sc.

Projektarbeiten**2018**

Chebbi, Aymen	Untersuchung eines CIGS Solarmoduls Betreuer: Dr. Turschner
Al-Zaidi, Hakim A. M. Farhan, Abobakr A. S. Khajryan, Kabriil	Beschreibung von Umrichtertopologien und Regelverfahren für netzeinspeisende Umrichtersysteme Betreuer: Dr. Turschner
Guo, Yanwen Xie, Yuhui	Kombinierter Betrieb von Wärmepumpen und PV-Anlagen in Haushalten Betreuer: Dr. Wehrmann, Dipl.-Ing. Spielmann
Stelmaszyk, Henriette Sophia	Modellierung eines Niederspannungsnetzes zur Simulation und Analyse unsymmetrischer Belastungen Betreuer: Dr. Wehrmann, Dipl.-Ing. Spielmann
Stael von Holstein, Jekaterina	Modeling of a Grid-Forming Inverter Using DigSILENT Power Factory Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Beck
Jia, Fei	Die Drahtlose Datenübertragung für Smartsteckdosen Betreuer: Dr. Turschner
Reineke, Steven	Inbetriebnahme des Versuchsstands "Multiport-VISMA-HGÜ" Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Beck
Chen, Yong	Simulation der Regelung eines einphasigen netzgekoppelten Wechselrichter Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Beck

Basse, Jannik Jansen, Marcel	Auslegung elektrifizierter Buslinien im ÖPNV Betreuer: Dr. Bengler, Prof. Wenzl
Rudolph, Lukas	Auslegung eines Batteriespeichers zum Ausgleich von Prognosefehlern an einem Windpark Betreuer: Dr. Wehrmann, Kreth, M. Sc.
Piontek, Daniel Alexander	Modellbildung zur Simulation eines Hochleistungsbohr- strangs Betreuer: Dr. Turschner, Klaas, M. Sc.
Mosch, Gesa	Vergleich von Druckluftspeicherkraftwerken mit anderen Speichertechnologien Betreuer: Dr. zum Hingst, Fries, M. Sc.
Keßler, Fabian Geißler, Pascal	Evaluation eines Prognosebasierten Energiemanagements- systems auf Haushaltsebene Betreuer: Dr. zum Hingst, Dipl.-Ing. Spielmann

Diplom- und Masterarbeiten**2018**

Hopfauf, Tatjana	Die Netzentgeltsystematik im Zuge der Energiewende - Beteiligung der Erzeuger an den Netzentgelten Betreuer: Dr. Wehrmann, Prof. Maubach, Dipl.-Wirtsch.-Ing. Koring
Sindjui Youssa, Serge Armand	Synchronmaschinennachbildung - Aufbau und Modellierung eines Synchronverters Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Wenzl

Carulli, Roberto	Energieeffizienz und Kostenanalyse von Wärmeschutz und Energieversorgung am Beispiel von zwei Einfamilienhäusern Betreuer: Prof. Kühl, Prof. Wulf (WiWi)
Schaper; Claus	Potentiale der thermischen Nutzung von Abfallstoffen in Produktionsprozessen am Beispiel von Smurfit Kappa Herzberg Solid Board GmbH Betreuer: Prof. Kühl, Prof. Zimmermann (WiWi)
Orazov, Nury	Identifikation und Modellbildung des Verhaltens von Lithium-Ionen-Batterien bei dynamischen Belastungen Betreuer: Dr. Benger, Prof. Beck, Beushausen, M. Sc.
Sölter, Hendrik	Untersuchung verschiedener Erkennungsverfahren für die Netzfrequenz am Beispiel eines System-Splits im Verbundnetz Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Beck
Eleyat; Mohammed	Wasserstoffbereitstellung für die Stahlindustrie Betreuer: Prof. Beck, Prof. Turek (ICVT), Dr. Vodegel (CUTEC)
Jiang, Mengying	Research on Inverters in Microgrids and Simulation of PQ Control Strategy Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Beck
Song, Xiaokai	Simulation der Mausbewegung mit der Hilfe des Beschleunigungssensors und des Programms LabVIEW Betreuer: Prof. Beck, Dr. Turschner
Yazji, Majd	Oberschwingungs-Analyse an Photovoltaik-Kraftwerken unter Bereitstellung von netzdienlicher Blindleistung Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Beck, Herr Grab (ISE)

Sun, Yue	Planung von Ladestationen für Elektrofahrzeuge und deren Verteilung im Stromnetz Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Bohn (IEI)
Xu, Hailin	Regelung einer permanentmagneterregten Synchronmaschine mit Matlab/Simulink Betreuer: Prof. Bohn (IEI), Dr. Turschner
Grabow, Jens	Möglichkeiten der inkrementellen Kapazitätsanalyse für die Batteriezustandserkennung von Lithium-Ionen-Batterien Betreuer: Prof. Wenzl, Prof. Kunz (ICVT), Dr. Bengler
Schoke, Daniel	Optimierung des Energiemanagementsystemes des Werks Borth der esco - european salt GmbH & Co. KG Betreuer: Prof. Schwindt (WiWi), Dr. Wehrmann
Soh Mache, Astride Maurane	Erstellung einer Modellbibliothek für verschiedene BLDC-Motoren, Reglerstrategien und Entwicklung an einem Beispiel Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Bohn (IEI)
Wang, Ying	Research on Droop-Controlled Microgrid Inverter with Pre-synchronization Betreuer: Prof. Bohn (IEI), Dr. Turschner
Scherke, Gert	Erstellung von Auslegungsgrundlagen für einen Vanadium-Redox-Flow-Batteriestack Betreuer: Prof. Wenzl, Prof. Turek (ICVT)
Reineke, Steven	Prognose elektrischer Haushaltslasten im Rahmen eines Energiemanagementsystems Betreuer: Dr. Wehrmann, Prof. Beck

Wagner, Artur	Integration einer Power-to-Heat Anlage am praktischen Beispiel Betreuer: Prof. Beck, Dr. zum Hingst, Herr Eckert und Frau Rödel (Elbe-Energie GmbH)
Alvarez Fernandez, Estela	Charakterisierung eines Batteriespeichersystems nach dem BVES Effizienzleitfaden Betreuer: Prof. Beck, Dr. zum Hingst, Herr Senn (Bosch Thermotechnik), Dr. Arnold (Bosch Thermotechnik)
Ilsen, Benjamin	Optimierte Betriebsweise einer Papierfabrik unter Berücksichtigung der Regelleistungsbereitstellung Betreuer: Dr. Wehrmann, Prof. Beck, Herr Kreth, M. Sc., Dipl.-Wirt.-Ing. Jacobi (Smurfit Kappa)
Li, Mingji	Untersuchung der Stromhomogenität und Ausgangsleistung von Brennstoffzellen mit unterschiedlichen Gaszuleitungsanordnungen Betreuer: Prof. Wenzl, Prof. Turek (ICVT), Dr. Benger
Lin, Bo	Modellierung von Komponenten eines regenerativen Speicherkraftwerks: Gasturbine, Synchrongenerator, Elektrolyse, Brennstoffzelle und Gleichstrommaschine Betreuer: Prof. Bohn (IEI), Dr. Turschner
Yu, Pinghui	Eigensichere Batteriemanagementsysteme für Lithium-Ionen-Batterie Betreuer: Prof. Wenzl, Dr. Turschner
Cai, Wenbin	Simulation of Resonant Controller in a Three-Phase Inverter with MATLAB/Simulink Betreuer: Prof. Bohn (IEI), Dr. Turschner

- Tchamadeu Touko, Cedric H. Untersuchung verschiedener Frequenzerkennungsverfahren zur Identifizierung eines System-Splits im Verbundnetz
Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Beck
- Schramm, Benjamin Dreidimensionale Modellentwicklung von Lithium-Ionen-Batterien bei dynamischen Belastungen an unterschiedlichen Zellgeometrien mit COMSOL-Multiphysics
Betreuer: Prof. Beck, Dr. Benger, Herr Beushausen, M.Sc.
- Klaas, Christoph Simulativer Vergleich von virtuellen Synchronmaschinen und netzbildenden Umrichtern
Betreuer: Prof. Beck, Dr. Turschner, Dipl.-Ing. Ufkes
- Ge, Mingliang Erforschung eines photovoltaisch netzgekoppelten Solarwechselrichters
Betreuer: Prof. Bohn (IEI), Dr. Turschner
- Chai, Ruizhao Simulation der Antriebstrangen einer Windkraftanlage auf netzseitigem Umrichter zur Wirk- und Blindleistungseinspeisung
Betreuer: Prof. Bohn (IEI), Dr. Turschner

2019

- Mba Wafo, Yves Anderson Aufbau und Programmierung eines kompakten dSPACE Hil Simulators zum Betrieb der E-Maschinenregelung auf der Steuerplatine eines Pulswechselrichters
Betreuer: Prof. Beck, Dr. Turschner, Dipl.-Ing. Kliner (VW), Dipl.-Ing. Koedel (VW), Herr Hellmuth, M. Sc. (VW)
- Hamrahi, Pejman Funktionale Implementation einer NVH-Optimierung für eine Asynchronmaschine
Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Beck, Dr. Fleischer (IAV)

- Njeyon Tchana, Joel Stephane Verlauf von Modellparametern während der Alterung von Lithium-Ionen-Zellen
Betreuer: Prof. Wenzl, Dr. Wehrmann, Dipl.-Ing. Tchoupou Lando
- Seikel, Andreas Jonathan Eine Analyse zur Verteilung der Netzkosten auf Grundlage der Lastflüsse im Verteilnetz
Betreuer: Prof. Maubach, Dr. Wehrmann,
Dipl.-Wirtsch.-Ing. Koring
- Ehlers, Tiara Beschreibung des Planungsprozesses der Modernisierung des Heizkraftwerkes Wolfsburg-Nord/Süd einschließlich der Dimensionierung der Hilfsdampferzeugung
Betreuer: Dr. Mancini (IEVB), Prof. Beck
- Stael von Holstein, Jekaterina Modeling and Validation of a Grid-Forming Inverter Using DigSILENT Power Factory
Betreuer: Prof. Beck, Dr. Turschner
- Wang, Hongyi Untersuchung von Detektierungsmethoden vor den Thermal Runaway in Lithium-Ionen-Batterien
Betreuer: Dr. Benger, Prof. Wenzl, Orazov, M. Sc.
- Al-Zaidi, Hakim Ali
Mohammed Power to Gas als Bestandteil des Druckluftspeicherkraftwerks
Betreuer: Dr. Wehrmann, Prof. Beck, Fries M. Sc.
- Moeske, Anna Ingrid
Adaline Untersuchung und Bewertung einer modellgestützten Vorhersage von Photovoltaikerträgen auf Basis von Wetterprognosen
Betreuer: Dr. Wehrmann, Prof. Beck
- Liu, Jing Overview and comparison with different Control strategies of Grid Tie Inverter with Matlab/Simulink of conventional Droop Control
Betreuer: Prof. Bohn (IEI), Dr. Turschner

- Jin, Ansheng Simulation Research on Dynamic Characteristics and Stability of Virtual Synchronous Generator Based on Matlab/Simulink
Betreuer: Prof. Bohn (IEI), Dr. Turschner
- Guo, Yanwen Auslegung teillautarker Energiecluster mit Hilfe von Standardlastprofilen gespeist aus erneuerbaren Energien in MATLAB-Simulink
Betreuer: Prof. Beck, Dr. Turschner, Gollenstede, M. Sc.
- Griemert, Rudolf Frequenzstabilitätsbetrachtung eines Multi-VSG-Systems am Beispiel eines Mehrknoten-Inselnetzes
Betreuer: Prof. Beck, Dr. Wehrmann, Gollenstede M.Sc.
- Epping, Dennis Wirtschaftlichkeitsbetrachtung einer Kleinwindenergieanlage bis 15 kW in einem Gewerbegebiet in Brandenburg
Betreuer: Dr. Wehrmann, Prof. Beck, Fries, M. Sc.
- Khahjryan, Kabriil Bionische Methode zur Kondensatabfuhr bei einem neuartigen Wärmeübertrager
Betreuer: Prof. Weber (IEVB), Prof. Beck, Dr.-Ing. Morgens-tern (Fraunhofer-Institut für Solar Energiesysteme),
Dr. Mancini (IEVB)
- Zufall, Nils Cloud-basierte Verfahren zur Klassifizierung von Fehlzuständen in prozesstechnischen Anlagen
Betreuer: Prof. Siemers (IEI), Dr. Turschner, Dipl.-Ing. Grieb (Siemens AG), Dipl.-Phys. Bierweiler (Siemens AG)
- Stelmaszyk, Henriette Sophia Modellierung eines Energiemanagementsystems zur netzdienlichen Einspeiseregulung in Privathaushalten
Betreuer: Dr. Wehrmann, Prof. Beck, Kreth, M. Sc.

Reiche, Christian	Analyse des Zweitnutzungspotentials von Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen Betreuer: Dr. Bengler, Prof. Goldmann (IFAD), Pietrzak (Volkswagen AG)
Wichmann, Jascha André	Wege zur periodischen Rezertifizierung des Energiemanagementsystems am Beispiel von der Firma Jungheinrich am Standort Norderstedt Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Beck, Will (Jungheinrich)
Sun, Hailin	Simulation des bürstenlosen Gleichstrommotors mit PI-Regler mit Partikelschwarmoptimierung Betreuer: Prof. Bohn (IEI), Dr. Turschner
Yuan, Tao	Simulation des verallgemeinerten Integrators als Teil einer Wechselrichterregelung Betreuer: Prof. Bohn (IEI), Dr. Turschner
Hu, Lin	State of Safety von Lithium-Ionen-Batterie-Bewertung unter Nutzung von Daten eines Tesla Betreuer: Prof. Wenzl, Dr. Bengler
Piontek, Daniel Alexander	Modellierung und Simulation eines Hochleistungsbohrstrangs Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Beck, Klaas, M. Sc.
Schmetz, Benedikt K.	Konzept für einen SPS-gesteuerten Prozess in der innerbetrieblichen Logistik eines Unternehmens - Konzept zur Automatisierung der Erfassung, Identifizierung, Sortierung und intelligenten Lagerung von farb- oder punktcodierten Objekten mit Hilfe der speicherprogrammierbaren Steuerung ZX09A der Firma Zander GmbH & Co. KG und Realisierung in einem Simulationsmodell Betreuer: Prof. Siemers (IEI), Dr. Turschner, Feller, M. Sc. (IEI)

2 Veröffentlichungen, Dissertationen, Habilitationen

2.1 Zeitschriften- und Tagungsaufsätze, Patente / -anmeldungen

Zeitschriften- und Tagungsaufsätze, Bücher

2018

- Gollenstede, J. Design of a High-Performance Battery Converter System for Providing Synthetic Inertia at Distribution Network Level
Beushausen, L.
Benger, R. EPE 2018 EDDE Europe,
Beck, H.-P. Power Electronics in Transmission and Distribution Systems, Riga, Lettland, (17. - 21. September 2018)
Schael, M.
...
- Fries, A.-K. Huntorf 2020 - Improvement of Flexibility and Efficiency of a Compressed Air Energy Storage Plant based on Synthetic Hydrogen
Kaiser, F.
Beck, H.-P.
Weber, R. Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems (NEIS), Hamburg, (2018)
- Koring, K. Weiterentwicklung der Netzentgeltssystematik unter Berücksichtigung der tatsächlichen Netzinanspruchnahme
Maubach, K.-D.
Beck, H.-P. et Energiewirtschaftliche Tagesfragen, Ausgabe 09, S. 25 - 28, (September 2018)
- Kerdphol, Th. Enhanced Virtual Inertia Control based on Derivative Technique to Emulate Simultaneous Inertia and Damping Properties for Microgrid Frequency Regulation
Rahman, F. S.
...
Turschner, D. IEEE Access, Print ISSN: 2169-3536, Digital Object Identifier: 10.1109/ACCESS.2019.2892747, (2018)
Beck, H.-P.

2019

- Fries, A.-K. Einsatzoptimierung des Druckluftspeicherkraftwerks Huntorf am
Wehrmann, E.-A. Day-Ahead-Markt
Beck, H.-P. Tagungsband: Kraftwerkstechnik 2019 Power Plant Technology,
SAXONIA Verlag, ISBN 978-3-934409-93-4, (2019)

Patentanmeldungen / Patenterteilung

- Beck, H.-P. Verfahren und Vorrichtung zur Hochspannungs-Gleichstrom-
Hesse, R. Übertragung zwischen mehreren Wechselstromnetzen
Turschner, D. Aktenzeichen: DE 10 2012 107 602.2
Anmeldetag: 20.08.2012
Patent erteilt am: 18.01.2018

Dissertationen:**2018**

- Ranaweera, Chaminda Short- and Long-term Stability of a 100 % Renewable Autonomous
Power System for a Typical Geographical Region
Referenten: Prof. Beck, Prof. Faulstich
- Bentaleb, Abdelhamid Schalttopologien und Regelungskonzepte zur Steigerung der
Effizienz direkter Abwärmenutzung in thermoelektrischen Ener-
giesystemen
Referenten: Prof. Beck, Prof. Bohn (IEI)
- Kunle, Eglantine Incentives to value the dispatchable fleet's operational flexibility
across energy markets
Referenten: Prof. Faulstich, Prof. Hanke-Rauschenbach (Leibniz
Universität Hannover)

Knopp, Michael Retrofitting Autonomous Island Power Systemes
Referenten: Prof. Leithner (TU Braunschweig), Prof. Beck

Schwake, Benjamin Vierleiter-Umrichter mit aktiv moduliertem Neutralleiter zur
Netzsymmetrierung
Referenten: Prof. Beck, Prof. Engel (TU Braunschweig)

2019

Hashemifarzad, Ali Electrical Load Forecasting Using Adaptive Neuro-Fuzzy Inferen-
ce System
Referenten: Prof. Faulstich, Prof. Siemers (IfI)

Koring, Karolina Lastflussabhängige Kostenumlageverfahren zur Bestimmung von
Netzentgelten in Zeiten der Energiewende
Referenten: Prof. Beck, Prof. Maubach

Schmicke, Christian Energiebilanzen beim wärmegeführten Einsatz einer Kraftwärme/-
kältekopplung zur Klimatisierung von Elektrofahrzeugen
Referenten: Prof. Beck, Prof. Gusig, (Hochschule Hannover)

Lin, Guosong Zustandsschätzung von Mittelspannungsnetzen mit unvollständiger
Messinfrastruktur
Referenten: Prof. Beck, Prof. Timme (TU Dresden)

Bedrunka, Alexander Einfluss des Akkus auf den Servicegrad von automatischen sta-
tionsbasierten Pedelec-Vermietsystemen
Referenten: Prof. Beck, Prof. Gusig (Hochschule Hannover)

Unger, Daniel Energiewirtschaftliche Integration von mehrfach genutzten Solar-
stromspeicher
Referenten: Prof. Engel (TU Braunschweig), Prof. Beck

2.2 Seminare

- Ohrdes, T. EnEff:Stadt Verbundvorhaben:
 Knoop, M. Wind-Solar-Wärmepumpen-Quartier - Erneuerbar betriebene
 Schneider, E. Wärmepumpen zur Minimierung des Primärenergiebedarfs
 Spielmann, V. 4. Dialogplattform Power-to-Heat, veröffentlicht digital unter:
 Bast, O. <https://www.vde.com/de/etg/arbeitsgebiete/v2/p2h2018>,
 Franzen, L. (11. – 12. Juni 2018)
 Behnisch, J.
- Fries, A.-K. Nutzung von PV-Energie für den Eigenbedarf von Nachtspei-
 Weeber, A. (tekmar cherheizungen und Wärmepumpen
 Regelsysteme GmbH) 4. Dialogplattform Power-to-Heat, Veröffentlichung in IEEE
 Wehrmann, E.-A. Xplore: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8669476>,
 Beck, H.-P. (11. – 12. Juni 2018)
- Benger, R. Sicherheit von Lithium-Ionen-Batteriesystemen
 Grabow, J. 9. Clustermeeting IST Mobility, Goslar, (27.03.2019)
- Grabow, J. Advanced filtering for Incremental Capacity Analyses (ICA)
 Beushausen, L. applied to various lithium ion batteries
 Benger, R. Batterietag: Kraftwerk Batterie, Posterausstellung, Aachen,
 (02. - 04. April 2019)
- Grabow, J. Gefahren und Sicherheitskonzepte zu Lithium-Batterien
 Benger, R. Fachvereinigung Arbeitssicherheit e. V. (FASI) Brand- und
 Explosionsschutz, Wiesbaden, (11. April 2019)
- Ohrdes, T. Wind-Solar-Wärmepumpen-Quartier: Dynamische Modellierung
 Knoop, M. und messtechnische Evaluation der Strom- und Wärmeversor-
 Schneider, E. gung im Quartier
 Spielmann, V. Dialogplattform Power-to-Heat, (12. – 13. September 2019)
 Bast, O.
 Franzen, L.
 Behnisch, J.

Benger, R. Aktueller Stand und Entwicklung der Batterieforschung für eine nachhaltige Mobilität
Klimaschutzagentur Hildesheim: Mobilität der Zukunft?, Hildesheim (11. November 2019)

2.3 Veranstaltungen, Exkursionen, Gastaufenthalte

Veranstaltungen:

22 Januar 2018

Doktorandenseminar (Vorträge mit anschließender Diskussion)

28. Mai 2018

Doktorandenseminar (Vorträge mit anschließender Diskussion)

07. Juni 2018

EST'ler-Grillen

04. Oktober 2018

Doktorandenseminar (Vorträge mit anschließender Diskussion)

28. September 2018

Dr. Jörg Buddenberg wurde zum Honorarprofessor bestellt



Foto: Areva Multibrid/Jan Oelker, privat

10. Dezember 2018

Weihnachtsfeier des IEE

- Führung durch die Dorotheer Rösche und den Caroliner Wetterschacht
- anschließend gemeinsames Abendessen

18. Februar 2019

Doktorandenseminar (Vorträge mit anschließender Diskussion)

31. März 2019

Verabschiedung in den Ruhestand von Herrn Prof. Beck durch das Präsidium



(Quelle: Melanie Bruchmann)

27. Juni 2019

EST'ler-Grillen

28. November 2019

Unser Wissenschaftlicher Direktor

Herr Dr. Ernst-August Wehrmann wurde zum Anfang des Wintersemesters in den Ruhestand verabschiedet.



Verabschiedung Präsidium

(Quelle: Presse- und Öffentlichkeitsarbeit der TU Clausthal)

12. Dezember 2019

Weihnachtsfeier des IEE

- Bowling
- anschließend gemeinsames Abendessen

Exkursionen:

25. Januar 2018

Besichtigung der Firma Vestas in Lübeck im Rahmen der Vorlesung “Sonderprobleme elektrischer Maschinen”

05. Februar 2018

Exkursion zum Batteriespeicher der enercity Hannover im Rahmen der Vorlesung “Batteriesystemtechnik und Brennstoffzellen” und der Vorlesung “Elektrische Energieverteilung”



(Quelle: EW, 25.10.2017; Daimler)

11. Juli 2019

Besichtigung des KKW Grohnde im Rahmen der Vorlesung “Elektrische Energieerzeugung”

28. August 2019

Besichtigung der Salzgitter AG im Rahmen der Vorlesung “Grundstoffindustrie und Energiewende”

3 Forschungsarbeiten

3.1 Geförderte Forschungsvorhaben

Im Berichtszeitraum wurden folgende geförderte Forschungsvorhaben bearbeitet:

BMW über Projektträger Jülich

Wind-Solar-Wärmepumpen-Quartier - Erneuerbar betriebene Wärmepumpen zur Minimierung des Primärenergiebedarfs

Teilvorhaben: Elektrische Verteilnetze für Wärmepumpenquartiere

Kurzbezeichnung: WPuQ

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Spielmann, Frau Fries, M. Sc.

Projektkoordinator: Dr. Wehrmann

Projektleiter: Prof. Beck

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

Huntorf 2020 - Technologieentwicklung und Effizienzgewinn durch Neu-Konzipierung des Gesamtprozesses Druckluftspeicherkraftwerk Huntorf mit regenerativ erzeugtem Wasserstoff

Kurzbezeichnung: Huntorf 2020

Bearbeiter: Frau Fries, M. Sc.

Projektkoordinator: Dr. Wehrmann

Projektleiter: Prof. Beck

Nbank / Power Innovation

Entwicklung eines innovativen Umrichtersystems mit Speicher zur Eigenbedarfsoptimierung und Netzstabilisierung

Kurzbezeichnung: Solar VISMA

Bearbeiter: Herr Klaas, M. Sc.

Projektkoordinator: Dr. Turschner

Projektleiter: Prof. Beck

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

ZIM

Kurzbezeichnung: Magnet-Rad

Bearbeiter: Dr. Turschner

Projektkoordinator: Dr. Turschner

Projektleiter: Prof. Beck

BMBF über Projektträger Jülich

Kollektive Nichtlineare Dynamik Komplexer Stromnetze: Dynamik, Statistik und Netzsicherheit

Kurzbezeichnung: CoNDYNetII

Bearbeiter: Herr Reineke, M. Sc.

Projektkoordinator: Dr. Turschner

Projektleiter: Prof. Beck

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

Modulare Hochleistungsbatteriesysteme in Verbindung mit sicherer Schnellladetechnik

Kurzbezeichnung: MoBat

Bearbeiter: Herr Thiele, M. Sc., Dipl.-Ing. Oberland

Projektkoordinator: Dr. Benger

Projektleiter: Prof. Beck

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

Teilbereich: Systemdienstleistung für den sicheren Betrieb des Energieversorgungssystems:

Momentanreserve mit Hochleistungsbatterien

Kurzbezeichnung: ReserveBatt

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Deblon, Herr Grabow, M. Sc., Herr Reineke, M. Sc.

Projektkoordinator: Dr. Benger

Projektleiter: Prof. Beck

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

Teilbereich: Ereignisbasiertes Alterungsmodell für Lithium-Ionen-Batterien für hochdynamische Belastungen

Kurzbezeichnung: ReserveBatt

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Tchoupou Lando

Projektkoordinator: Dr. Bengler

Projektleiter: Prof. Beck

Nbank

Sicherheit von Lithium-Ionen-Batterien: Stabilität und Detektionsmöglichkeiten

Bearbeiter: Herr Er, B. Sc., Herr Grabow, M. Sc., Herr Klink, M. Sc., Herr Orazov, M. Sc.

Projektkoordinator: Dr. Bengler

Projektleiter: Prof. Beck

EFRE/NBank

Investitionen für eine kombinierte und vereinigte Technologiekonzipierung nachhaltiger Material- und Energiekreisläufe (CUTEC-I), Teilprojekt Energiesystemintegration

Bearbeiter: Dr. Siemers

Projektkoordinator: Dr. Zum Hingst

Projektleiter: Prof. Beck

Landkreis Emsland/Stadt Lingen

Begleitforschung zum Gesamtsystem des Reallabors Emsland (Vorstudie Energieregion südliches Emsland)

Bearbeiter: Dr. Siemers, Dr. Zum Hingst

Projektkoordinator: Dr. Zum Hingst

Projektleiter: Prof. Beck

FNR: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.

Biomasse-Integration zur System Optimierung in der Energieregion Hümmling mit ganzheitlichem, sektorübergreifendem Ansatz (BISON)

Bearbeiter: Herr Piontek, M. Sc., Dr. Siemers

Projektkoordinator: Dr. Zum Hingst

Projektleiter: Dr. Zum Hingst

Volkswagen Stiftung

Innovative Akzeptanzforschung für nachhaltige Entwicklung durch Gamification (GAME) -

Teilprojekt Energie

Bearbeiter: Dr. Hashemifarzad

Projektkoordinator: Dr. Zum Hingst

Projektleiter: Prof. Beck

Eigenprojekt CUTEC

Ein Beitrag zur elektrischen Energieübertragung im Nahfeld von Tesla-Spulen mit kapazitiver Kopplung

Bearbeiter: Herr Tkalčec, M. Sc.

Projektkoordinator: Dr. Zum Hingst

Projektleiter: Prof. Beck

EFRE/NBank

Energie- und Wasserspeicher Harz (EWAZ): Entwicklung innovativer Ansätze zur Kopplung nachhaltiger Systemdienstleistungen von Hochwasserschutz, Ressourcensicherung und Energiespeicherung

Bearbeiter: Herr Şişik, M. Eng.

Projektkoordinator: Dr. Zum Hingst

Projektleiter: Prof. Beck

Umweltbundesamt

Ressourceneffizienzsteigerung in der Metallindustrie

Kurzbezeichnung: DownMet

Bearbeiter: Prof. Faulstich

Projektleiter: Prof. Faulstich

3.2 Projektübersichten

Die folgende Übersicht und die sich anschließenden neuen bzw. aktualisierten Kurzbeschreibungen der von den wissenschaftlichen MitarbeiternInnen durchgeführten Forschungstätigkeiten geben Auskunft über den derzeitigen Stand der laufenden Projekte in den fünf Abteilungen:

- Nichtelektrische Energiesysteme
- Elektrische Energiesysteme
- Leistungsmechatronik / Antriebe
- Elektrische Energiespeichertechnik
- Energiesystemintegration (CUTEC)

Das folgende Bild 1 soll die diesbezügliche neue Institutsstruktur erläutern.

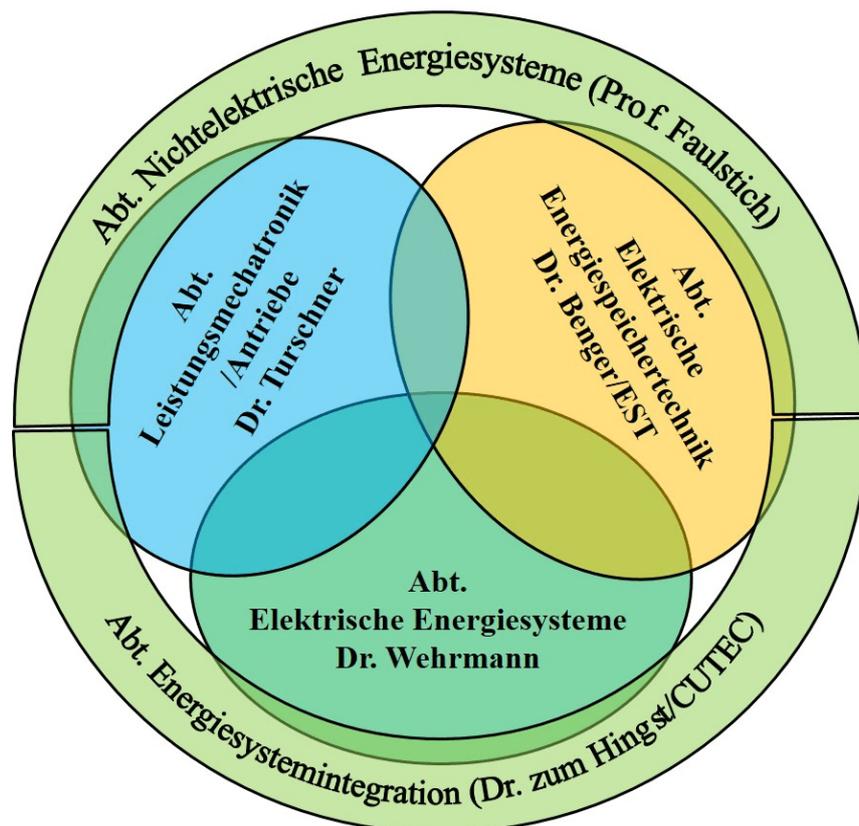


Bild 1: Neue Organisationsstruktur des IEE bis zur Wiederbesetzung der Kernprofessur Elektrotechnik (Nachfolge Beck)

Projektübersicht

Abteilungsleiter: Prof. Dr.-Ing. Martin Faulstich
Tel.: +49-5321-3816-8059
E-Mail: martin.faulstich@tu-clausthal.de

Abteilung Nichtelektrische Energiesysteme (Lehrstuhl für Umwelt- und Energietechnik)

Inhaltliches Profil

Einführung

Die nachhaltige Industriegesellschaft benötigt sowohl die Energiewende als auch die Ressourcenwende. Beide sind eng gekoppelt, da Erzeugung, Verteilung und Nutzung des auf regenerativen Energieträgern basierenden Energiesystems deutlich mehr wirtschaftsstrategische Rohstoffe benötigen als ein auf konventionellen Energieträgern basierendes Energiesystem. Langfristig können die dafür erforderlichen Rohstoffe nur durch Recyclingsysteme bereitgestellt werden. Der Lehrstuhl für Umwelt- und Energietechnik, zugleich Arbeitsgruppe „Nichtelektrische Energiesysteme“ des Instituts für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme (IEE), arbeitet an der Kopplung von elektrischen und nichtelektrischen Energiesystemen sowie der Kopplung von Energiewende und Ressourcenwende.

Nach einer inhaltlichen Einführung zu Klimaschutz und Energiesystemen werden ausgewählte Promotionsprojekte vorgestellt, die praxisnah mit Partnern aus der Wirtschaft durchgeführt werden. Die Projekte sind eng mit den Inhalten der Lehrveranstaltung „Dynamische System in Natur, Technik und Gesellschaft“ verbunden.

Klimawandel und Klimaschutz

Wir leben in einer planetar begrenzten Welt. Eine besonders zu beachtende Grenze ist die Aufnahmefähigkeit der Atmosphäre für Treibhausgase. Die neue zivilisatorische Grenze ist nicht mehr die Verfügbarkeit von Kohle, Öl und Gas, sondern wieviel Kohlendioxid aus deren Verbrennung noch in die Atmosphäre entlassen werden darf. Es geht also nicht darum, wie lang Reserven und Ressourcen an Kohle, Öl und Gas noch reichen werden, es geht darum, wie viel davon im Boden bleiben muss. Auf der Klimakonferenz in Paris 2015 wurde erneut das sogenannte Zwei-Grad-Ziel bekräftigt, also die Begrenzung der globalen Erderwärmung von 1850 bis 2100 auf zwei Grad, wenn möglich sogar auf 1,5 Grad. Beide Ziele sind außerordentlich

ambitioniert, ist doch ein Grad von der besagten Spanne schon „verbraucht“. Das Zwei-Grad-Ziel bedeutet umgerechnet, dass weit über 90 Prozent aller fossilen Rohstoffe im Boden verbleiben müssen [1]. Die ambitionierten Ziele haben mittlerweile auch Eingang in den europäischen und den deutschen Gesetzgebungsprozess gefunden.

Im November wurde der sogenannte europäische Grüne Deal vorgelegt, welcher vorsieht, dass Europa zum ersten klimaneutralen Kontinent werden soll [2]. Mit dem im Februar 2020 vorgelegten Europäischen Klimaschutzgesetz schlägt die Kommission Treibhausgasneutralität bis 2050 als rechtsverbindliches Ziel vor [3].

Um dieses Ziel zu verwirklichen, müssen Emissionssenkungen, Investitionen in grüne Technologien und der Schutz der natürlichen Umwelt dafür sorgen, dass in der Gesamtheit der EU-Mitgliedstaaten Netto-Null-Emissionen erzielt werden. Der Rechtsakt soll gewährleisten, dass alle EU-Politikbereiche zu diesem Ziel beitragen und alle Wirtschaftszweige und Gesellschaftsgruppen ihren Teil beisteuern [3].

In Deutschland sind 2016 mit dem Klimaschutzplan 2050 die klimaschutzpolitischen Grundsätze und Ziele der Bundesregierung dargelegt worden, ergänzt durch Eckpunkte für das Klimaschutzprogramm 2030. Im Dezember 2019 ist das Bundes-Klimaschutzgesetz in Kraft getreten [4]. Im Zweck des Gesetzes ist auch das Bekenntnis der Bundesrepublik Deutschland auf dem Klimagipfel der Vereinten Nationen im September 2019 in New York festgehalten, Treibhausgasneutralität bis 2050 als langfristiges Ziel zu verfolgen. Das Klimaschutzgesetz beinhaltet die nationalen Klimaschutzziele und Jahresemissionen, die Klimaschutzplanung, den Expertenrat für Klimafragen sowie die Vorbildfunktion der öffentlichen Hand. Für die Sektoren Energie, Verkehr, Industrie, Gebäude, Landwirtschaft sowie Abfallwirtschaft werden für den Zeitraum bis 2030 zulässige Jahresemissionsmengen festgelegt. Die Mengen nach 2030 werden im Jahr 2025 durch Rechtsverordnung festgelegt. Besonders relevant ist der Steuerungsmechanismus. Das Umweltbundesamt wird jährlich die Emissionsdaten veröffentlichen, der eingesetzte Expertenrat wird diese prüfen und bei einer Überschreitung der Jahresemissionsmengen wird das zuständige Bundesministerium innerhalb von drei Monaten ein Sofortprogramm zur Nachsteuerung vorlegen [4].

Flankiert wird das Bundes-Klimaschutzgesetz durch ein Bündel an Gesetzesvorhaben, welches schon auf den Weg gebracht worden ist, wie Kohleausstiegsgesetz, Strukturstärkungsgesetz Kohleregionen, Gebäudeenergiegesetz, nationalen Emissionshandel für Wärme und Verkehr usw.

Projektübersicht

Energiesystem der Zukunft

Die weltweiten, europäischen und nationalen Rahmenbedingungen für die Energiewirtschaft als auch den Verkehrssektor sehen vor, dass diese Sektoren bis 2050 treibhausgasneutral werden. Diese sogenannte Decarbonisierung ist nachhaltig nur über regenerative Energien möglich. Konkret über regenerativ erzeugten Strom, der entweder unmittelbar genutzt wird oder über die Konversionsrouten Power to Gas oder Power to Liquid in gasförmige Energieträger wie Wasserstoff und Methan, in flüssige Energieträger wie Kerosin oder Schiffsdiesel sowie in die Chemierohstoffe Ethen und Propen umgewandelt wird. Die Begriffe „Decarbonisierung“ und „decarbonisieren“ haben sich etabliert, auch wenn diese chemisch nicht korrekt sind, geht es doch darum, Emissionen aus der Verbrennung fossilen Kohlenstoffs zu vermeiden. Kohlenstoff aus regenerativen Quellen, beispielsweise regeneratives Methan aus Power-to-Gas-Anlagen, kann natürlich klimaneutral genutzt werden.

Das zukünftige Energiesystem basiert auf den Säulen regenerativer Strom und regenerativer Wasserstoff, der letztlich aber in der Regel auch auf regenerativem Strom basiert. Es lässt sich also durchaus von einer Stromgesellschaft sprechen. Abbildung 1 zeigt das Fließbild dazu.

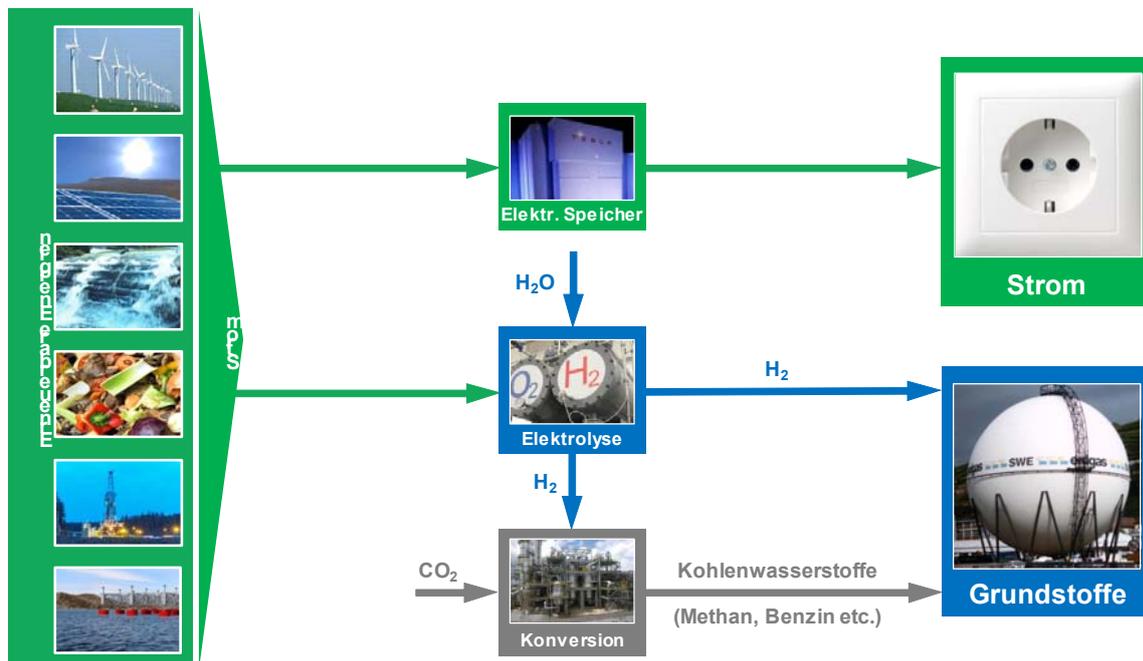


Abb. 1 Strom und Grundstoffe aus regenerativen Energieträgern

Mit Strom und den daraus gewonnenen Grundstoffen lassen sich dann alle Anwendungen in den Sektoren Strom, Wärme, Verkehr und Industrie klimaneutral betreiben, wie aus den Abbildungen 2 und 3 hervorgeht.

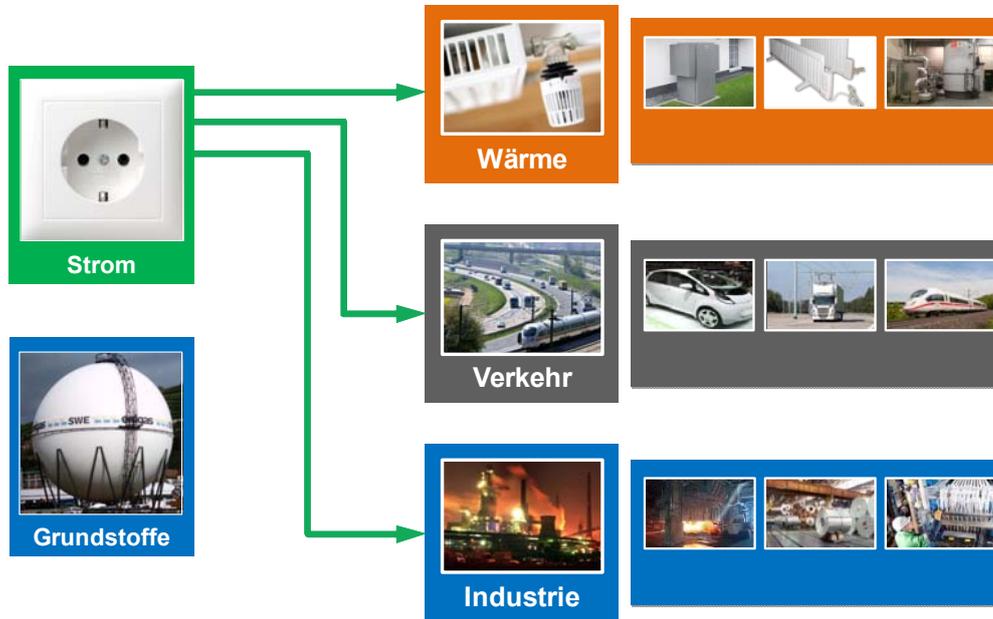


Abb. 2 Anwendungen von regenerativem Strom

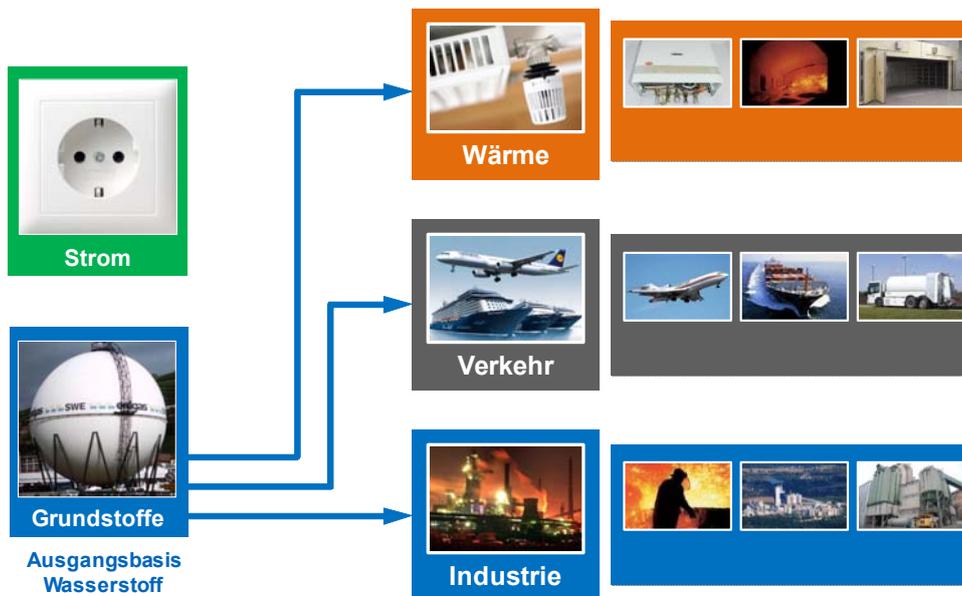


Abb. 3 Anwendungen von regenerativen Grundstoffen

Projektübersicht

Für die unmittelbar strombetriebenen Bereiche gilt die Substitution auf regenerativen Strom ohnehin. In der Wärmeversorgung erfährt die Elektrowärme eine Renaissance, zudem werden Wärmepumpen verstärkt genutzt und Wasser lässt sich mit Elektrodenkesseln erhitzen. Historische Bauten, die kaum gedämmt und verändert werden können, sind dann klassisch mit Gas aus regenerativen Quellen zu beheizen. Ebenso werden Glaswannen elektrisch und mit Gas beheizt. Auch die klassischen Industrieprozesse müssen selbstverständlich klimaneutral betrieben werden. Elektrostahlwerke, Aluminium- und Kupferelektrolysen werden ohnehin elektrisch betrieben, lediglich die Form der Stromerzeugung wechselt. Zement- und Kalkwerke können mit regenerativ erzeugtem Methan betrieben werden. Die Eisenerzreduktion kann mit regenerativ erzeugtem Koks aus Abfallbiomasse oder über Direktreduktion mit regenerativ erzeugtem Wasserstoff erfolgen. Die Decarbonisierung von komplexen industriellen Prozessen ist also prinzipiell möglich, wenngleich die Umsetzung sicher noch mehrere Jahrzehnte dauern wird [1].

Der Klimawandel erfordert auch einen treibhausgasneutralen Verkehrssektor (Personen- und Güterverkehr, straßen- und schienengebundene Fahrzeuge, Schiffe, Flugzeuge). Die alternativen Antriebe der Zukunft, so technologieoffen diese auch sein mögen, werden auf regenerativem Strom und regenerativem Wasserstoff basieren, der wiederum weitgehend auf regenerativem Strom basiert. Der flächendeckende Ausbau der Strom- und Wasserstoffinfrastruktur ist dafür unabdingbar, da beides für alle Sektoren der Energiewende ohnehin erforderlich ist. Die entsprechenden politischen Initiativen wie die nationale Wasserstoffstrategie und etliche Initiativen der Bundesländer sind daher nur zu begrüßen [5]. Die regenerativen Energieträger Wasserstoff und synthetische Kraftstoffe können und werden wohl dennoch im großen Stil im Ausland produziert und dann nach Deutschland importiert. Klimaschutz ist ohnehin nur mit den alternativen Antrieben möglich. Viele Argumente gegen diese Antriebe, seien es Elektro- oder Wasserstoff-Fahrzeuge, wurden bei der Einführung von Benzin- und Dieselfahrzeugen ebenfalls eingeworfen jedoch im Laufe der Jahre überwunden. Die Ladeinfrastruktur wird schon bald dichter sein als es je die Tankstelleninfrastruktur war. Nicht zuletzt werden durch Serienproduktion die Kosten sinken.

Ein Wort noch zur Atomenergie, die grundsätzlich einen Beitrag zur klimaneutralen Stromerzeugung leisten könnte. Selbst die großen deutschen Energiekonzerne wollen jedoch nicht mehr zurück zur Atomkraft. Die deutschen Kernkraftwerksbetreiber haben der Forderung nach einer Laufzeitverlängerung für ihre noch in Betrieb befindlichen AKW eine klare Absage erteilt. Übereinstimmend lehnen die drei Betreiber E.ON, RWE und EnBW den Vorschlag ab,

aus Klimaschutzgründen und wegen des Kohleausstiegs die Laufzeiten über 2022 hinaus zu verlängern [6]. Neu zu errichtende Atomkraftwerke kommen schon gar nicht in Betracht, da sie schlicht die teuerste Form der Stromerzeugung sind.

Nachhaltige Industriegesellschaft

Die derzeitige Industriegesellschaft ist in weiten Teilen der Welt noch immer eine fossile Industriegesellschaft und zwar im doppelten Sinne. Zum einen basiert die Energieversorgung in Deutschland und den meisten Industrieländern noch immer auf fossilen Rohstoffen, zum anderen ist fossil das Sinnbild für Strukturen, die es durch einen gestalteten Strukturwandel zu überwinden gilt (vgl. Abb. 4).



Abb. 4 Strukturwandel zur nachhaltigen Industriegesellschaft

Projektübersicht

Eine Entkopplung von Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum einerseits und dem Verbrauch fossiler und metallischer Rohstoffe, Umweltbelastungen und Klimawandel andererseits ist mehr denn je erforderlich, um die planetaren Grenzen nicht dauerhaft zu überschreiten [7].

Zwei essenzielle Säulen zur Umsetzung dieser Entkopplung sind die Energiewende für die Sektoren Strom, Wärme, Verkehr und Industrie sowie die Rohstoffwende, insbesondere im Bereich der endlichen Metalle. Die Energiewende erfordert sogar zugleich auch die Rohstoffwende. Die neuen Infrastrukturen, also Millionen von Windkraft- und Solaranlagen, Konversion und Speicherung, Netze und Regelungstechnik, haben einen hohen Bedarf an strategischen Rohstoffen, der langfristig nur durch weitgehendes Recycling dieser Ressourcen zu decken ist.

Hohe Recycling- und Substitutionsraten machen das Recycling zwangsläufig noch aufwendiger, womit wiederum noch mehr Energie benötigt wird, was sich in Flächen für Wind- und Solarenergie niederschlägt. Umso mehr darf das als Plädoyer für Energie- und Ressourceneffizienz in allen Bereichen gelten, gerade auch im Verkehrssektor einer globalisierten Produktion und Logistik.

Der Wandel von der fossilen zur nachhaltigen Industriegesellschaft bietet aber auch erhebliche industriepolitische Chancen für unsere exportorientierte Wirtschaft. Denn die Technologien und Infrastrukturen, Dienstleistungen und Lebensstile, die wir hier entwickeln, erproben und nutzen, werden langfristig in aller Welt gebraucht [1].

Literatur

- [1] Faulstich, M.: Wege zu einer nachhaltigen Industriegesellschaft. In: Umwelt-bundesamt, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Hrsg.): Übergang in eine Green Economy: Systemische Hemmnisse und praktische Lösungsansätze. Schriftenreihe Umwelt, Innovation, Beschäftigung 02/2017, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2017, S. 103-114
 - [2] Europäische Kommission: Ein europäischer Grüner Deal. Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Europäischen Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen COM (2019) 640 final, 11.12.2019
 - [3] Europäische Kommission: Vorschlag für eine Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates zur Schaffung des Rahmens für die Verwirklichung der Klimaneutralität und zur Änderung der Verordnung (EU) 2018/1999 (Europäisches Klimagesetz). COM (2020) 80 final, 04.03.2020
 - [4] Bundes-Klimaschutzgesetz: 12. Dezember 2019 (BGBl. I S. 2513)
-

- [5] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Nationale Wasserstoffstrategie. Berlin, Februar 2019
- [6] N. N.: Die Nutzung der Kernenergie hat sich erledigt. Tagesspiegel online, 05.06.2019, Download 08.03.2020
- [7] Sachverständigenrat für Umweltfragen: Verantwortung in einer begrenzten Welt. Umweltgutachten. Erich Schmidt Verlag, Berlin 2012, 649 S.

Die vorherigen Ausführungen entstammen dem Beitrag: Faulstich, M.: Perspektiven für alternative Antriebe in der Kreislaufwirtschaft. In Kasseler Abfallforum. In: K. Wiemer, M. Kern, T. Raussen (Hrsg.): Tagungsband 32. Kasseler Abfall- und Ressourcenforum vom 6. bis 8. Oktober 2020. Verlag Witzenhausen Institut für Abfall, Umwelt und Energie, Witzenhausen, 2020

Laufende Promotionen und Habilitationen

In der Arbeitsgruppe „Nichtelektrische Energiesysteme“ werden derzeit acht externe Doktoranden und Habilitanden in einem Doktorandenkolleg betreut. Viermal im Jahr kommen die Doktoranden und Habilitanden zu zweitägigen Doktorandenseminaren zusammen.

- **Untersuchungen und Modellierung von Abfallverbrennungsanlagen auf Basis von KI (Künstliche Intelligenz) gestützten Algorithmen.**

Doktorand: Taner Akbay

Partner: eew Energy from Waste GmbH, Helmstadt

Gemäß den Klimaschutzplänen des Bundesumweltministeriums zur Decarbonisierung der Sektoren Wärme, Strom und Kraftstoff können Abfallverbrennungsanlagen einen wichtigen Beitrag durch die Herstellung von weitgehend klimaneutraler Elektrizität und Wärme leisten. Trotz moderner Regel-, Automatisierungs- und Messtechnik ist der effiziente und optimale Betrieb einer Abfallverbrennungsanlage unter Einhaltung der Anforderungen wie Verbrennungstemperaturen, Verweilzeiten und Emissionsgrenzwerte gemäß 17. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchV) aufgrund der Inhomogenität der Abfallzusammensetzung immer noch eine verfahrenstechnische Herausforderung. In dieser Forschungsarbeit wird ein KI-Modell einer Abfallverbrennungsanlage auf Basis moderner KI-Algorithmen wie Maschinelles Lernen und Neuronale Netze entwickelt, welches die Prozesse

Projektübersicht

einer Abfallverbrennungsanlage lernt und neue Zusammenhänge zwischen den Zielgrößen Verbrennung, Verschmutzung, Durchsatz, Emissionen und Wirkungsgrad liefert. Anschließend werden die wissenschaftlich validierten Erkenntnisse mit Hilfe eines eigen entwickelten Standardverfahrens in den konventionellen regelungs- und steuerungstechnischen Prozess der Anlage integriert, um eine Vektoroptimierung zu lösen. Das KI-Modell wird mit Hilfe der Programmiersprache Python entwickelt. Durch die Art der Überwachung der Daten kann Maschinelles Lernen in vier große Bereiche eingeteilt werden: Überwachtes Lernen, unüberwachtes Lernen, halbüberwachtes Lernen und Reinforcement Learning. Die oben genannten Lernarten werden im Zusammenhang mit dem Forschungsziel untersucht. Dabei werden die Stärken und Schwächen einzelner Algorithmen nach bestimmten Qualitätskriterien erarbeitet, so dass das validierte KI-Modell eine Kombination aus allen KI-Algorithmen darstellt.

- **Bestimmung von Massenströmen und Schüttdichten in Recyclinganlagen mit Faser-Bragg-Gittern**

Doktorand: Alexander Gönner

Partner: REMONDIS Assets & Services GmbH & Co. KG, Lünen

Um das Ziel einer funktionierenden Kreislaufwirtschaft zu erreichen, müssen derzeitige Recyclingverfahren so optimiert werden, dass weniger Abfälle beseitigt und mehr verwertet werden können. Dazu sind mehr Informationen über das aktuell verarbeitete Material erforderlich. Ein Hauptproblem stellt dabei die Schüttdichte dar, die aufgrund der Unsicherheit der derzeit eingesetzten elektrischen Bandwaagen nur mit unzureichender Genauigkeit auf Förderbändern gemessen werden kann. In seiner Forschung beschäftigt sich der Doktorand daher mit der Entwicklung einer neuartigen optischen Bandwaage, die bessere Eigenschaften und eine höhere Genauigkeit als das elektrische Gegenstück verspricht. Die Idee ist die Verwendung von Glasfasern, in die ein Bragg-Gitter eingeschrieben wurde. Mit Hilfe der Reflexionseigenschaften des Gitters kann die Schüttdichte des Fördergutes präzise und schnell gemessen werden. Vor allem die Unempfindlichkeit gegen elektromagnetische Störungen, schwächere Alterungseffekte und geringere Kosten machen eine optische Bandwaage zu einer attraktiven Alternative zu dem derzeit verwendeten elektrischen Verfahren.

- **Speicherbedarf und Systemkosten in der Stromversorgung für energieautarke Regionen und Quartiere**

Doktorandin: Caroline Möller

Partner: Rainer Lemoine Institut, Berlin; Hochschule Osnabrück

Mit dem Ausbau von Erneuerbaren Energien (EE) auf regionaler Ebene hat sich das Konzept

der Energieregion etabliert. Dabei handelt es sich um Regionen, die einen intensiven Ausbau von EE und eine Unabhängigkeit vom Import fossiler Ressourcen anstreben. In diesem Kontext spielt die autarke Energieversorgung eine zentrale Rolle. Die oft bilanziellen Berechnungen von Autarkie berücksichtigen keinen Ausgleich der fluktuierenden Stromerzeugung durch Speicher und vernachlässigen damit ein wesentliches Merkmal der fluktuierenden EE Windenergie und Photovoltaik, die als das Fundament einer erneuerbaren Energieversorgung gelten. Das Promotionsvorhaben stellt eine Verbindung zwischen rechnerischer und realer Autarkie her und beschäftigt sich am Beispiel der Region Osnabrück-Steinfurt und auf Basis von Energiesystemmodellen mit der Frage, welche realen Autarkiegrade zwangsläufig durch den Ausbau von EE erreicht werden, wie sich höhere reale Autarkiegrade auf Speicherbedarf und Systemkosten auswirken und welche Synergieeffekte sich beim Zusammenschalten von mehreren Regionen ergeben. Besonderer Fokus liegt darauf, diese Fragen auf die Quartiersebene übertragen. Das Thema Autarkie auf regionaler Ebene ist umstritten, gleichzeitig gibt es auf der Quartiersebene als Zusammenschluss von mehreren Haushalten viele Pilotprojekte und Geschäftsmodelle. So werden als Vorteil von Quartieren oft die Synergieeffekte bei Erzeugung und Verbrauch angebracht, die Systemebene ist jedoch eine deutlich kleinere als die der regionalen. Ziel der Promotion ist es, anhand von Modellrechnungen diese beiden Systemebenen aus technisch-ökonomischer Sicht zu analysieren und deren Zusammenhang zu bewerten.

- **Materielle Grenzen der Kreislaufwirtschaft – Status und Perspektiven der Kreislaufwirtschaft unter Charakterisierung, Modellierung und Bewertung des Materialhaushalts mit besonderer Würdigung von Bestandsdynamiken im anthropogenen Lager Deutschlands**

Doktorand: Felix Müller

Partner: Umweltbundesamt

Die Kreislaufwirtschaft wird in politischen Programmen zunehmend als konsistenter Lösungsentwurf einer nachhaltigen, ressourcenschonenden Wirtschaftsweise angesehen. Als zentrales Paradigma der Kreislaufwirtschaft gilt der Erhalt von Wert und Funktion von Gütern, Produkten und Materialien im Wirtschaftsraum. Demzufolge müsste sich ein idealtypisches rohstoffnutzendes System im Steady-State weitgehend aus sich selbst heraus mit Sekundärrohstoffen versorgen und nahezu in Gänze auf Primärrohstoffe verzichten können. Reale Systeme wie Volkswirtschaften zeichnen sich allerdings durch eine komplexe, dynamische Materialverflechtung mit Verlusten und veritablen Rohstoffverbräuchen aus. Das Recycling unterliegt technologischen und wirtschaftlichen Schranken. Darüber hinaus erfahren diese Systeme nicht

Projektübersicht

nur Sättigungseffekte, sondern auch erhebliche Wachstums- und Schrumpfungsdynamiken im anthropogenen Lager. Es herrscht ein großer zeitlicher Versatz zwischen Inverkehrbringen und Entsorgung relevanter Gütergruppen. Wo liegen vor diesem Hintergrund realistische materielle Zielkorridore in einer Kreislaufwirtschaft und wo die Grenzen? Welche Materialien lassen sich überhaupt in Kreisläufen bewirtschaften und mit welchen Indikatoren lässt sich die Entwicklung von Materiallebenszyklen verlässlich beschreiben? In welchem Umfang wird die Versorgung mit Primärrohstoffen erforderlich bleiben? Der Doktorand widmet sich diesen zentralen Fragen und untersucht dabei, welcher Grad der Zirkularität für verschiedene Materialien unter derzeitigen und zukünftig zu erwartenden technischen Rahmenbedingungen möglich sein wird.

- **Entwicklung von Szenarien zur Steigerung der Energieeffizienz in Deutschland bis zum Jahr 2050**

Doktorand: Roger Schmidt

Partner: Universität Kaiserslautern

Um das Erreichen der Ziele der Energiewende 2050 besser abschätzen zu können bzw. um die zukünftige Entwicklung der Energieversorgung besser zu verstehen werden Szenarien erstellt. Bisher wurden hierbei allerdings lediglich zwei bis drei Szenarien gearbeitet, neben einer minimalen Betrachtung erfolgt oftmals eine Maximalbetrachtung. Ausgehend von einem linearen Zusammenhang beider Extremwerte wird dann gelegentlich noch eine Variablenkombination in der Mitte untersucht. Im Rahmen der möglichen wahrscheinlichen Kombinationen könnte es aber nun vorkommen, dass eine, zwei oder gar alle drei untersuchten Szenarien außerhalb dieses Werterahmens der wahrscheinlichsten Kombinationen liegen, die Szenarien sind somit unbrauchbar. Um dieses Problem zu umgehen wäre es sinnvoll, wenn dann für alle Szenarien alle Variablen systematisch durchvariiert würden. Hierbei muss natürlich beachtet werden, dass nicht alle beliebig kombinierbaren Kombinationen als wahrscheinlich eingestuft werden. Im Rahmen dieser Dissertation soll untersucht werden, wie mit einer systematischen Berechnung aller wahrscheinlichen Wertekombinationen die Szenarien zur Steigerung der Energieeffizienz in Deutschland im Bereich privater Haushalte verbessert werden kann.

- **Säkulare Stagnation und ihre ökologischen Folgen**

Doktorand: Manuel Slupina

Partner: Berlin Institut für Bevölkerung und Entwicklung, Berlin; Daimler und Benz Stiftung, Ladenburg

Die zentrale Herausforderung für die früh entwickelten Industriestaaten wird in den nächsten Jahrzehnten sein, ihre Gesellschaften und ihr Wirtschaftssystem auf einen nachhaltigen Pfad

lenken. Die Hoffnung, dass technischer Fortschritt mit effizienteren Herstellungsverfahren zu weniger Umwelteinflüssen führt, hat sich bislang nicht erfüllt – trotz teilweiser Entkopplung von Rohstoffverbrauch und Wirtschaftswachstum. Eine Einheit BIP kann zwar heute mit weniger Umwelt- und Naturverbrauch generiert werden als zu früheren Zeiten, aber das Wirtschaftswachstum der vergangenen Jahre hat absolut betrachtet zur mehr Rohstoffkonsum und Umweltschäden geführt. Doch in den Industrieländern zeichnet sich unabhängig von diesem Trend seit einigen Jahrzehnten eine Wachstumsverlangsamung ab. Einige Länder wie Japan erleben konjunkturbereinigt nahezu ein Nullwachstum. Eine Erklärung für diese Entwicklung liefert die Theorie der säkularen Stagnation. Sie macht strukturelle und unumkehrbare Gründe wie den demografischen Wandel und abnehmende Produktivitätsfortschritte für ein schwindendes Wirtschaftswachstum verantwortlich. Sollte die Theorie der säkularen Stagnation zutreffen, werden immer mehr früh entwickelte Staaten ein rückläufiges oder gar kein wirtschaftliches Wachstum mehr erleben. Somit stellt sich die Frage, ob die Gleichung „mehr Wirtschaftswachstum = mehr Umweltschäden“ auch mit umgekehrten Vorzeichen funktioniert. Hier zeigt sich noch ein erheblicher Forschungsbedarf. Das Promotionsvorhaben „Säkulare Stagnation und ihre ökologischen Folgen“ widmet sich daher den folgenden Fragen: Welche ökologischen Folgen hätte ein dauerhaftes Ende des Wirtschaftswachstums in den früh entwickelten Ländern? Kann eine säkulare Stagnation die Industrieländer ihren Klimazielen näherbringen und wenn ja, wie groß wäre die ökologische Dividende, die sich daraus schöpfen ließe?

- **Chancen und Risiken einer nachhaltigen Einführung von Elektromobilität in der kommunalen Entsorgungswirtschaft**

Doktorand: Michael Steiner

Partner: Stadtreinigung Hamburg

Der Klimawandel und die Verknappung der endlichen Ressource Erdöl sind tragfähige Motive für die notwendigen Veränderungen der kommunalen Entsorgungswirtschaft. Lösungsansätze dafür sind eine Effizienzsteigerung bestehender Technologien sowie die Entwicklung neuer Antriebskonzepte. Gleichzeitig muss das Ziel sein, einen ganzheitlichen Ansatz in der Mobilität zu verfolgen. Die Nutzung regenerativer Energien wird hierbei eine entscheidende Rolle spielen. Im Fokus dieses Praxisprojektes steht der Einsatz von Elektromobilität in der Entsorgungswirtschaft und zwar sowohl hinsichtlich der Fakten als auch der Wahrnehmung. Mit etablierten Herstellern von Arbeitsmaschinen mit ihren aktuell auf dem Markt zur Verfügung stehenden elektrischen Arbeitsmaschinen sollen in einem Langzeitpraxisprojekt auf einer ausgewählten Betriebsstätte in einer Arbeitsgruppe verschiedene Parameter wissenschaftlich

Projektübersicht

untersucht werden. Durch die Kooperationen von Anwender, Hersteller, Versorger und Politik eröffnet sich die Chance, verschiedene Elektrofahrzeuge und Elektroarbeitsmaschinen nachweislich mit Hilfe intelligenter Planungstools von Anfang an nachhaltig, ökologisch und ökonomisch einzusetzen.

- **Langfristige Energieszenarien unter besonderer Berücksichtigung der meteorologischen Randbedingungen**

Habilitand: Alexander Kies

Partner: Frankfurt Institute for Advanced Studies (FIAS), Frankfurt am Main

Der Klimawandel macht die Decarbonisierung der Energiesysteme und damit einhergehend stark ansteigende Anteile von Wind- und Solarenergie unumgänglich. Wind und Solarenergie sind jedoch vom Wetter abhängig und können nicht nach Belieben kontrolliert werden. Mit dem wachsenden Anteil erneuerbarer Energieträger geht daher ein zusätzlicher Wandel von einem nachfragegesteuerten zu einem angebotsgesteuerten Energiesystem einher, das eine größere Flexibilität auf der Nachfrageseite erforderlich macht. Es existieren zahlreiche denkbare Lösungen, um erneuerbare Energien in das Energiesystem zu integrieren: Von preisgesteuertem Nachfragemanagement über Speichertechnologien hin zur Kopplung der verschiedenen Sektoren des Energiesystems, also Elektrizität, Wärme und Verkehr. Die Planung all dieser Lösungen hängen jedoch in hohem Maße von akkuraten meteorologischen Wettereingangsdaten ab. In der Regel werden zur Analyse erneuerbarer Energiesysteme globale oder regionale Reanalysen verwendet. Reanalysen verknüpfen Messungen mit numerischen Modellen, um einem Zustand der Atmosphäre in der Vergangenheit abzubilden. Analysen zeigen jedoch, dass die Unterschiede zwischen den verschiedenen Analysen häufig groß sind und konkrete Auswirkungen auf die Ergebnisse von Simulationen haben. Im Rahmen des Vorhabens sollen Methoden entwickelt werden, um die aus Eingangsdaten resultierenden Unsicherheiten abzuschätzen, zu bewerten und zu verringern. Zum Einsatz sollen hierbei Methoden des Machine Learning kommen. So sollen etwa Generative Adversarial Networks genutzt werden, um Wetterdaten zu erzeugen und auf bestimmte Eigenschaften, z. B. Klimawandelszenarien, hin zu trainieren.

Neue internationale Projekte

Nachfolgend genannte internationale Projekte werden in Bälde beginnen.

- **The Transition to an Energy System Based on Renewable Energies in oil-producing Middle Eastern countries**

Doktorand: Milad Jokari Sheshdeh

- **Comparison of Technology, Legislation and Implementation of „Extended Producer Responsibility” for IT-Equipment**

Senior Advisor: Klaus Hieronymi

Partner: Hewlett Packard Enterprise, Böblingen; Circular Economy Research, Oberursel

- **Upcycling Silica Manganese Slag as Construction Materials for a New Landfill**

Doktorandin: Tang Ling Ying

Partner: Trienekens (Sarawak) Sdn. Bhd., Malaysia; Swinburne University of Technology, Sarawak Campus, Kuching, Malaysia

- **Governing Key Factors for a Novel Two-Stage Anaerobic Co-Digestion of Municipal Food Waste and Sewage Sludge**

Doktorandin: Eileen Hii

Partner: Trienekens (Sarawak) Sdn. Bhd., Malaysia; Swinburne University of Technology, Sarawak Campus, Kuching, Malaysia

Projektübersicht

Projekte im Auftrag des Umweltbundesamtes

- **Ressourceneffizienzsteigerung in der Metallindustrie – Analyse, Bewertung und Verminderung von Downcycling (DownMet)**

Auftraggeber: Umweltbundesamt

Partner: Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie, Universität Augsburg, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie

In den vergangenen 150 Jahren hat der Bedarf an Metallen für Schlüsselsektoren wie die Energie-, Verkehrs-, Produktions- und Kommunikationsbranche stark zugenommen. Neben Massenmetallen wie Eisen, Aluminium und Kupfer werden zunehmend auch Legierungselemente wie Magnesium, Silizium und Mangan unverzichtbar, da sie wichtige Materialfunktionen für spätere Anwendungen erfüllen. Der Trend der Diversifizierung von Legierungen hält an. Technische Innovationen in den Bereichen Mobilität, Energiewandlung und -speicherung sowie bei Baukonstruktionen erfordern immer wieder neue Funktionsmaterialien. Das Thema Recyclingfähigkeit spielt dabei bisher aber kaum eine Rolle. Gleichzeitig wird weniger als die Hälfte des Metallbedarfs in Europa durch eigene Reserven gedeckt. Europa ist somit sehr stark von den weltweit verteilten Vorkommen abhängig. Recycling ist derzeit also die einzige Möglichkeit, sowohl der Abhängigkeit als auch der Knappheit von metallischen Ressourcen entgegenzuwirken. Doch das Recycling von Legierungen stößt an Grenzen, da die Zusätze (beispielsweise Kupfer in Stahl zur Erhöhung der Korrosionsbeständigkeit) und Verunreinigungen meist in so niedriger Konzentration und komplex verteilter Form vorliegen, dass sich eine Abtrennung im metallurgischen Prozess äußerst schwierig gestaltet. Durch die Kreislaufführung kommt es damit sukzessive zu einer unerwünschten Anreicherung in der Schmelze. Diesem ungewollten Qualitätsverlust, dem sogenannten Downcycling, wird aktuell durch die Zugabe von Primärmaterial begegnet. Eine Kreislaufwirtschaft sollte zukünftig ermöglichen, dass der Anteil zugesetzter primärer Rohstoffe deutlich reduziert wird und auch die Legierungselemente durch den Einsatz von metallurgischen Echtzeit-Simulationsplattformen in der intelligenten Sortierung wiederverwendet werden können.

Das durch das Umweltbundesamt geförderte Projekt befasst sich mit der Ressourceneffizienzsteigerung in der Metallindustrie in Hinblick auf die Substitution von Primärrohstoffen durch Verminderung von Downcycling. Dabei liegt der Fokus auf der Untersuchung der Möglichkeiten eines legierungsspezifischen Recyclings von Stahl-, Aluminium-, Kupfer- und Zinkschrotten. Hier soll die Untersuchung verschiedener Schrottfractionen vor bzw. nach innovativen Sortier- und Separier-Prozessen neue Erkenntnisse liefern. Darüber hinaus werden Steuerungsgrößen für Up- und Downcycling sowie Regeln für sortenarmes Design bestimmt.

Auf Grundlage der Analyseergebnisse werden Empfehlungen zur besseren Erschließung bisher nicht genutzter, hochwertiger Metallpotenziale erarbeitet. Zu den Bewertungsmaßstäben gehören die Einsparpotenziale bei Rohstoffen und Treibhausgasemissionen sowie die Kostenstruktur für die Herstellung von Legierungen aus Rezyklaten. Eine erfolgreiche, das heißt mit minimalen Downcycling-Prozessen „belastete“ Bereitstellung von sekundären Rohstoffen erfordert eine umfassende Wissensbasis über bestehende Recyclingstrukturen, technologische Potenziale, metallurgische Prozesssimulationen und Bewertungsansätze, die im Rahmen dieses Projektes entwickelt werden.

- **Nexus Ressourcenschonung und Klimaschutz**

Auftraggeber: Umweltbundesamt

Partner: Folkwang Universität der Künste, Essen; Universität Augsburg

Das komplexe Themenfeld „Ressourcenschonung und Klimaschutz“ gehört zu den wesentlichen Ressortaufgaben des Umweltbundesamtes (UBA). Die Nachwuchsförderung für die Bearbeitung der Ressortaufgaben spielt ins-besondere im Umweltbereich eine wichtige Rolle. Mit dem geförderten Promotionscluster „Nexus Ressourcenschonung und Klimaschutz“ trägt das UBA bei dem Rechnung. 2013 hat das UBA eine Kommission eingerichtet, die das Amt bei der Weiterentwicklung der Ressourcenschonungspolitik unterstützt. Die Ressourcenkommission (KRU) am UBA setzt sich aus Expertinnen und Experten aus Wirtschaft, Wissenschaft und Verwaltung zusammen. Gemeinsam mit den Verantwortlichen des UBA hat die KRU einen hohen Forschungsbedarf zum Thema „Nexus Ressourcenschonung und Klimaschutz“ eruiert. Prof. Faulstich und Frau Prof. Christa Liedtke (Wuppertal Institut und Folkwang Universität) leiten die Ressourcenkommission.

Forschungsarbeiten zu diesem Themenfeld sind insbesondere hinsichtlich der Umsetzung und Weiterentwicklung aktueller politischer Ressortprogramme (z. B. Deutsches Ressourceneffizienzprogramm II, Integriertes Umweltprogramm 2030) und nationaler Strategien (z. B. Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie, Nationales Programm für nachhaltigen Konsum) wichtig. Über-dies können die geplanten Promotionsvorhaben die UBA-Tätigkeiten zum Schwerpunkt „Ressourcenschonung und Klimaschutz“ – hier vor allem das UBA-Projekt „Ressourcenschonendes und Treibhausgasneutrales Deutschland 2050“ (RTD) – unterstützen. Konkreter Forschungsbedarf, der mit drei laufenden Promotionsstellen für jeweils drei Jahre) gedeckt werden soll, besteht hinsichtlich folgender Themen:

- ▶ Design am Nexus Ressourcenschonung und Klimaschutz für Nachhaltigkeit – Lernen aus den Produktentwicklungen und -geschichten der Vergangenheit für die Dienstleistungs-
-

Projektübersicht

geschichten von morgen (Promotionsvorhaben I „Design“, Folkwang Universität der Künste, Essen).

- ▶ Identifizierung und Modellierung kritischer Infrastrukturen für die Transition zu einer ressourcenleichten Gesellschaft am Nexus Ressourcenschonung und Klimaschutz (Promotionsvorhaben II „Kritische Infrastrukturen“, Technische Universität Clausthal).
- ▶ Dissipation von strategischen Funktionsmetallen (Promotionsvorhaben III „Dissipation“, Universität Augsburg).

Die zu veröffentlichen Promotionen werden einen wissenschaftlich fundierten, jeweils eigenständigen Beitrag zum Zusammenwirken von Ressourcenschonung- und Klimaschutzpolitik leisten.

IEE

Projektübersicht

Abteilungsleiter: Dr.-Ing. Ernst-August Wehrmann
 Tel.: +49-5323-72-2299
 E-Mail: wehrmann@iee.tu-clausthal.de

Abteilung Elektrische Energiesysteme

Die Stromerzeugung aus regenerativen Quellen ist in 2019 noch einmal deutlich gegenüber 2018 gestiegen (Bild 1). Sie ist auf den hohen PV-Anteil auf Grund der Wetterbedingungen

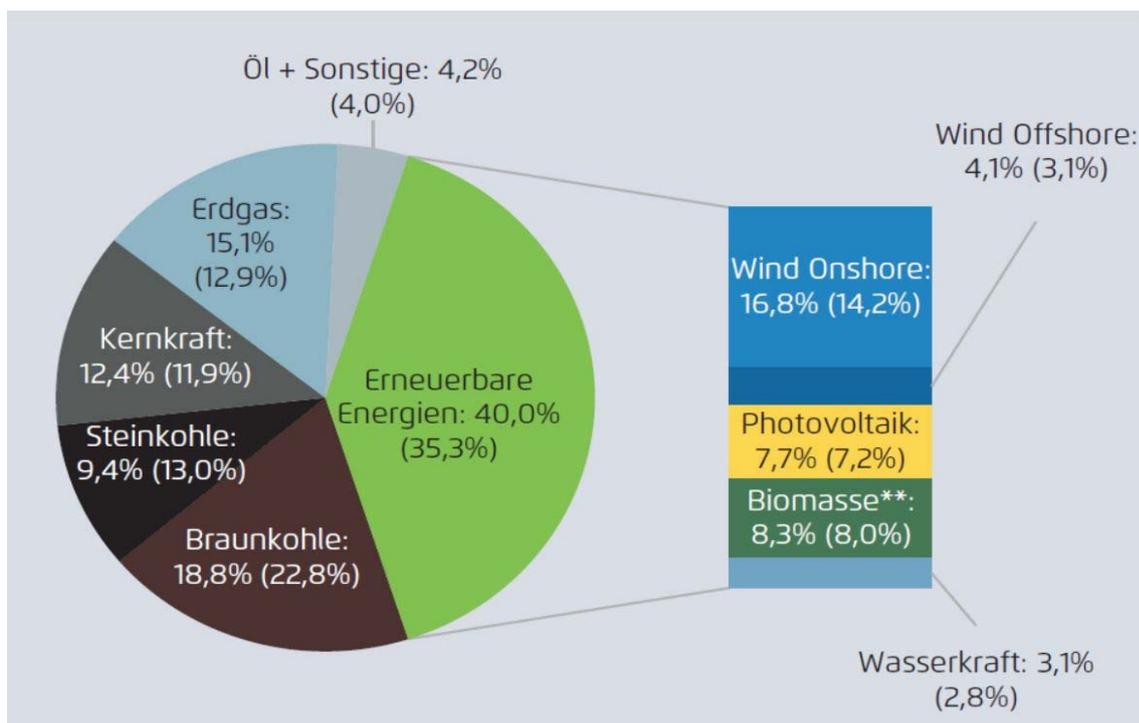


Abbildung 1: Vorläufige Daten zur Bruttostromerzeugung 2019 (Werte für 2018 in Klammern)

Quelle: Agora Energiewende (2020): Die Energiewende im Stromsektor: Stand der Dinge 2019. Rückblick auf die wesentlichen Entwicklungen sowie Ausblick auf 2020

zurückzuführen und hätte noch höher ausfallen können, wenn der Ausbau der Windenergieanlagen nicht gestockt hätte. Der Zubau von Windenergieanlagen betrug 2019 nur 700 MW im

Vergleich zu durchschnittlich 4.200 MW pro Jahr von 2013 bis 2017¹. Der Anteil der Kohleverstromung lag nach einem Rückgang in 2018 wieder ungefähr auf dem Stand von 2017.

Der weiterhin hohe Anteil regenerativ erzeugter fluktuierender elektrischer Energieeinspeisung verlangt nach neuen Konzepten zur sinnvollen Nutzung dieses nicht bedarfsorientierten Energieangebotes. Im Folgenden werden drei sehr unterschiedliche Ansätze vorgestellt. Dabei steht weiterhin die Entlastung bzw. sinnvolle Ausnutzung der elektrischen Netze im Fokus. Dies kann dabei helfen, einen Teil des sehr teuren und langwierigen Netzausbaus zu vermeiden.

Aktuelle Projekte:

- **Huntorf 2020 - Technologieentwicklung und Effizienzgewinn durch Neu-Konzipierung des Gesamtprozesses Druckluftspeicherkraftwerk Huntorf mit regenerativ erzeugtem Wasserstoff**

Das Kraftwerk Huntorf ist ein bestehendes Gasturbinenkraftwerk, bei dem die erforderliche Kompression der Verbrennungsluft, die bei normalen Gasturbinen ca. zwei Drittel der mechanischen Leistung benötigt, unabhängig vom Turbinenbetrieb mit speziellen Verdichtern im Speicherbetrieb erfolgt. Die komprimierte Luft wird unterirdisch in ausgesohlenen Salzstöcken eingelagert. In diesem Projekt wird unter anderem untersucht, bis zu welchem Anteil Erdgas durch (regenerativ erzeugten) Wasserstoff ersetzt werden kann und wie sich das Speicherkraftwerk in Kombination mit einem zukünftigen Elektrolyseur sowie weitere Komponenten zur Effizienzsteigerung unter verschiedenen Betriebsstrategien wirtschaftlich einsetzen lassen.

Bearbeiterin: Ann-Kathrin Fries, M. Sc.

Projektkoordinator: Dr. Wehrmann

Projektleiter: Prof. Beck

¹Agora Energiewende (2020): Die Energiewende im Stromsektor: Stand der Dinge 2019. Rückblick auf die wesentlichen Entwicklungen sowie Ausblick auf 2020

Projektübersicht

- **Windpark20+ - Untersuchung und Evaluierung von Weiterbetriebsoptionen für nicht repowering-fähige Windparks**

Die Elektromobilität spart nur dann CO₂ gegenüber der klassischen Mobilität, wenn sie im Wesentlichen regenerativ erzeugte elektrischer Energie nutzt. Unter dem Gesichtspunkt, dass bereits jetzt und in naher Zukunft eine nennenswerte Zahl von Windkraftanlagen aus der EEG-Förderung fallen, von denen viele an Standorten stehen, die nicht repoweringfähig sind, werden neue Geschäftsmodelle für diese Anlagen gesucht, die einen wirtschaftlichen Weiterbetrieb erlauben. Um das fluktuierende Leistungsangebot an den Bedarf z. B. für Elektroladestationen anzupassen, sind typischerweise Energiespeicher z. B. in Form von Batterien oder Elektrolyseure zur Wasserstoffherzeugung oder beides in Kombination erforderlich. Mit dieser technischen Ausstattung ist neben der bedarfsgerechten Energielieferung auch die Möglichkeit gegeben, Systemdienstleistungen anzubieten.

Unter diesen Randbedingungen soll eine Entscheidungsmatrix für den wirtschaftlichen Weiterbetrieb nicht repoweringfähiger Windparks erarbeitet werden.

Das Projekt befindet sich in der Antragsphase.

Bearbeiter: Nils Kreth, M.Sc.

Projektkoordinator: Dr. Wehrmann

Projektleiter: Prof. Beck

- **Wind-Solar-Wärmepumpen-Quartier - Erneuerbar betriebene Wärmepumpen zur Minimierung des Primärenergiebedarfs (WPuQ) - Teilvorhaben: Elektrische Verteilnetze für Wärmepumpenquartiere**

“Power to Heat” bietet einerseits eine Möglichkeit, die zukünftige Wärmeversorgung zu dekarbonisieren und andererseits mit Hilfe von Managementsystemen auf die fluktuierende regenerative Erzeugung elektrischer Energie flexibel zu reagieren. In diesem seit August 2017 laufenden Projekt liegen inzwischen aus zwei sehr unterschiedliche “Wärmepumpen-Quartieren” umfangreiche, z.T. zeitlich hoch aufgelöste Messdaten zum Wärme- und Stromverbrauch, zur regenerativen Erzeugung und zu den elektrischen Daten des Netzes vor. Daraus werden für verschiedene Betriebsstrategien Kennwerte wie Eigenverbrauchs-

quote, regenerativer Deckungsgrad sowie Auslastung und Spannungslage der Niederspannungsnetze gewonnen. Ein Handlungsleitfaden für die optimale Betriebsstrategie in Abhängigkeit von der Netzstruktur, verfügbaren Wärmequellen, Speichern und regenerativen elektrischen Quellen soll daraus aufgebaut werden.

Bearbeiterin: Dipl.-Ing. Verena Spielmann (bis August 2019)

Ann-Kathrin Fries, M. Sc. (ab August 2019)

Projektkoordinator: Dr. Wehrmann

Projektleiter: Prof. Beck

Projekt: Huntorf 2020

Projekt: Huntorf 2020 - Technologieentwicklung und Effizienzgewinn durch Neu-Konzipierung des Gesamtprozesses Druckluftspeicherkraftwerk Huntorf mit regenerativ erzeugtem Wasserstoff

Ziel: Das Gesamtziel des Vorhabens „Huntorf2020“ ist die Anpassung des Druckluftspeicherkraftwerkes Huntorf an die Herausforderungen der Energiewende. Ein wichtiges Ziel stellt dabei die Reduktion des Treibhausgases CO₂ dar, das zum einen mittels Brennstoffsubstitution von Erdgas durch (regenerativ erzeugten) Wasserstoff und zum anderen durch die Erhöhung der Brennstoffeffizienz erreicht werden soll. Ein weiteres, für die Zukunft wichtiges Ziel ist die Erhöhung der Einsatz-Flexibilität. Die Untersuchungen umfassen hierbei eine sehr detaillierte Simulation der Verbrennungsvorgänge innerhalb der Hochdruckbrennkammern, eine thermodynamische Bilanzierung des gesamten Druckluftspeicherkraftwerkes und eine Betrachtung des Speicherkraftwerkes innerhalb des Energiesystems im lokalen Kontext, wobei vorhandene Energieszenarien und -prognosen Berücksichtigung finden.

Stand der Technik: Das Grundprinzip des Druckluftspeicherkraftwerks Huntorf (englisch: Compressed Air Energy Storage, kurz CAES) ist ein offener Gasturbinenprozess. Dieser ist so modifiziert, dass die von der Gasturbine benötigte Verbrennungsluft über ein mehrstufiges Verdichtersystem während der Speicherphase verdichtet und in unterirdischen, künstlich ausgesohnten Salzkavernen gespeichert wird. Die Synchronmaschine ist im Speicherbetrieb mit dem Kompressor und im Generatorbetrieb mit der Turbine mittels entsprechender Kupplungen verbunden. Das Druckluftspeicherkraftwerk kann nicht als konventionelles Gaskraftwerk betrieben werden, bei dem Verdichter und Turbine gleichzeitig mit der Welle verbunden sind. Die Erzeugung elektrischer Energie (Generatorbetrieb) ist somit zeitunabhängig von der Luftverdichtung (Motorbetrieb). Das Druckluftspeicherkraftwerk Huntorf bei Bremen verfügt eine Nennleistung von 68 MW im Motorbetrieb und 320 MW im Generatorbetrieb. Der Speicher umfasst zwei Salzkavernen, die zusammen ein Speichervolumen von 310.000 m³ mit einem nutzbaren Betriebsdruck zwischen 30 und 70 bar aufweisen.

Der ursprüngliche Zweck des Speicherkraftwerks Huntorf bestand darin, durch die Komprimierung der Verbrennungsluft überschüssige Energie (von konventionellen Kraftwerken generiert) in Schwachlastzeiten zu speichern und in Hochlastzeiten ins Netz zurück zu speisen [1]. Seit der Inbetriebnahme wurde Huntorf jedoch vor allem für die Bereitstellung von Minutenreserve verwendet. In den letzten Jahren konnte die Anlage allerdings damit nur wenig Betriebsstunden pro Jahr aufweisen [2]. Aus diesem Grund werden im Forschungsprojekt

Huntorf 2020 neben einem Konzept zur Dekarbonisierung alternative markt- und netzdienliche Einsatzmodelle entwickelt.

Lösungsweg: In diesem Projekt sollen Wege zur Neu-Konzipierung des Gesamtprozesses Druckluftspeicherkraftwerk Huntorf entwickelt und analysiert werden. Diese haben zum Ziel, einerseits einen effizienteren Betrieb bei Reduzierung der Treibhausgasemissionen im Sinne der Energiewende und andererseits einen wirtschaftlichen Betrieb zur Sicherung des Kraftwerkstandortes zu ermöglichen. Zu diesem Zweck soll ein umfassendes Anlagenmodell erstellt werden, um damit die Eigenschaften verschiedener Betriebsweisen und Konzeptvarianten zu analysieren. Die Modellierung umfasst hierbei drei Betrachtungsebenen verschiedener Tiefe, die jeweils untereinander verknüpft sind.

Das grundlegende CFD-Modell (*Computational Fluid Dynamics*, Betrachtungsebene 1), der besonderen Verbrennungskonditionen in der Hoch- und Niederdruck-Brennerkammer bietet die Möglichkeit, sowohl das Anlagenverhalten bei einer Zumischung von Wasserstoff als auch den Verbrennungsprozess im Teillastbetrieb zu simulieren und detailliert zu untersuchen. Die so ermittelten Betriebsgrenzen und -eigenschaften können in der darüber liegenden Modellebene – dem thermodynamischen Gesamtmodell in Betrachtungsebene 2 – verwendet werden, um den Gesamtprozess einschließlich der Konzeptvarianten darzustellen. Die hierbei ermittelten charakteristischen Eigenschaften zum Betriebsverhalten können dann wiederum in der obersten Betrachtungsebene, dem Energiesystemmodell, verwendet werden.

In der dritten Betrachtungsebene erfolgt die makroskopische Betrachtung des Druckluftspeicherkraftwerks Huntorf und der im Projekt erarbeiteten Konzeptvarianten innerhalb des regionalen Stromnetzes. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Bilanzierungseben Stromnetz, wobei auch Stoffströme und Speicherfüllstände einbezogen werden. Dabei wird das Energiesystem inklusive verschiedener Wasserstoffherzeugungseinheiten unter Berücksichtigung zukünftiger Entwicklungen (Energieszenarien am Standort) hin zu höherem Anteil an Erzeugern erneuerbarer Energie, wie Windkraft und Photovoltaik, berücksichtigt. Besonderes Augenmerk gilt dabei der Entwicklung von netzdienlichen Betriebsstrategien für kombinierte Energieerzeugungs- und -speicheranlagen.

Projektstand: Das Energiesystemmodell wurde als mathematisches Modell zur Gemischt-Ganzzahligen Linearen Einsatzoptimierung (engl. Mixed Integer Linear Programming, MILP) ausgeführt. Dabei wird das Verhalten des Kraftwerks anhand linearer Gleichungen und Unglei-

chungen dargestellt, und die Einsatzoptimierung wird durch eine lineare Zielfunktion beschrieben.

In Abbildung 1 wird beispielhaft das Ergebnis der Einsatzoptimierung des Druckluftspeicherkraftwerks Huntorf am Day-Ahead-Markt anhand der Day-Ahead-Marktpreise für 2018 dargestellt. Die Zielfunktion beschreibt hierbei die Gewinnmaximierung. Dabei sind variable Kosten, wie Brennstoffkosten, Energiekosten inkl. Steuern und Abgaben sowie Kosten pro Start berücksichtigt. Wartungskosten und Personalkosten sind nicht berücksichtigt.

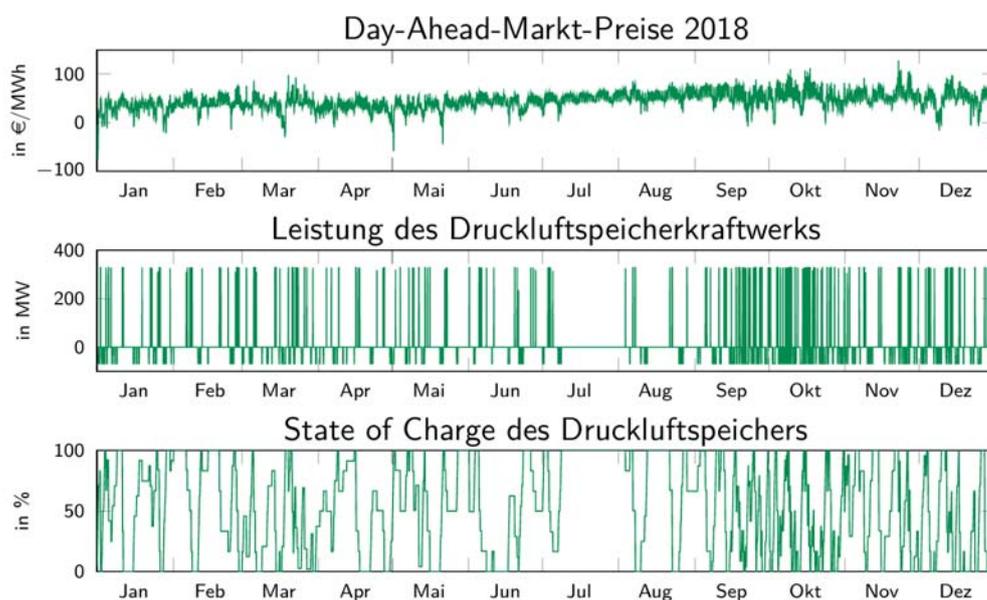


Abbildung 1: Einsatzoptimierung des Druckluftspeicherkraftwerks Huntorf basierend

In Abbildung 2 sind der Gewinn und die Betriebsstunden des Kraftwerks im Rahmen der Einsatzoptimierung am Day-Ahead-Markt für die Jahre 2015 bis 2018 dargestellt. Der Gewinn und damit auch der Ausnutzungsgrad des Kraftwerks sind stark abhängig von der Fluktuation des Day-Ahead-Marktpreise.

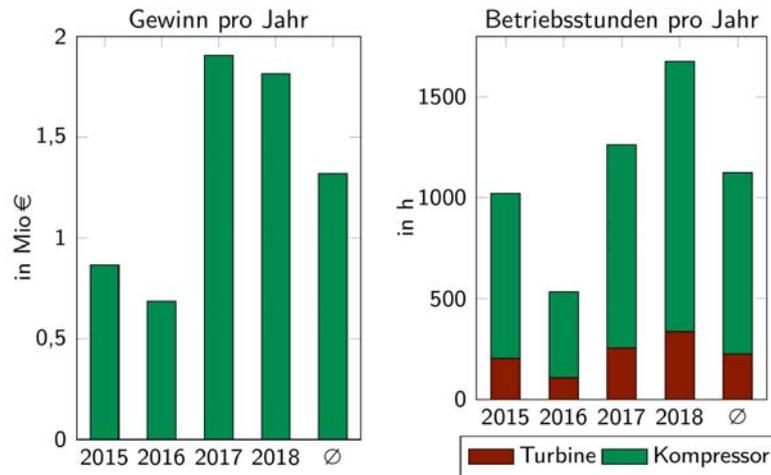


Abbildung 2: Gewinn pro Jahr (links) und Betriebsstunden pro Jahr (rechts) mit Einsatzoptimierung

Referenzen :

- [1] Crotogino, F.: Einsatz von Druckluftspeicher-Gasturbinen-Kraftwerken beim Ausgleich fluktuierender Windenergie-Produktion mit aktuellem Strombedarf. Stuttgart, 2003.
- [2] Crotogino, F.; Mohmeyer, K.-U.; Scharf, R.: Huntorf CAES: More than 20 Years of Successful Operation. Orlando (USA), 2001.

Projektpartner: Am Verbundprojekt sind folgende Institute und Unternehmen beteiligt:

- Uniper Kraftwerke GmbH
- Forschungszentrum Energiespeichertechnologien der TU Clausthal, vertreten durch:
 - Institut für Energieverfahrenstechnik und Brennstofftechnik
 - Institut für elektrische Energietechnik und Energiesysteme

Projektlaufzeit: 01.01.2018 - 31.12.2019 (verlängert bis 31.12.2020)

Gefördert durch: Das Projekt wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert.

Projekt: Huntorf 2020

Bearbeiter: Ann-Kathrin Fries, M. Sc. (Tel.: 72-2593)
ann-kathrin.fries@tu-clausthal.de

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. Roman Weber
info@ievb.tu-clausthal.de

Vertretung durch:
Prof. Dr.-Ing. H.-P. Beck (Tel.: 72-2570)
sekretariat@iee.tu-clausthal.de

IEE

Projekt: Windpark 20+ - Untersuchung und Evaluierung von Weiterbetriebs-
optionen für nicht repowering-fähige Windparks

Problem: Das Klimaziel der Bundesregierung ist eine CO₂-neutrale Energieproduktion bis zum Jahre 2050, wobei die zukünftige Versorgung mit erneuerbaren Energien maßgeblich auf Windenergie und Photovoltaik basiert. Das Erneuerbare-Energien-Gesetz garantiert eine Förderung über einen Zeitraum von 20 Jahren, danach speisen die Anlagen den produzierten Strom zu aktuellen Marktpreisen ein. Nach Auffassung der *Fachagentur Windenergie an Land* (FA Wind) FAWind18\11031[1] liegt der zukünftige Erlös unter 2,25 ct/kWh; dem gegenüber stehen die durchschnittlichen Betriebskosten von etwa 3,6 ct/kWh bei Anlagen größer 2 MW. Ein wirtschaftlicher Weiterbetrieb ist daher nicht immer möglich.

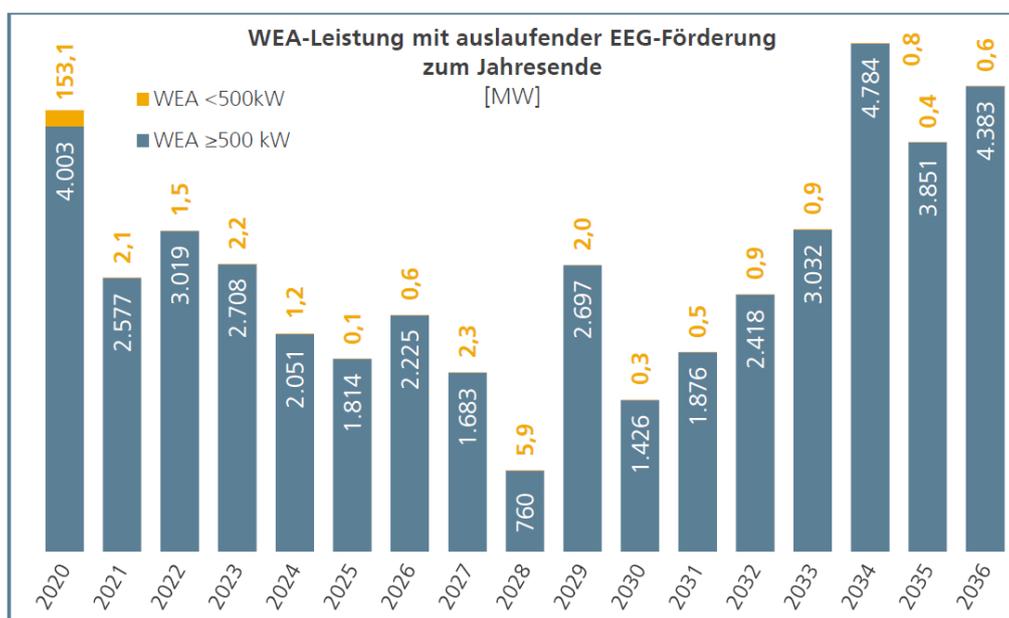


Abbildung 1: Windenergieleistung mit auslaufender EEG Förderung zwischen Ende 2020 und 2036 [1]

Neben dem derzeitigen Einbruch des Zubaus von Windenergieanlagen läuft zwischen 2020 und 2025 die EEG-Förderung für ca. 16.000 MW der installierten Windenergie in Deutschland aus. Erhebungen der *FA Wind* ergaben, dass nur knapp ein Drittel dieser Anlagen repoweringfähig sind, also durch neue leistungsstärkere Anlagen am gleichen Standort ersetzt werden können. Für ein weiteres Drittel sind keine eindeutigen Aussagen möglich. Das letzte Drittel hingegen bietet keine Option auf Repowering, für einen Weiterbetrieb müssen folglich alternative Vermarktungsoptionen gefunden werden, um einen ersatzlosen Rückbau der Anlage und somit eine Reduzierung der Einspeisung aus Erneuerbaren Energien zu verhindern.

FAWind18\11031[1]

Ziel: Ziel des Projekts ist die Entwicklung einer Entscheidungsmatrix, anhand derer abhängig vom Windpark und den Randbedingungen die geeignetste Weiterbetriebsoption ausgewählt werden kann. Desweiteren sollen Modelle entwickelt werden, mit denen zum einen verschiedene Windparks und zum anderen die verschiedenen Technologieoptionen modelliert werden können. Anhand dieser sollen während des Projekts die Weiterbetriebsoption standortspezifisch auf ihre Kombinationsfähigkeit geprüft und die jeweiligen Anforderungen im Gesamtsystem optimiert werden. Dies erlaubt eine Gegenüberstellung sowie ein Ranking der potentiell infrage kommenden Optionen in Abhängigkeit der Windenergieanlagenstandorte. Die Modelle sollen im Anschluss an das Projekt in die Planungs- und Projektierungsprozesse bei der Auswahl und Auslegung der Weiterbetriebsoptionen eingebunden werden.

Stand der Technik: Insbesondere vor dem Hintergrund der nun über Ausschreibungen festgelegten EEG-Förderquoten werden derzeit einzelne Möglichkeiten, Zusatzeinnahmen zu generieren, untersucht. So ist in Kombination mit einem Batteriespeicher als Pufferung zur dargebotsabhängigen Produktion die Teilnahme am Regelleistungsmarkt möglich und könnte zukünftig außerdem die Option der Teilnahme am Blindleistungsmarkt bieten. Eine weitere Alternative ist die direkte Anbindung der Erzeugungsanlage an einen Verbraucher, z.B. über ein Power Purchase Agreement, Blockchain oder via Direktliefervertrag. Ann17\11031[2]

Neben diesen eher marktorientierten Einsatzmöglichkeiten stehen weitere innovative Technologiekonzepte. Für die direkte Stromnutzung können Ladesäulen für Elektrofahrzeuge integriert werden. Nil17\11031[3] Über einen Elektrolyseur (ggf. ebenfalls mit einem Batterie-Spitzenpuffer) kann Wasserstoff erzeugt werden, welcher eine CO₂-freie Mobilität ermöglicht, als regenerativer Brennstoff anteilig ins Erdgas-Netz eingespeist oder zur Dekarbonisierung der Industrie genutzt werden kann. Ste09\11031[4] Außerdem kann bei ausreichend großen Abnehmern in der Nähe Wärme beispielsweise durch eine Wärmepumpe oder als Abwärme der Elektrolyse in einem regionalen Fernwärmenetz bereitgestellt werden. Somit ist direkt am Windpark die Sektorenkopplung mit allen Sektoren (Mobilität, Wärme und Industrie) möglich, sodass die CO₂-freie Energie direkt und effizient genutzt wird.

Lösungsweg: Das Projekt gliedert sich in fünf Arbeitsschritte: Zuerst soll ein skalierbares Windparkmodell erstellt werden, das typische Windparks in unterschiedlichen Leistungsklassen und an verschiedenen Standorten abbildet. Parallel wird ein Katalog an Weiterbetriebsoptionen zur Stilllegung nicht repoweringfähiger Windparks zusammengestellt und anhand einer zu entwickelnden Bewertungsmatrix gewichtet. Ein Rechtsgutachten soll die rechtlichen Rahmenbedingungen ausgewählter Optionen klären.

Projekt: Windpark 20+ - Untersuchung und Evaluierung von Weiterbetriebsoptionen für nicht repowering-fähige Windparks

Die Weiterbetriebsoptionen werden anschließend einzeln und unabhängig vom Windpark technisch und wirtschaftlich modelliert. Diese Modelle werden dann an das Windparkmodell angeschlossen und für verschiedene Windparks ausgelegt und untersucht. Außerdem werden unter Einbindung der Ergebnisse des Rechtsgutachtens geeignete Geschäftsmodelle entwickelt und das Gesamtsystem jeweils technisch und wirtschaftlich optimiert. Abschließend wird eine Entscheidungsmatrix entwickelt, anhand derer für einen gegebenen Windpark abhängig von den Rahmenbedingungen die optimale Weiterbetriebsoption ausgewählt werden kann. Diese soll abschließend anhand eines realen Beispiels validiert werden.

Projektstand: Das Projekt befindet sich in der Antragsphase.

- Referenzen** :
- [1] J. Quentin, D. Sudhaus und M. Endell, “Was tun nach 20 Jahren? Repowering, Weiterbetrieb oder Stilllegung von Windenergieanlagen nach Förderende”, Fachagentur Windenergie an Land, Berlin, 2018
 - [2] A.-K. Wallasch, S. Lüers, K. Rehfeldt und K. Vogelsang, “Perspektiven für den Weiterbetrieb von Windenergieanlagen nach 2020”, Deutsche Windguard im Auftrag den Bundesverband Wind-Energie e. V., Berlin, 2017
 - [3] N. Kreth, “Netzanbindung von Schnellladestationen an Autobahnen”, Institut für elektrische Energietechnik und Energiesysteme, TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld
 - [4] S. Völler, “Optimierte Betriebsführung von Windenergieanlagen durch Energiespeicher”, Dissertation, Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal, 2009

vorgesehene Projektpartner: Landwind Projekt GmbH

Projektlaufzeit: 2 Jahre

Gefördert durch: Deutsche Bundesstiftung Umwelt

Bearbeiter:	Nils Kreth, M. Sc. nild.kreth@tu-clausthal.de	(Tel.: 72-3597)
Projektleiter:	Prof. Dr.-Ing. H.-P. Beck sekretariat@iee.tu-clausthal.de	(Tel.: 72-2570)

Projekt: Wind-Solar-Wärmepumpen-Quartier

Projekt: Wind-Solar-Wärmepumpen-Quartier - Erneuerbar betriebene Wärmepumpen zur Minimierung des Primärenergiebedarfs (WPuQ)

Teilvorhaben: Elektrische Verteilnetze für Wärmepumpenquartiere

Ziel: Das übergeordnete Ziel des Verbundprojekts ist die Analyse der Primärenergieeinsparungen in Quartieren bei einem koordinierten Betrieb von Wärmepumpen und Speichern im Hinblick auf Wind- und Solarenergieerzeugung.

Ziel des Teilvorhabens "Elektrische Verteilnetze für Wärmepumpenquartiere" ist zum einen die Ermittlung zeitlich hochaufgelöster elektrischer Lastprofile von Wohngebäuden mit Wärmepumpen. Diese fließen im nächsten Schritt in die Ermittlung der Belastung des elektrischen Verteilnetzes in durch Wärmepumpen und EE-Anlagen geprägte Quartiere ein. Unter Einbeziehung verschiedener Wärmepumpenregelstrategien, innovativer Netzbetriebsmittel (z.B. rONT) und Speichern sollen Auslegungsregeln für elektrische Verteilnetze abgeleitet werden.

Stand der Technik: Der immer weiter voranschreitende Ausbau von Photovoltaik- und Windkraftanlagen stellt neue Anforderungen an die Stromnetze. Aus diesem Grund, aber auch um den Einsatz fossiler Brennstoffe für Heizzwecke zu reduzieren, ist ein koordinierter Betrieb von Wärmepumpen und elektrischen bzw. thermischen Speichern mit Berücksichtigung der aktuellen Einspeisung aus lokalen erneuerbaren Energien anzustreben. Die Auswirkungen des Einsatzes von Wärmepumpen auf das elektrische Verteilnetz wurden bereits in verschiedenen Arbeiten untersucht (vgl. u. a. [1], [2], [3]). Mit Ausnahme von [2] werden aus den erhaltenen Ergebnisse jedoch keine allgemeinen Aussagen bezüglich der Belastung des elektrischen Verteilnetzes durch den (koordinierten) Betrieb von Wärmepumpen abgeleitet. Ein Vergleich mit anderen Optionen zur Steigerung des Vorortverbrauchs der lokal bereitgestellten PV-Energie (z.B. durch PV-Hausspeichersysteme) bzw. zur lokalen Spannungshaltung (z.B. durch den Einsatz von regelbaren Ortsnetztransformatoren) bleibt in den genannten Arbeiten unberücksichtigt.

Lösungsweg: Auf Basis von im Projekt erhobenen Messdaten aus zwei ausgewählten Quartieren werden Modelle für den elektrischen und thermischen Bedarf in durch EE-Anlagen und Wärmepumpen geprägten Quartieren erstellt. Diese fließen in das Gesamtmodell ein, das die Gleichzeitigkeit des Bedarfs der Gebäude untereinander und mit der regenerativen Energieerzeugung berücksichtigt und zusätzlich die Leistungsflüsse und somit die Spannungen im

Verteilnetz bestimmt.

Im Gesamtmodell werden einerseits die veränderten Anforderungen an elektrische Verteilnetze mit hohem Anteil an Wärmepumpen und EE-Anlagen bestimmt. Andererseits werden die Auswirkungen von Regelungsstrategien der Wärmepumpen auch unter Einbeziehung von thermischen und elektrischen Speichern auf den Deckungsanteil durch erneuerbare Energien und die damit verbundenen Investitionskosten evaluiert.

Die erhaltenen Ergebnisse sollen in einem Planungsleitfaden und vereinfachten Berechnungsmodellen zusammengefasst und Kommunen, Planern und Netzbetreibern zur Verfügung gestellt werden. Sie sollen als Hilfestellung dienen, um dezentrale regenerative Wärmeversorgung in Neubau- und Bestandsquartieren umzusetzen.

Projektstand: Im Rahmen des Projekts wurde das Gesamtmodell erstellt, das die Strom- und Wärmebedarfe im Quartier gebäudescharf abbildet und die Leistungsflüsse im elektrischen Verteilnetz dynamisch im zeitlichen Verlauf bestimmt. Das Modell ermöglicht so die Bewertung von Betriebsstrategien für WP hinsichtlich der Entlastung elektrischer Verteilnetze und Reduktion des Primärenergiebedarfs. Auf Basis von Messdaten eines realen Quartiers werden die Ergebnisse des Modells validiert.

Die Datengrundlage bilden Messungen, die im Quartier im Zeitraum von Juni 2018 bis Juni 2019 aufgenommen wurden. In 37 Gebäuden werden die elektrischen Leistungen von WP- und Haushaltslasten mit einer zeitlichen Auflösung von 10 Sekunden erfasst (vgl. Abbildung 1). Gleichzeitig wird die regional erzeugte erneuerbare Energie (Wind- und Sonnenstrom) anhand von Messungen an Referenzanlagen ermittelt und Messungen am Ortsnetztransformator sowie am Nahwärmenetz durchgeführt. Die getrennte Messung von Haushalts- und Wärmepumpenstrom ermöglicht die exakte Bewertung des Einflusses der Wärmepumpen auf den Quartierslastgang sowie deren Gleichzeitigkeitsfaktoren. [4]

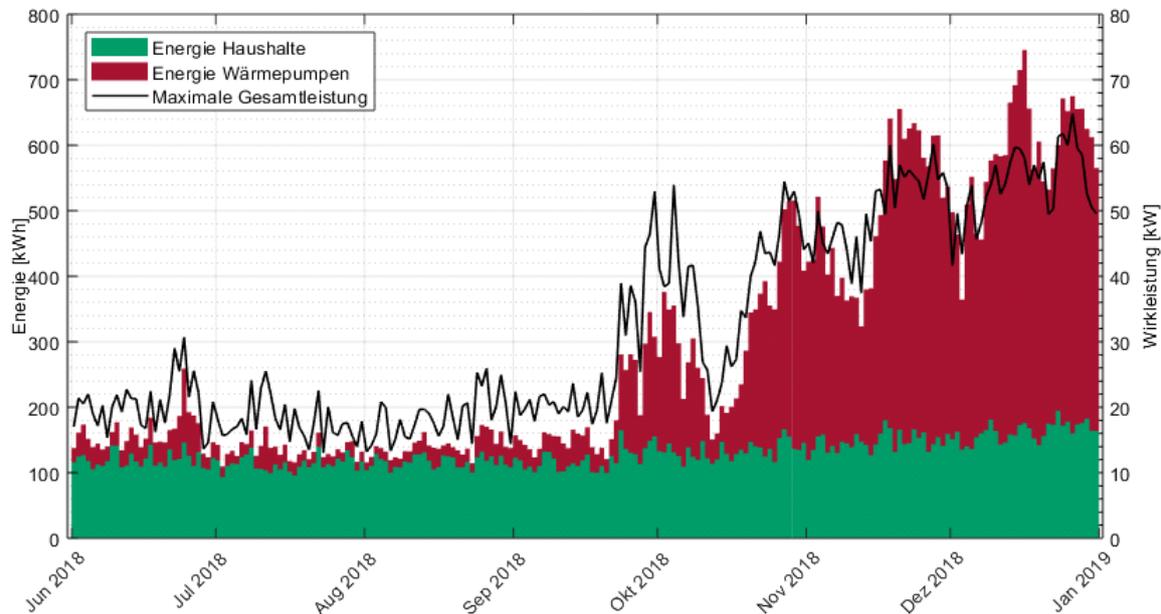


Abbildung 1: Gemessene elektrische Energie der Wärmepumpen und Haushalte pro Tag und Tagesmaximum der Wirkleistung für 22 Gebäude [4]

Die gemessenen Lastprofile werden verwendet, um synthetische Lastprofile für die restlichen Gebäude im Quartier mithilfe eines Clusterverfahrens zu generieren. Das Verfahren teilt die vorhandenen Lastprofile in Tageslastprofile auf und erkennt mithilfe der Clusteranalyse ähnliche Tagesverläufe. Diese werden gemittelt und im nächsten Schritt dynamisiert, sodass individuelle synthetische Lastprofile entstehen. Hierzu sind am IEE zwei Abschlussarbeiten (Steven Reineke, Masterarbeit und Hendrik Rohde, Bachelorarbeit) geschrieben worden.

Das Quartiersmodell bildet alle Gebäude mit ihren Komponenten zur Gebäudeenergieversorgung wie Wärmepumpen, Heizsystemen, Photovoltaik- und Solarthermieanlagen ab (vgl. Abbildung 2). Die Gebäude werden auf Basis weniger Kennwerte parametrisiert, die ihr thermisches Verhalten charakterisieren. Basierend auf meteorologischen Daten wird der Strom- und Wärmelastgang des Quartiers im Jahresverlauf simuliert und mit gemessenen Daten des Referenzjahres verglichen.

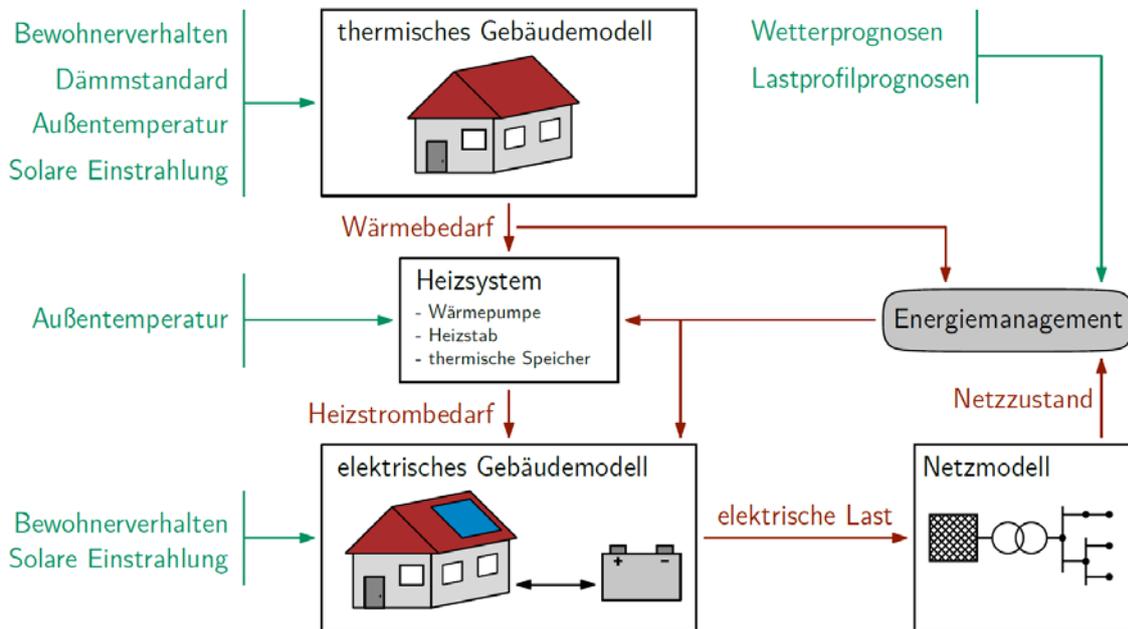


Abbildung 2: Schema des Gesamtmodells

- Referenzen** :
- [1] M. Brunner, "Auswirkungen von Power-to-Heat in elektrischen Verteilnetzen", Dissertation, Universität Stuttgart, 2017
 - [2] C. Protopapadaki and D. Saelens, "Heat pump and PV impact on residential low-voltage distribution grids as a function of building and district properties", Applied Energy, vol. 192, pp. 268-281, 2017
 - [3] S. Tenbohlen, M. Brunner, M. Schmidt and T. Henzler, "Be- und Entlastung elektrischer Verteilnetze durch Wärmepumpen bei der Wärmeerzeugung", Universität Stuttgart, Sep. 2015, [Online]Available: http://www.zfes.uni-stuttgart.de/deutsch/downloads/Endbericht_Netzbelastung_W%C3%A4rmepumpen.pdf, Accessed on: Mar. 08.2016
 - [4] T. Ohrdes, M. Knoop, E. Schneider, V. Spielmann, O. Bast, L. Franzen, J. Behnisch, „Wind-Solar-Wärmepumpen-Quartier – Dynamische Modellierung und messtechnische Evaluation der Strom- und Wärmeversorgung im Quartier“, 5. Power-to-Heat Dialogplattform, Berlin, Sep. 2019

Projekt: Wind-Solar-Wärmepumpen-Quartier

- [5] B. Oswald: Berechnung von Drehstromnetzen: Berechnung stationärer und nicht-stationärer Vorgänge mit Symmetrischen Komponenten und Raumzeigern. 2., korrig. Und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013 (SpringerLink: Bücher). ISBN: 978-3-8348-2620-6

Projektpartner: Am Verbundprojekt sind folgende Institute und Unternehmen beteiligt:

- ▶ Institut für Solarenergieforschung GmbH (Verbundkoordinator)
- ▶ Stiebel Eltron GmbH & CO. KG
- ▶ Energieservice Westfalen Weser GmbH
- ▶ Institut für elektrische Energietechnik und Energiesysteme, TU Clausthal

Projektlaufzeit: 15.08.2017 - 14.08.2020

Gefördert durch: Das Projekt wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert.

Bearbeiter: Ann-Kathrin Fries, M. Sc. (Tel.: 72-2593)
ann-kathrin.fries@tu-clausthal.de

Dipl.-Ing. Verena Spielmann
(bis August 2019)

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. H.-P. Beck (Tel.: 72-2570)
sekretariat@iee.tu-clausthal.de

IEE

Projektübersicht

Abteilungsleiter: Dr.-Ing. Dirk Turschner
Tel.: +49-5323-72-2592
E-Mail: dirk.turschner@tu-clausthal.de

Abteilung Leistungselektronik/Antriebe

Forschungsschwerpunkte und Projekte

Mechatronik beinhaltet das Zusammenwirken der klassischen Ingenieurwissenschaften Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnik. Entsprechend vielfältig sind die Forschungsschwerpunkte innerhalb der Arbeitsgruppe. Sie reichen von der klassischen elektrischen Antriebstechnik über Leistungselektronik bis zur Energiekonditionierung in elektrischen Netzen und die Beobachtung unbekannter Zustandsgrößen. Neben den genannten Aspekten ist das Zusammenspiel zwischen elektrotechnischen und mechanischen Komponenten von zentraler Bedeutung.

Es ergeben sich hieraus für die Arbeitsgruppe verschiedene Forschungsschwerpunkte:

- Bereitstellung verschiedener Systemdienstleistungen für die Stabilisierung elektrischer Netze mit Hilfe moderner leistungselektronischer Komponenten (Prinzip Virtuelle Synchronmaschine - VISMA)
- Simulation und Erprobung konventioneller und neuer Umrichterregelungen im Verbundbetrieb
- Monitoring von Netzzuständen (Inselnetz- und Netzparallelbetrieb) und Netzzustandsgrößen
- Erweiterung der VISMA-Funktionalität zur Nutzung als unterbrechungsfreie Stromversorgung.

- **Entwicklung eines innovativen Umrichtersystems mit Speicher zur Eigenbedarfsoptimierung und Netzstabilisierung**
 - Erprobung einer neuen Umrichtertopologie zur unsymmetrischen Einspeisung
 - Erprobung des Gerätes im Insel- und Netzbetrieb

- Entwicklung einer speziellen Raumzeigermodulation und Vergleich mit bisher verwendeten Steuerverfahren
- Verwendung der neuartigen Silizium-Carbid-Technologie für hohe Schaltfrequenzen
- Implementierung der Regelalgorithmen auf einem Mikrocontroller
- Kombination einer dreidimensionalen Raumzeigermodulation mit dem VISMA-Modell
- Erprobung des Umrichters im Versuchsnetz
- Bearbeiter: Christoph Klaas, M. Sc.

Projektkoordinator: Dr. Turschner

Projektleiter: Prof. Beck

- **Zustandsschätzer für Lastflüsse in Niederspannungsnetzen**

- Entwicklung eines Verfahrens zur Schätzung von nicht gemessenen Zustandsgrößen eines elektrischen Netzes zur Einsparung von Netzinfrastruktur
- Untersuchung des an der TU Clausthal entwickelten *Knotenlastbeobachters* auf Eignung zur Rekonstruktion fehlender Netzdaten im Niederspannungsnetz
- Erprobung des Verfahrens mit Hilfe verschiedener Testdatensätze von elektrischen Netzen mit unsymmetrischen Verbrauchern unterschiedlicher Struktur und unter Zuhilfenahme verschiedener Standardlastprofile
- Bearbeiter: Guosong Lin, M. Sc.

Projektkoordinator: Dr. Turschner

Projektleiter: Prof. Beck

- **USV-VISMA**

- Erkennen von Netzfehlern und sichere Trennung vom fehlerhaften Netz
 - Sicheres Umschalten der VISMA vom Netzparallel- in den Inselbetrieb
 - Sichere Versorgung einer Last im Inselbetrieb, ähnlich einer rotierenden unterbrechungsfreien Stromversorgung
 - Nachbildung der verschiedenen Szenarien in der Simulation und Validierung am Prüfstand
-

Projektübersicht

- Bearbeiter: Dipl.-Ing. Anja Ufkes
Projektkoordinator: Dr. Turschner
Projektleiter: Prof. Beck

 - **Verbundprojekt CoNDyNet II - Kollektive Nichtlineare Dynamik Komplexer Stromnetze**
 - Entwicklung unterschiedlicher Wechselrichtermodelle
 - Stabilitätsuntersuchungen im Versuchsnetz bei Parallelbetrieb unterschiedlicher Umrichterkonzepte
 - Optimierung der Regelkonzepte
 - Nachbildung verschiedenen Szenarien in der Simulation und Validierung am Prüfstand
Vereinfachung der Modelle zur Simulation im großen Verbund
 - Bearbeiter: Steven Reineke, M. Sc.
Projektkoordinator: Dr. Turschner
Projektleiter: Prof. Beck

 - **Entwicklung eines magnetisch leitfähigen Elastomers**
 - Überprüfen verschiedener Materialien hinsichtlich ihrer magnetischen Eigenschaften
 - Aufbau eines geeigneten Messplatzes
 - Bau einer Versuchsanordnung zur Energieübertragung mit dem neuartigen Material
 - Bearbeiter: Dr. Turschner
Projektkoordinator: Dr. Turschner
Projektleiter: Prof. Beck
-

IEE

Projekt: Entwicklung eines innovativen Umrichtersystems mit Speicher zur Eigenbedarfsoptimierung und Netzstabilisierung (Solar-VISMA)

Problem: Die zuverlässige Funktion von elektrischen Netzen erfordert nicht nur die Einspeisung ausreichender Energiemengen, sondern auch die Erbringung einer Reihe von Systemdienstleistungen. Zu den Systemdienstleistungen gehören u.a. die Aufgaben wie Spannungshaltung, Frequenzhaltung, Vorhaltung von Blindleistung, Bereitstellung von Momentanreserve und die Möglichkeit, nach einem Stromausfall den Versorgungswiederaufbau zu gewährleisten. Einige dieser Aufgaben liegen im Verantwortungsbereich des Netzbetreibers, andere erfordern einen umfangreichen Datenaustausch zwischen den unterschiedlichen Netzbetreibern, den Kraftwerksbetreibern und zukünftig verstärkt mit den Verbrauchern. Für die Bereitstellung von Momentanreserve sind derzeit ausschließlich die zentralen Großkraftwerke verantwortlich. Sie liefern damit einen wesentlichen Beitrag zur Stabilisierung des elektrischen Netzes. Durch den zunehmenden Ausbau der erneuerbaren Energien muss diese Aufgabe zukünftig über die Definition entsprechender Anschlussregeln und/oder durch Vergütung der erbrachten Systemdienstleistungen durch den dezentralen Einspeiser erbracht werden. Alle netzstabilisierenden Eigenschaften können von der Virtuellen Synchronmaschine (VISMA) in Kombination mit einem regenerativen Erzeuger, z. B. einer PV-Anlage und/oder einem geeigneten Speichersystem, bereitgestellt werden (TU Clausthal-Patent-Nr. EP2070174 B1; USA: US 2010/0256970 A1; Japan: P2010541516A).

Ziel: Die Firma Power Innovation Stromversorgungstechnik GmbH wird im Rahmen des Projektes zusammen mit dem Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme der TU Clausthal einen Umrichter mit VISMA-Eigenschaften entwickeln, um dem Markt ein diesbezügliches Produkt zur Verfügung zu stellen.

Lösungsweg: Ein gravierender Nachteil marktüblicher Umrichter und des erprobten VISMA-Umrichtersystems ist der fehlende Neutralleiter. Sie bilden nur Dreileiternetze und nicht Vierleiternetze nach. Im Übrigen verursacht der im VISMA-Umrichter verwendete Phasenstromregler durch die hohe Schaltfrequenz der Leistungshalbleiter erhöhte Verluste und ein breites Oberschwingungsspektrum im Netz.

Mit Hilfe der neuen Umrichtertopologie für ein Vierleiternetz (L1, L2, L3, N) mit vier Brücken-zweigen werden diese Nachteile zukünftig umgangen. Abbildung 2 zeigt den Aufbau dieser neuen Topologie. Herkömmliche Umrichter verfügen über drei Brücken-zweige (Abbildung 1). Bei dem neuen Konzept wird über eine Raumzeigermodulation die verlustbehaftete Hysterese-regelung vermieden. Durch das Hinzufügen einer weiteren Dimension wird aus dem zweidimensionalen Raumzeiger ein Hyperzeiger, der im dreidimensionalen Raum rotiert. Unsymmetrien können damit zukünftig bei konstanter Schaltfrequenz wirksam kompensiert werden, die darüber

hinaus zur Verlustreduzierung im angeschlossenen Netz führen und somit die Effizienz der Energieverteilung steigern. In der technischen Ausführung des Umrichters soll ein Leistungsteil mit neuartiger Silizium-Carbid-Technologie (SiC) zum Einsatz kommen. Während auf Silizium (Si) basierende Halbleiterelektronik ein oberes Temperaturlimit von 150°C besitzt, arbeiten SiC-Halbleiter im Bereich von 200 bis 300°C stabil. Da sich die Verlustleistung durch den Einsatz von SiC-Bauteilen deutlich verringert, lässt sich die Schaltfrequenz gegenüber konventionellen Si-Bauelementen nennenswert erhöhen. Durch die höhere Schaltfrequenz können die passiven Ausgangsfilter zur Glättung der Ausgangsspannung deutlich kleiner ausgeführt werden, wodurch sich der Aufwand für Kühlung und Filterung signifikant reduziert. Dies ermöglicht einen kompakteren Aufbau des Umrichtersystems.

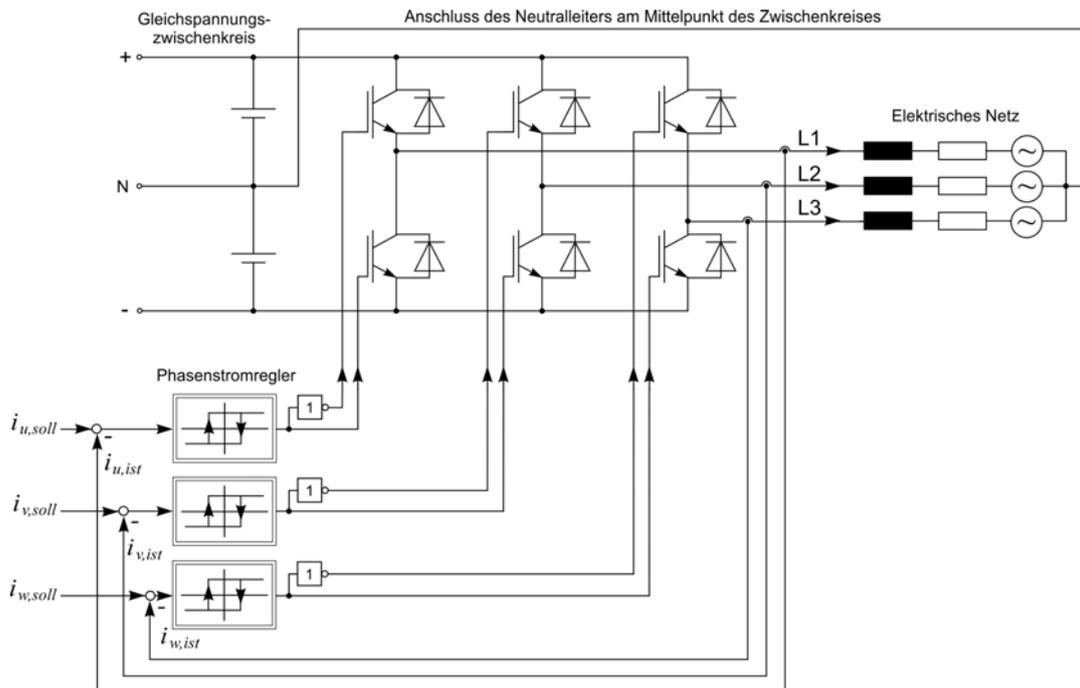


Abbildung 1: Bisher verwendete VISMA-Umrichtertopologie mit Phasenstromreglern und einer Mittelanzapfung im Gleichspannungszwischenkreis

Projekt: Entwicklung eines innovativen Umrichtersystems mit Speicher zur Eigenbedarfsoptimierung und Netzstabilisierung (Solar-VISMA)

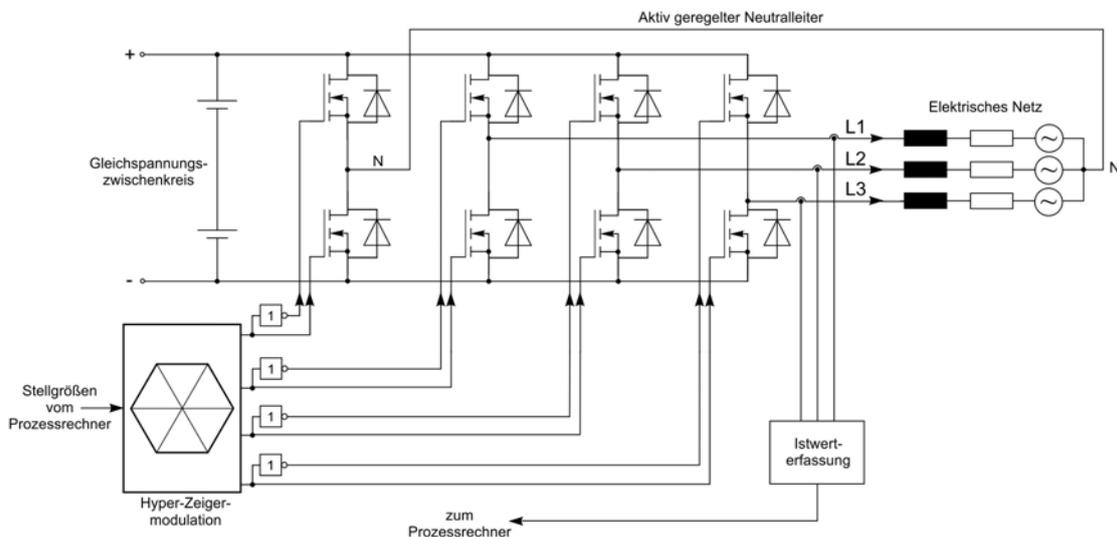


Abbildung 2: Die neue VISMA-Umrichtertopologie verzichtet auf eine Mittelanzapfung im Zwischenkreis und ersetzt dies durch einen vierten aktiv geschalteten Brückenweig für den Neutralleiter, um zukünftig die VISMA-Funktion bei konstanter Schaltfrequenz anzubieten und zusätzlich Unsymmetrie im Niederspannungsnetz kompensieren zu können.

Projektstand: Die in der Planungs- und Konzeptphase erarbeiteten Lösungsansätze wurden in der Entwurfsphase weiterentwickelt und befinden sich nun in der Ausarbeitung. Für die Implementierung des neuen Steuerverfahrens für den 4-Leiter Umrichter sowie für die Realisierung der VISMA-Funktionen ist ein geeigneter Controller ausgewählt worden. Power Innovation erarbeitete ein Konzept für die leistungselektronische Endstufe des Umrichters. Als Ausgangsbasis dienten die vom Unternehmen entwickelten mehrphasigen DC/DC-Wandler mit der verwendeten Silizium-Carbid Technologie. Auf dieser Grundlage stehen nun Prototypen sowohl in dreiphasiger als auch vierphasiger (L1, L2, L3, N) Ausführung zur Verfügung, die in der parallel zur Umrichterentwicklung in der Experimentalhalle des Instituts aufgebauten Testumgebung geprüft und weiterentwickelt werden. Nachfolgend wird auf dem Weg zu einer möglichen Markteinführung des fertigen Produktes durch den Industriepartner mit der Vorbereitung einer Nullserie begonnen.

Projektlaufzeit: 01.01.2017 - 31.12.2019

Gefördert durch: Nbank - Mittel des Landes Niedersachsen

Bearbeiter: Dr.-Ing. Benjamin Schwake
(Power Innovation Stromversorgungstechnik GmbH)

Christoph Klaas, M. Sc. (Tel.: 72-3736)
christoph.klaas@tu-clausthal.de

Projektkoordinator: Dr. Turschner (Tel.: 72-2592)
turschner@iee.tu-clausthal.de

Projektleiter: Bernhard Böden
(Power Innovation Stromversorgungstechnik GmbH)

Prof. Dr.-Ing. H.-P. Beck (Tel.: 72-2570)
sekretariat@iee.tu-clausthal.de

Projekt: A new approach to the analysis of network observability in medium and low voltage electrical grids

Problem: Medium and low voltage electrical power grids are typically sparsely instrumented, and thus, such systems are usually not observable in a systems' theory sense [1-2]. That is, the complete network state cannot be inferred from the available and measured network parameters. The installation of additional measuring equipment is rather costly, which is why optimal strategies for their placement are of great interest. When additional instrumentation of the network is not feasible, typically pseudo-measurements are used for state estimation instead. Owing to their poor accuracy, it is also important to find the useful placements for such pseudo-measurements in order to achieve good overall estimation quality.

Objective: A new approach is proposed here which is based on analyzing the characteristic observable and unobservable nodes by using singular value decomposition (SVD) and the breadth-first search method. The aim of the method is to identify all possibilities for the placement of measuring equipment to achieve observability. The proposed method does render the network observable with a minimal number of sensors.

Approach: The reason for a network being unobservable is that at some nodes the voltage cannot be computed using the forward and backward sweep in the power flow calculation. These nodes are here defined as breakpoints.

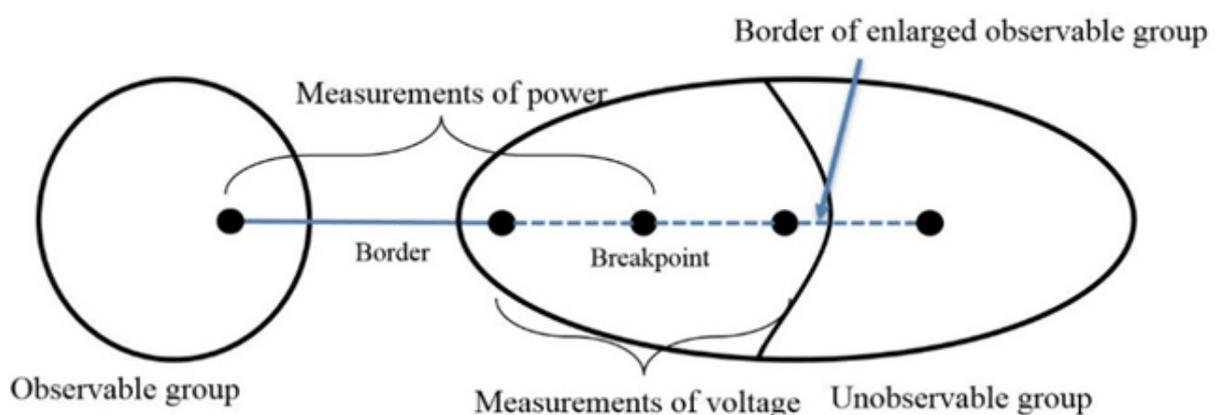


Fig 1: Possible placements of network based on the proposed observability and voltage flow analysis

The main idea of the method proposed here is that adding power measurements at the nodes between the border of the observable and the unobservable groups and the breakpoint, which is found by SVD, the bread-first search method and virtual measurements, adding voltage measurements at the nodes between the border of observable and unobservable groups and border of enlarged observable group or aggregation the nodes on the sides of border will then convert the unobservable group to an observable one. Thus, these nodes are considered as potential points for the placement of extra measuring equipment, pseudo-measurements or aggregation of nodes. In particular for large networks, this pre-determination of appropriate placement positions reduces the dimensionality for conventional optimal sensor placement algorithms substantially.

Example: For illustrating the application of the proposed method, a 16 buses 15 branches network model is employed. The network is shown in the figure below, where positions of power measurements are marked with blue arrows.

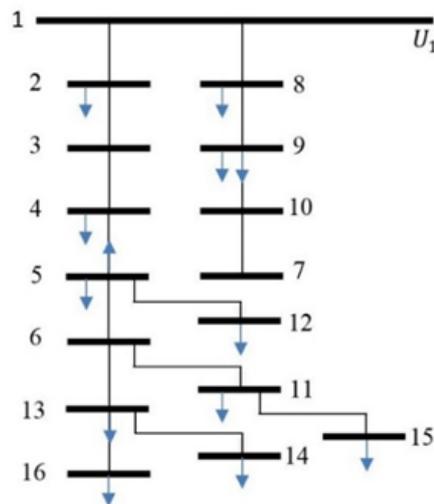


Fig. 2: Topology and measurements of the example network

In this example three additional measurements are required in order to achieve observability. The algorithm deduced that power measuring equipment can be installed respectively between bus 1 and 3 for first group, between bus 6 and 13 for the second group and between bus 10 and 7 for the third group. Or measuring equipment of power can be installed in any bus of the three enlarged groups in Fig. 3

Projekt: A new approach to the analysis of network observability in medium and low voltage electrical grids

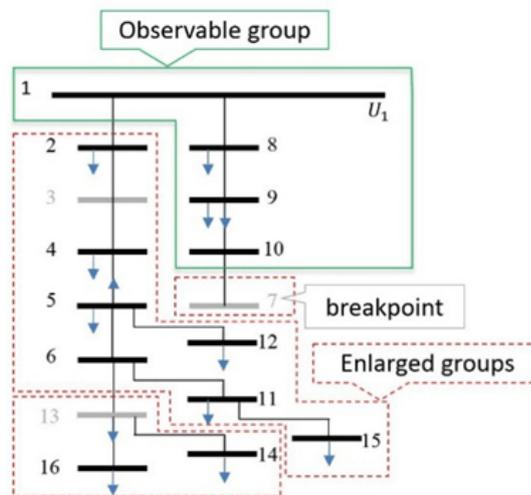


Fig. 3: The Result of algorithm

Project status: The Project was finished and the results were published in the following PhD-Thesis: Zustandsschätzung von Mittelspannungsnetzen mit unvollständiger Messinfrastruktur

Hauptberichterstatter: Prof. Beck

Mitberichterstatter: Prof. Timme (TU Dresden)

- Project partners:**
- Physikalisch technische Bundesanstalt (PTB), Berlin
 - National Physical Laboratory (NPL), United Kindom
 - Fundación para el Fomento de la Innovación Industrial (FFII), Spain
 - Slovenský Metrologický Ústav (SMU), Slovakia
 - Dutch Metrology Institute (VSL), Netherlands
 - Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos (CIRCE), Spain
 - Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Arastirma Kurumu (TUBITAK), Turkey
 - Universität Strathclyde, United Kindom
 - Technische Univeriteit Eindhoven(TU-E), Netherlands
 - Technische Univeriteit Delft (TU Delft), Netherlands

Editor:	Guosong Lin, M. Sc. guosong.lin@tu-clausthal.de	(Tel.: 72-3720)
Projektcoordinator:	Dr.-Ing. Dirk Turschner turschner@iee.tu-clausthal.de	(Tel.: 72-2592)
Projektmanager:	Prof. Dr.-Ing. H.-P. Beck sekretariat@iee.tu-clausthal.de	(Tel.: 72-2570)

Projekt: Unterbrechungsfreie Stromversorgung mit virtueller Synchronmaschine (USV-VISMA)

Problem: Der Wandel des Energieversorgungssystems bringt vielerlei Veränderungen mit sich. Beispielhaft seien dezentrale Erzeuger, Lastumkehr, vermehrt Umrichtersysteme statt realer Maschinen und stärkere Schwankungen in Erzeugung sowie Verbrauch genannt. Dies beeinflusst zunehmend die Qualität der Spannung sowie die Versorgungssicherheit. Besonders Spannungseinbrüche und Versorgungsunterbrechungen sind für kritische Verbraucher ein Problem. Um Verbraucher zu schützen, werden Anlagen zur unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV) installiert. Heute üblich sind Doppelwandler-USV-Anlagen, die die Anpassung vieler Parameter, insbesondere Spannung und Frequenz, im zu schützenden Netz ermöglichen, jedoch durch Eigenverluste hohe Kosten im Betrieb verursachen. Ein höherer Wirkungsgrad kann mit dynamischen USV-Anlagen mit netzinteraktivem Aufbau erreicht werden, jedoch zu Lasten von Flexibilität im zu versorgenden Netz. Eine Doppelwicklungsmaschine fungiert gleichzeitig als Motor und Generator und verbindet den Energiespeicher mit der Koppeldrossel, also der induktiven Verbindung zum Anschluss des USV-Netzes. Die genannten Nachteile der heutigen USV-Anlagen zeigen die Notwendigkeit von Weiterentwicklungen sowie neuen Konzepten.

Ziel: Das Ziel ist es, mit Hilfe der VISMA ein USV-Systemkonzept zu entwickeln. Neben den Aufgaben einer konventionellen USV soll die USV-VISMA möglichst auch die bekannten Fähigkeiten wie Systemdienstleistungserbringung einer VISMA haben.

Lösungsweg: Die VISMA ist so konzipiert, dass ihr Einsatz auf zwei Bereiche abzielt: als Einspeisewechselrichter und netzstützendes Element. In ihrer erstgenannten Anwendung ermöglicht sie die Einspeisung von erneuerbaren Energien in das Netz mit der Besonderheit Wirk- und Blindleistung getrennt zu regeln. Diese Eigenschaft in Kombination mit der Fähigkeit Spannungs- und Frequenzschwankungen entgegenzuwirken, begründen den zweiten Einsatzbereich der VISMA. Es sollen in erster Linie Systemdienstleistungen erbracht werden um das Netz zu stabilisieren. Das Hauptaugenmerk liegt auf der Momentanreserve.

Die Grundidee der USV-VISMA besteht darin, den rotierenden Teil einer dynamischen USV in der o. g. Konfiguration durch eine virtuelle Synchronmaschine zu ersetzen um so die Vorteile beider Systeme zu kombinieren. Ein Modell in Matlab/Simulink stellt den ganzen Aufbau nach, vom dreiphasigen Versorgungsnetz über einen Kurzschließer, Strombegrenzungsdrosseln, den VISMA-Wechselrichter, variable Lasten bis zum eigentlichen VISMA-Modell. Damit können unterschiedliche Szenarien nachgestellt werden. Im Netzparallelbetrieb wird die Last als kritischer Verbraucher direkt aus dem Netz versorgt, die VISMA ist im Bereitschaftsmodus. Denkbar wäre eine Erweiterung in Hinsicht auf Nutzung der VISMA als Einspeisewechsel-

richter für einen Erzeuger. Dies stellt einen deutlich größeren Umfang dar, als die Fähigkeiten konventioneller USV-Anlagen. Ist das Netz abgetrennt, versorgt die VISMA den Verbraucher im Inselnetz- bzw. USV-Betrieb.

Als USV soll die VISMA besonders Unterbrechungen der Versorgungsspannung überbrücken, ohne dass die Last beeinträchtigt wird. Je nach Dauer unterscheidet man in Kurzunterbrechungen und Netzausfall, was auch die Entscheidung nach der Öffnung des Netztrenners zur Folge hat. Bei kurzen Störungen bleibt die Anlage am Versorgungsnetz um schnell wieder die Versorgung aus dem Netz herstellen zu können. Nach einiger Zeit wird jedoch der Netztrenner geöffnet um die Betriebsart vom Netzparallel- in den Inselnetz- bzw. USV-Betrieb zu wechseln. Dies bringt Änderungen in der Regelstruktur mit sich, da die Netzfrequenz nicht mehr als Vorgabe dienen kann. Um die Netze wieder zu koppeln, müssen bei der Resynchronisation gleiche Frequenz- und Spannungsverhältnisse auf beiden Seiten hergestellt werden.

Neben Netzausfällen können auch Fehler im Netz auftreten, beispielsweise Kurzschlüsse. Um eine sichere Auslösung von Schutzeinrichtungen zu gewährleisten, dürfen sich Erzeuger nicht sofort vom Netz trennen. Stattdessen müssen sie einen Beitrag zur Kurzschlussleistung liefern, das bedeutet einen großen Strom ins Netz einspeisen. Für die VISMA stellt dies eine besondere Herausforderung dar, da Umrichter generell kaum einen größeren Kurzschlussstrom als ihren Nennstrom bereitstellen können. Eine Überdimensionierung des Umrichters würde dieses Problem lösen, jedoch erhebliche Kosten verursachen. Der Strom der USV-VISMA muss folglich begrenzt werden, um eine Schädigung zu verhindern. Die USV-VISMA sollte möglichst schnell vom Netz getrennt werden und in den USV-Betrieb übergehen.

Der Kern der Fragestellung betrifft somit das Verhalten der VISMA beim Wechsel der Betriebsarten.

Abbildung 1 stellt den grundsätzlichen Aufbau der USV-VISMA dar. Nicht gezeigt ist die Einrichtung Netzfehler zu produzieren, die neben dieser Anordnung in der Simulation berücksichtigt ist.

Projekt: Unterbrechungsfreie Stromversorgung mit virtueller Synchronmaschine (USV-VISMA)

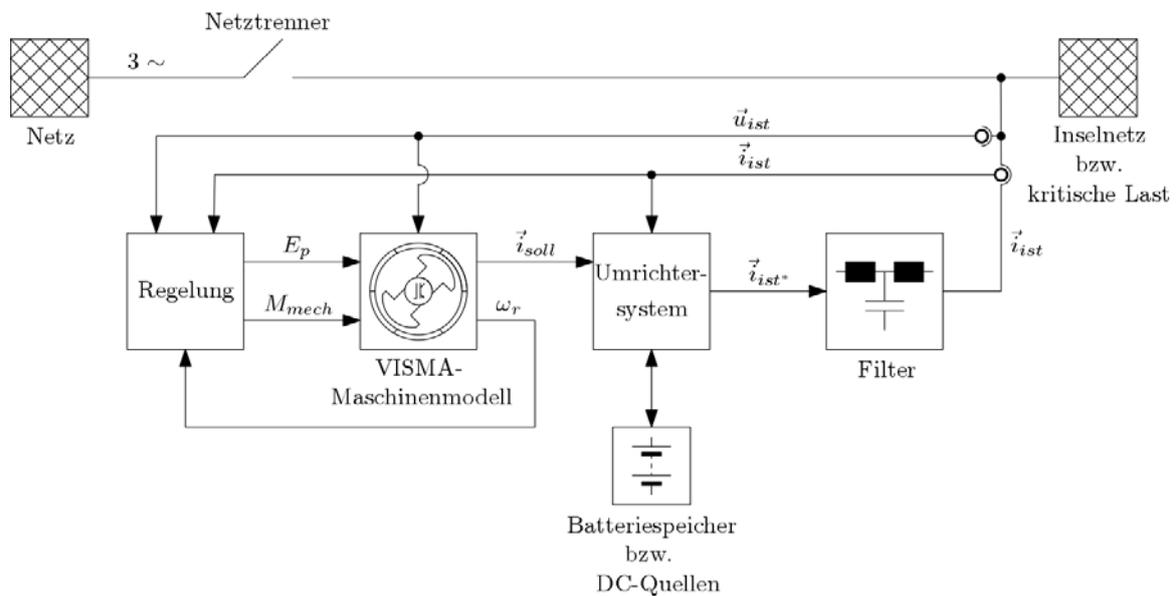


Abbildung 1: Systemkonzept der USV-VISMA

Projektstand: Das Projekt ist in Bearbeitung

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Anja Ufkes (Tel.: 72-2594)
 anja.ufkes@tu-clausthal.de

Projektkoordinator: Dr.-Ing. Dirk Turschner (Tel.: 72-2592)
 turschner@iee.tu-clausthal.de

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. H.-P. Beck (Tel.: 72-2570)
 sekretariat@iee.tu-clausthal.de

IEE

Projekt: Verbundprojekt CoNDyNet II - Kollektive Nichtlineare Dynamik
Komplexer Stromnetze

Projekt: Verbundprojekt CoNDyNet II - Kollektive Nichtlineare Dynamik Komplexer Stromnetze

Schwerpunkte: Modellierung von geregelten netzeinspeisenden Umrichtersystemen und deren Validierung am Prüfstand sowie der Überprüfung ihres dynamischen Verhaltens im Einzel- und Verbundbetrieb.

Ziel: Verschiedenste Studien kommen zu den Ergebnissen, dass zum Gelingen der Energiewende neue Flexibilitätsoptionen geschaffen werden müssen und dass diese zu einem bedeutenden Teil in den Verteilnetzen entstehen werden. Daraus ergeben sich zum einen ein enormer Ausbaubedarf auf der Verteilnetzebene, zum anderen völlig neue Herausforderungen für die Betriebsführung. War es in der Vergangenheit noch möglich, Stabilitätsprodukte ortsunabhängig zu denken, so zeigt sich schon heute, dass diese Strategie nicht mehr praktikabel ist. Mit der steigenden Zahl an dynamischen Akteuren in den Netzen ist es nicht mehr möglich, diese isoliert zu analysieren, so dass ihre kollektive Dynamik in den Vordergrund rückt.

Die kollektive Dynamik von wechselrichterdominierten Stromnetzen stellt damit eines der zentralen ungelösten Forschungsproblemen der Energiewende dar. Aber auch die Frage, wie sich nichtlineare Störungen sowie stochastische Fluktuationen und Ausfalls-Kaskaden in zukünftigen Netzen ausbreiten werden, und wie sich eine Anfälligkeit für solche Störungen vorhersagen und verringern lässt.

Das Verbundvorhaben CoNDyNet setzt sich mit dieser Fragestellung aus mathematischer Sicht auseinander und bringt dabei das Methodenspektrum aus der theoretischen Physik, Mathematik und Elektrotechnik zum Tragen.

Stand der Technik: Die zuverlässige Funktion von elektrischen Netzen erfordert nicht nur die Einspeisung ausreichender Energiemengen, sondern auch die Erbringung einer Reihe von Systemdienstleistungen. Zu diesen gehören u.a. Aufgaben wie Spannungshaltung, Frequenzhaltung, Vorhaltung von Blindleistung, Bereitstellung von Momentanreserve und die Möglichkeit, nach einem Stromausfall den Versorgungswiederaufbau zu gewährleisten. Diese Leistungen werden bisher noch überwiegend durch konventionelle Kraftwerke erbracht, die deshalb immer mit einer Mindestkapazität am Netz betrieben werden müssen. Einige dieser Aufgaben liegen im Verantwortungsbereich des Netzbetreibers, andere erfordern einen umfangreichen Datenaustausch zwischen den unterschiedlichen Netzbetreibern, den Kraftwerksbetreibern und zukünftig den Verbrauchern. Für die Bereitstellung von Momentanreserve sind derzeit ausschließlich die zentralen Großkraftwerke verantwortlich. Einen wesentlichen Beitrag zur Stabilisierung des Netzes haben die diese Kraftwerkseinheiten, die vorwiegend aus Synchron-

maschinen bestehen. Durch den zunehmenden Anteil an erneuerbaren Energien, nimmt die Energie, die über leistungselektronische Wechselrichter ins Netz eingespeist wird, stetig zu. Bei steigendem Anteil erneuerbarer Energieversorgung entstehen dadurch große Herausforderungen für die Kontrolle und Steuerung der Netzdynamik. Ein wesentliches Problem ist, dass durch den sinkenden Anteil konventioneller Generatoren die Momentanreserve im Netz verringert wird, was einen negativen Einfluss auf die Frequenzstabilität hat. Studien zeigen, dass es bei bestimmten Anteilen von wechselrichterbasierten Quellen im Netz Kippunkte gibt, an denen das gesamte System instabil wird. Die Ursache hierfür ist, dass die heute verwendeten Wechselrichter eine „netzfolgende“ Dynamik haben, d.h. einer vorgegebenen Netzfrequenz folgen. Um den Anteil erneuerbarer Energiequellen im Netz langfristig steigern zu können, werden daher „netzbildende“ Wechselrichter benötigt.

Lösungsweg: Es werden Wechselrichtermodelle entwickelt, die eine Untersuchung von Spannungs- und Frequenzdynamiken erlauben sowie eine Untersuchung des Ober-, Grund- und Unterschwingungsverhalten zulassen. Mithilfe solcher Modelle sollen Netzwerkmotive identifiziert werden, die destabilisierend wirken können. Neben der theoretischen Betrachtung erlaubt das Verteilnetzlabor der TU Clausthal eine experimentelle Verifizierung der entwickelten Theorien.

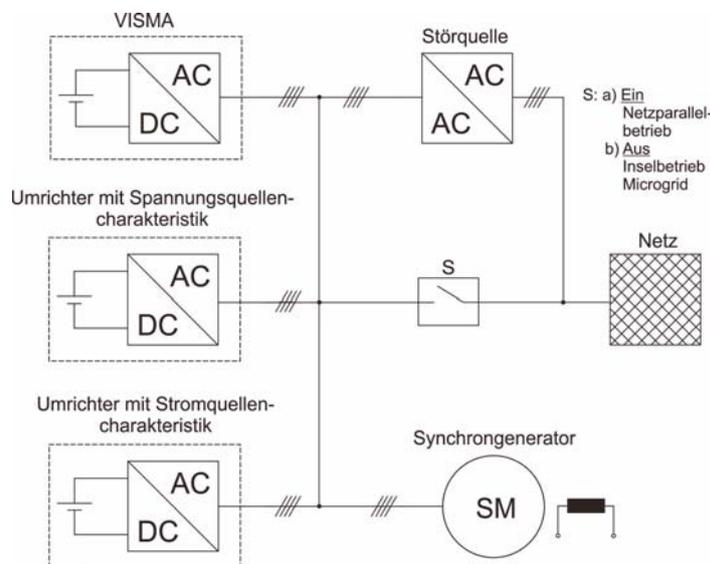


Abbildung 1: Möglicher Verbundbetrieb verschiedener Einspeisesysteme im Versuchsnetz

Auf Grundlage der gesammelten Erkenntnisse wird im folgenden Schritt eine Optimierung der Regelungskonzepte durchgeführt und es wird versucht, Aussagen über kritische Punkte zu treffen.

Projekt: Verbundprojekt CoNDyNet II - Kollektive Nichtlineare Dynamik
Komplexer Stromnetze

Projektstand: Zu Projektbeginn wurde für die Projektpartner ein interdisziplinärer Workshop in den Räumlichkeiten des EFZN in Goslar veranstaltet mit dem Ziel, eine gemeinsame Grundlage für einige Wechselrichtermodell aus Sicht der Elektro- und Regelungstechnik zu schaffen und eine Basis für die Weiterentwicklung von solchen Modellen zu erarbeiten. Während des ersten Projekthalbjahres wurden seitens des IEE gemäß der Arbeitsplanung im Projekt erste Wechselrichtermodell auf ihre Eigenschaften untersucht.

Projektpartner:

- Potsdam Institut für Klimaforschung (koordinierend)
- Forschungszentrum Jülich
- Technische Universität Dresden
- Jacobs University Bremen
- Frankfurt Institute for Advanced Studies
- Karlsruhe Institute of Technology
- Technische Universität Clausthal

Projektlaufzeit: 2019 - 2021

Gefördert durch: Projektträger Jülich

Bearbeiter: Steven Reineke, M. Sc. (Tel.: 72-2929)
steven.reineke@tu-clausthal.de

Projektleiter: Dr.-Ing. Dirk Turschner (Tel.: 72-2592)
turschner@iee.tu-clausthal.de

Prof. Dr.-Ing. H.-P. Beck (Tel.: 72-2570)
sekretariat@iee.tu-clausthal.de

IEE

Projekt: Entwicklung eines magnetisch Leitfähigen Elastomers

Projekt: In der Literatur sind Versuche bekannt, Elastomere mit magnetischen Partikeln auszurüsten. Jedoch sind bisher keine Materialien verfügbar, die ausreichend elastisch sind und über eine relevante magnetische Permeabilität μ_r verfügen. Zur Verwendung in einem induktiven Überträger müsste das μ_r einen Wert von über 100 haben.

Von verschiedenen Herstellern (Hawa, Magnetworld usw.) werden beispielsweise Compounds als sogenannte Kühlschrankschrankmagnete angeboten, bei denen es sich um Hartmagnete handelt, die jedoch für einen Wechselstrom-Energieübertrager ungeeignet sind.

Bis heute werden keine weichmagnetischen Elastomere angeboten, die eine relevante Permeabilität haben.

Allein von der Firma Polytron werden weichmagnetische Compounds angeboten, allerdings beträgt der Eisenanteil 85 %. Durch den hohen Eisenanteil kann in diesem Fall nicht mehr von einem elastischen Material gesprochen werden.

Die Herstellung von kunststoffgebundenen, magnetisch leitenden Materialien, den sogenannten Compounds, erfolgt heute in Pressanlagen oder mit einem Extrusionsverfahren. Damit besteht das Problem, dass die weichmagnetischen Partikel, die in den Kunststoff eingebracht werden, nicht in dem gesamten Korpus gleichmäßig oder strukturiert positioniert werden können.

Da es bisher nicht gelungen ist, eine relevante magnetische Leitfähigkeit von elastischen Compounds technisch zu erreichen, soll in diesem Vorhaben mit einer neuartigen Technologie dieses erstmals ermöglicht werden.

Ziel: Ziel des Vorhabens ist die Herstellung eines Elastomers, der einerseits magnetisch leitend, andererseits über eine gewisse Elastizität verfügt. Die Eigenschaften sollen anschließend in einem Prototypenaufbau überprüft werden.

Lösungsweg: Das Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme der TUC unterstützt die Industriepartner bei der Auslegung der magnetischen geblechten Komponenten für den Aufbau eines Energieübertragungssystems und bei der Auswahl der notwendigen Leistungselektronik. Eigene Leistungselektronikkomponenten und Messtechnik zur Wirkungsgradbestimmung können nach Bedarf bereitgestellt werden. Ein Messplatz wird eingerichtet, um die magnetische Leitfähigkeit der erstellten Proben zu überprüfen.

Projektstand: Ein Messplatz zur Überprüfung der magnetischen Leitfähigkeit der Proben wurde eingerichtet. Ein Magnetkreis zur Überprüfung des Prinzips wurde berechnet und die entsprechenden Komponenten beschafft. Ein Prototypaufbau soll in Kürze die ersten Messergebnisse liefern. Die untersuchten Proben des Elastomers besitzen noch nicht die gewünschte Leitfähigkeit. Daher werden zur Zeit Alternativen diskutiert und überprüft.



Abbildung 1: Messplatz zur Messung der magnetischen Leitfähigkeit, bestehend aus Gaußmeter, Flussmeter und Helmholtz-Spule.

Projekt: Entwicklung eines magnetisch Leitfähigen Elastomers

Projektpartner:

- 3dk.berlin
- Krebs Engineers GmbH
- Institut für Chemie Humboldt Universität Berlin
- Ingenieurbüro H. Hübner
- IEE Technische Universität Clausthal

Projektlaufzeit: 2018 - 2020

Gefördert durch: Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) , BMWi

Bearbeiter: Dr.-Ing. Dirk Turschner (Tel.: 72-2592)
dirk.turschner@tu-clausthal.de

Projektkoordinator: Dr.-Ing. Dirk Turschner (Tel.: 72-2592)
dirk.turschner@tu-clausthal.de

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. H.-P. Beck (Tel.: 72-2570)
info@iee.tu-clausthal.de

IEE

Projektübersicht

Abteilungsleiter: Dr.-Ing. Ralf Benger
Tel.: +49-5321-3816-8067
E-Mail: ralf.benger@tu-clausthal.de

Arbeitsgruppe Elektrische Energiespeichertechnik

Forschungsschwerpunkte und Projekte

Die letzten zwei Jahre in der Arbeitsgruppe Energiespeichersysteme waren geprägt durch die Bearbeitung der vom BMWi geförderten Verbundprojekte ReserveBatt und MoBat, dem weiteren Auf- und Ausbau des Batterietestzentrums am Standort des Forschungszentrums Energiespeichertechnologien (EST) in Goslar und der damit einhergehenden wissenschaftlichen Fokussierung auf das sicherheitstechnische Verhalten von Lithium-Ionen-Batterien. Die weite Durchdringung von Lithium-Ionen-Batterien in den verschiedensten Anwendungen, die stark steigenden Zulassungszahlen bei Elektrofahrzeugen und die öffentlichkeitswirksame Berichtserstattung über Batterieunfälle führen zu einer gestiegenen Sensibilisierung in Bezug auf sicherheitstechnische Fragestellungen. Dieses hat zum einen zu neuen Projekten und damit einem personellen Ausbau der Gruppe geführt und zum anderen zur neuen Vorlesung „Sicherheit und Zuverlässigkeit von Batteriesystemen“ motiviert.

Innerhalb der Arbeitsgruppe lassen sich die Forschungsarbeiten in die Themengebiete Systemintegration und Batteriesicherheit einordnen.

Systemintegration

Das dynamische Verhalten leistungsstarker Kurzzeit-Energiespeichersysteme spielt in den verschiedensten Anwendungen eine wichtige Rolle, insbesondere, wenn man ein Energiespeichersystem für die jeweilige Anwendung optimal dimensionieren, betreiben und nachbilden will. Die systemische Betrachtung der jeweiligen Energiespeichertechnologie in der entsprechenden Umgebung spielt eine wesentliche Rolle, da immer Wechselwirkungen zwischen den einzelnen technischen Systemen bestehen. Dies betrifft zum Beispiel die gegenseitige Rückwirkung des Verhaltens eines Batteriespeichers über eine Leistungselektronik auf das Netz und umgekehrt.

Aus wissenschaftlicher Sicht ist daher insbes. die Weiterentwicklung von Batteriemodellen für den hochdynamischen Einsatz und die Auswirkungen großer Leistungsgradienten auf das

elektrische und thermische Verhalten allgemein und auf die Lebensdauer von Batterien im Speziellen von großem Interesse.

Batteriezuverlässigkeit und -sicherheit

Mit immer größer werdenden spezifischen Energie- und Leistungsdichten beherbergen insbesondere elektrochemische Speicher auch ein wachsendes (latentes) Gefahrenpotential. Die Einführung neuer Materialkombinationen und immer größer werdende Anforderungen an die Speichersysteme bei gleichzeitigem Kostendruck erfordern daher sowohl für mobile als auch stationäre Anwendungen Forschungsarbeiten zur sicheren und zuverlässigen Anwendung von Batterien auf Zell-, Modul- und Systemebene. Dementsprechend sind ausgehend von kleinen Halbzellen bis hin zu großen Batteriesystemen die elektrochemischen, elektrophysikalischen und thermodynamischen Vorgänge zu erkennen, zu verstehen und spezifische Handhabungsregeln zu erstellen. Hierzu werden Komplexität elektrochemischer Speicher in der Arbeitsgruppe die Kompetenzen aus Elektrotechnik, elektrochemischer Verfahrenstechnik, Sensorik und Energiesystemtechnik systemübergreifend gebündelt. Darüber hinaus steht mit dem Batterietestzentrum die erforderliche Forschungsinfrastruktur zur Verfügung.

Projektübersicht

- **Modulare Hochleistungsbatteriesysteme in Verbindung mit sicherer Schnellladetechnik (MoBat)**

Im Rahmen des vom BMWi geförderten Verbundprojekts werden neuartige Schnellladealgorithmen für Hochleistungsbatterien identifiziert und hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf das prognostizierte Alterungsverhalten und damit auf die Lebensdauer von Batteriesystemen bewertet. Hierzu werden Ladeverfahren entwickelt, in verschiedensten Tests auf Zell-, Modul- und Systemebene angewendet und anschließend bzgl. der Integration in das Gesamtsystem bestehend aus Batterie und Hochleistungsladeinfrastruktur evaluiert. Hierzu ist am Batterietestzentrum ein leistungsfähiger Demonstrator einschließlich Pantograph und Batteriesystem aufgebaut.

Bearbeiter: Marcel Thiele, M. Sc.; Dipl.-Ing. Alexander Oberland

Projektkoordinator: Dr. Bengler

Projektleiter: Prof. Beck

Projektübersicht

- **Momentanreserve mit Hochleistungsbatterien (ReserveBatt)**

Wie sich eine Hochleistungsbatterie zur Erbringung von Momentanreserve zur Netzstabilisierung verhält und wie sich die Belastungen aus den zu erbringenden Systemdienstleistungen auf das Alterungsverhalten auswirken, wird in diesem vom BMWi geförderten Projekt untersucht. Dabei werden insbesondere die Auswirkungen von dynamischen Belastungen und sog. Mikrozyklen im Subsekundenbereich auf die Degradation eines Lithium-Ionen-Batteriespeichers betrachtet sowie die Rückwirkungen auf das Gesamtsystemverhalten einschließlich der netzstabilisierenden Wirkung betrachtet. Ein entsprechender Demonstrator in nennenswerter Leistungsklasse (400kVA) ist am Batterie-testzentrum in Goslar aufgebaut.

Bearbeiter: Jens Grabow, M. Sc., Dipl.-Ing. Frank Deblon, Steven Reineke, M. Sc.,
Dipl.-Ing. Eric Tchoupou Lando

Projektkoordinator: Dr. Benger

Projektleiter: Prof. Beck

- **Starthilfebooster**

Defekte oder tiefentladene Blei-Starterbatterien sind auch im letzten Jahr Pann ursache Nummer 1 gewesen. Auch deshalb wird in dem von der NBank geförderten Innovationsprojekt ein tragbares Starthilfegerät entwickelt, welches Startvorgänge an Fahrzeugen in beliebiger Anzahl vornehmen kann. Ein anderer Einsatz kann stattfinden, wo viele Fahrzeuge über längere Zeit unbenutzt stehen, wie etwa auf großen Verladeparkplätzen für Container-Überseeschiffe. Gemeinsam mit einem Industriepartner soll am Ende des Projekts ein leichtes, leitungsfähiges und zuverlässiges Gerät entstehen, welches mit weiteren Partnern zu einem kommerziellen Produkt weiterentwickelt wird.

Bearbeiter: Nury Orazov, M. Sc.

Projektkoordinator: Dr. Benger

Projektleiter: Prof. Beck

Stabilitätskriterien von Lithium-Ionen-Batterien und Thermal Runaway Detektion

In den vergangenen zwei Jahren konnten die Ausschreibungen für zwei Studien für den europäischen Automobilherstellerverband (ACEA) gewonnen werden, die auf der einen Seite die Stabilitätskriterien für das thermische Durchgehen (Thermal Runaway) behandeln und auf der anderen Seite sich mit der Erkennung von sicherheitskritischen Zuständen von Lithium-Ionen-

Batterien beschäftigen. Eine weitere Studie für 2020 ist in diesem Zusammenhang bereits in Auftrag gegeben.

Neben weiteren Projekten und Studien, die zum Teil mit Industriepartnern im Batterietestzentrum durchgeführt werden, ist auch ein neues BMWi-Projekt zur Risikobewertung von Lithium-Ionen-Batterien („RiskBatt“) auf den Weg gebracht worden. Dieses soll im 2. Quartal 2020 starten.

Zusätzlich zu den genannten Projekten wurden auch zahlreiche studentische Abschlussarbeiten in den Themenbereichen durchgeführt und studentische Hilfskräfte in die Projekte eingebunden.

Wie man also sehen kann, es bleibt „spannend“.

Projekt: Modulare Hochleistungsbatteriesysteme in Verbindung mit sicherer Schnellladetechnik (MoBat)

Problem: Der Einsatz von Batteriesystemen für Industrieanwendungen, welcher ein hohes Maß an Leistungsfähigkeit und Energiedurchsatz voraussetzt, wird derzeit oftmals mit Hilfe hoher Batteriekapazitäten und Batteriewechselkonzepten realisiert. Dies führt dazu, dass batteriebetriebene Fahrzeuge im ökonomischen Vergleich gegenüber konventionell betriebenen Fahrzeugen noch nicht so konkurrenzfähig erscheinen, wie sie es sein könnten. Neuartige Hochleistungsbatterien mit Lithiumtechnik sind jedoch in der Lage mit sehr hoher Leistung geladen zu werden, was neue Einsatzmöglichkeiten generiert. Im Projekt „MoBat“ wird daher ein modulares Hochleistungsbatteriesystem entwickelt, was zu einer Skalierbarkeit für verschiedenste Anwendungen führen soll. Zudem soll aufgezeigt werden, dass durch Schnellladungen auf teure und aufwendige Batteriewechselkonzepte in Industrie- und ÖPNV-Anwendungen verzichtet werden kann, was einen ökonomischen Vorteil mit sich bringt. Voraussetzung für den praktischen Einsatz ist die Bereitstellung von Schnellladesystemen, das heißt Hochleistungsbatterien mit kompatibler Ladetechnik. Des Weiteren sind für Schnellladungen hohe Stromstärken erforderlich, so dass ein leistungsfähiges Kühlkonzept der Batterie unumgänglich ist. Die Herausforderungen liegen dabei erstens im Bereitstellen hoher elektrischer Leistungen mit einer neu entwickelten, angepassten Ladetechnik, zweitens in den mit Schnellladungen verbundenen extremen elektrischen und thermischen Belastungen der Batterie sowie drittens in der damit einhergehenden Sicherheits- und Lebensdaueroptimierung.

Im Projekt soll vor allem das Zusammenwirken von vergleichsweise kleinen, aber besonders leistungstarken Lithium-Batterien und effizienter Ladetechnik optimiert werden. Dadurch lassen sich die Vorteile für den Einsatz einer Schnellladestrategie in Hochleistungsanwendungen, zum Beispiel für Elektrobusse und andere Heavy-Duty-Anwendungen, herausarbeiten.

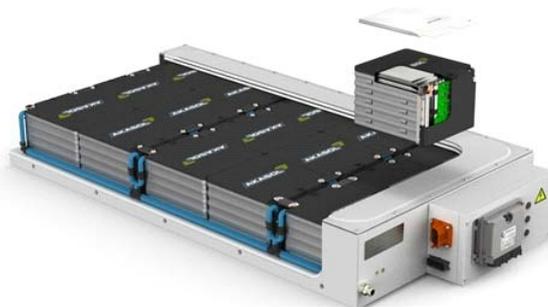


Abbildung 1: Modulares Hochleistungsbatteriesystem [Quelle: AKASOL GmbH]

Ziel: Das Teilprojekt des Forschungszentrums für Energiespeichertechnologien hat zum Ziel, neuartige Schnellladealgorithmen für Hochleistungsbatterien zu identifizieren und sie hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf das prognostizierte Alterungsverhalten, und damit auf die Lebensdauer, von Batteriesystemen hin zu bewerten. Hierzu sind die ausgewählten Ladeverfahren in verschiedensten Tests auf Zell-, Modul- und Systemebene anzuwenden und zu bewerten. Die Frage, die sich hierbei stellt, ist, ob abweichend zum Standard Konstantstrom-Konstantspannungs-Ladeverfahren Methoden bestehen, mit welchen sich Lithium-Batterien sehr schnell aber dennoch schonend vollladen lassen.

Stand der Technik: Durch die Wahl eines geeigneten Ladeverfahrens kann eine hohe Lebensdauer und/oder eine kurze Ladezeit realisiert werden. Im EFRE-Projekt „Schnellladung von Elektrofahrzeugen“ konnten seitens des EST bereits erste vielversprechende Ergebnisse erzielt werden. So gelang es, die Ladedauer eines Testfahrzeugs für eine Vollladung (Ladezustand SOC=0% auf SOC=100%) auf unter 30 Minuten zu verkürzen. Es zeigte sich ebenfalls, dass sich die getesteten Batterien und Zellen mit geeigneten Ladeverfahren nicht so stark erwärmten, wie bei einer vergleichbaren CCCV-Ladung. Jedoch konnten bisher noch keine Aussagen zum Alterungseinfluss der Verfahren auf Batterien getroffen werden, da hierfür Langzeituntersuchungen nötig sind. Diese werden im Projekt „MoBat“ durchgeführt, wobei nunmehr verschiedenste Ladealgorithmen im Hinblick auf die Auswirkungen auf das thermische Verhalten, die Lebensdauer und den Einfluss einer Kühlung näher untersucht werden.

Lösungsweg: Schwerpunkt der Forschung stellt somit die Untersuchung des Degradationsverhaltens von Lithium-Batterien vor dem Hintergrund permanenter Schnellladungen dar. Ziel der Lebensdaueruntersuchungen ist zu prüfen, ob Schnellladungen generell eine beschleunigte Alterung von Lithium-Batterien nach sich ziehen, bzw. ob dieser Alterungseinfluss ggf. durch geeignete Ladeverfahren gemindert oder gar aufgehoben werden kann. Hierfür werden die Daten von Langzeituntersuchungen einzelner Zellen, Batteriemodulen und des Gesamtsystems dienen, um das Alterungsverhalten abschließend für die unterschiedlichen Batterieebenen zu modellieren. Zwar bestehen verschiedenste Modellansätze zum Alterungsverhalten von Lithium-Batterien, diese beschränken sich jedoch hauptsächlich auf die Zellebene. Mitunter betrachten die bestehenden Veröffentlichungen zum Teil auch sehr detailliert die komplexen chemischen Abläufe innerhalb der einzelnen Zellen und lassen auf Zellebene sehr genaue Lebensdauerprognosen zu. Oftmals wird dabei auch dargelegt, dass die Prognosen auf Zellebene eins zu eins auf Systemebene hochgerechnet werden können. Die Erfahrungen des EST zeigen jedoch, dass sich in einem System von beispielsweise 300 Einzelzellen nicht alle exakt identisch

Projekt: Modulare Hochleistungsbatteriesysteme in Verbindung mit sicherer Schnellladetechnik (MoBat)

verhalten und daher auch nicht über die gleiche Lebensdauer verfügen. In diesem Zusammenhang besteht die Frage, wie Batteriemanagementsysteme, durch aktives oder passives Balancing, die Alterung und somit die Lebensdauer beeinflussen. Anhand der Modellierung werden daher einerseits die durchgeführten Versuche genauestens nachbildet und interpretiert, andererseits verlässliche Aussagen über zukünftige Entwicklungen von Zellen, Modulen und Systemen in Bezug auf Alterung, Kapazitätsverhalten, Innenwiderstände u.v.m. getroffen. Dies hat zum Ziel, zukünftig für verschiedenste Fahrprofile Aussagen zur optimalen Speichergröße und Betriebsstrategie vor dem Hintergrund der zu erwartenden Alterung treffen zu können. Dieses hat direkte Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems und die Betriebskosten solcher Batteriesysteme einschließlich der notwendigen Ladetechnik (TCO).

Projektstand: In aktuellen sowie Voruntersuchungen wurden verschiedenste Ladeverfahren (z.B. Stufenladung, Laden ohne Strombegrenzung, Pulsladung, IR-freies Laden) getestet, welche die Konstantspannungsphase ersetzen oder verkürzen und somit zu einer weiteren Reduktion der Ladedauern führen können. Als Schnellladeverfahren zur Untersuchung der zyklischen Alterung wurden das IU-Verfahren sowie das Pulsladeverfahren gewählt und jeweils mit einer Laderate von 3C getestet. Um allgemein den Einfluss von Schnellladungen auf die Degradation von Zellen zu bewerten, wurden zusätzlich Zellen mit dem vom Hersteller empfohlenen Standardladeverfahren (IU 1C) zyklisiert. Der genaue Ablauf eines Vollzyklus des jeweiligen Verfahrens ist der folgenden Tabelle zu entnehmen.

Verfahren	CCCV 1C (Referenz)	CCCV 3C	Pulsladung 3C
Phase 1	Ladung mit 46 A	Ladung mit 138 A	Ladung mit 138 A
Phase 2	Entladung mit 46 A	Entladung mit 46 A	Entladung mit 46 A
Phase 3	15 Min. Pause	15 Min. Pause	15 Min. Pause
Zyklendauer	≈ 2,5 Stunden	≈ 1,5 Stunden	≈ 1,25 Stunden

Tabelle 1: Aufbau eines Vollzyklus verschiedener Ladeverfahren

Zwischenzeitlich konnten mit jedem Ladeverfahren bereits 2000 Vollzyklen und mehr vollzogen werden, wobei ein linearer Alterungsverlauf zu erkennen ist. Die bisherigen Ergebnisse der Zyklentests sind in Abbildung 2 dargestellt.

Mit dem Pulsladeverfahren konnten aufgrund der hohen Ladegeschwindigkeit bereits 2700 Vollzyklen vollzogen werden, wobei die Restkapazität bei rund 85 % liegt. Extrapoliert man den bisherigen Verlauf, so würde das Lebensdauerende bei rund 3700 Vollzyklen liegen. Gemäß Herstellerangaben verfügen die Zellen über eine zu erwartende Lebensdauer von 4000 Vollzyklen unter Verwendung des Standardverfahrens (1C CCCV).

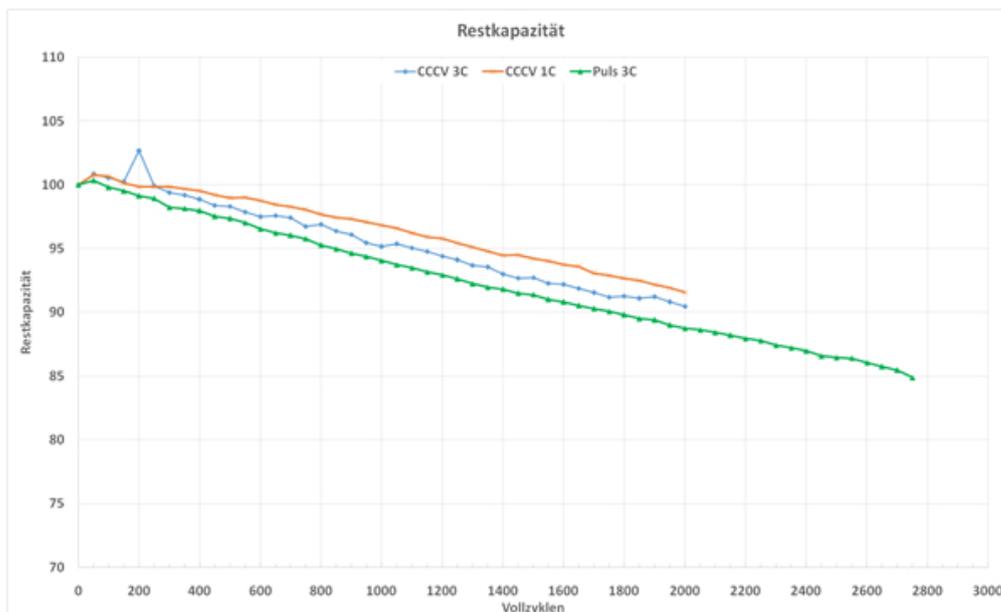


Abbildung 2: Vergleich des Kapazitätsverlaufs einer 46 Ah Pouchzelle (Lithium-Nickelmandganoxid) bei verschiedenen Ladeverfahren nach Tab. 1 bei 25°C (gelb: Standardladeverfahren (IU-Ladung) mit 1C (einstündiger Ladestrom), blau: IU-Ladung, 3C (20 minütiger Strom), grün: Pulsladeverfahren mit 3C)

Es zeigt sich somit, dass auch mit Schnellladungen, wie dem Pulsladen, hohe Lebensdauern zu erreichen sind. Abzuwarten bleibt, wie sich die Alterung bei Schnellladungen mit dem 3C CCCV-Verfahren verhalten wird. Momentan zeigt die Zelle, an der dieses Verfahren getestet wird, noch eine höhere Restkapazität. Allerdings wird erwartet, dass der Kapazitätsverlust mit zunehmender Alterung nicht mehr linear verläuft, sondern zunehmend exponentiell wird. Aus diesem Grund sollen die Zellen bis zum Lebensdauerende weiter zyklisiert werden.

Um einen Einblick in die Vorgänge innerhalb der Zelle zu bekommen, die während der Verwendung der weiterentwickelten Ladeverfahren auftreten, wurden zwei verschiedene Modellansätze verfolgt. Zum einen stellt ein Ansatz basierend auf den chemisch, physikalischen Grundgleichungen einen Weg zur Betrachtung lokaler Phänomene dar. Dieses Modell wurde in COMSOL erstellt. Hierzu ist die Ermittlung zahlreicher Parameter aus der Literatur erfolgt. Aufgrund der verwendeten Gleichungen, wie den für die Abbildung der Diffusion der Ladungsträger genutzten Fickschen Gesetzen und weiterer mehrdimensional berechneter Größen aus verschiedenen Differentialgleichungen, ist der Aufwand zur Bestimmung von Strom- oder Temperaturverteilungen über einen vollständigen Ladezyklus sehr groß.

Leistungstests aufgebaut. An diesem System werden entsprechend die Pulsladeverfahren an den modular verschalteten Batteriesystemen (vgl. Abbildung 1) getestet.



Abbildung: Aufbau des Gesamtsystem mit Pantograph im Batterietestzentrum

Es wurden zwei unterschiedliche Entwicklungsstufen des Kontaktkopfes innerhalb der Leistungstests verwendet. Hierbei handelt es sich um die Versionen 4 und 5. Derzeit sind dauerhafte Belastungen des Systems mit 600 kW möglich.

Projektpartner:

- ▶AKASOL AG
- ▶Schunk Bahn- und Industrietechnik GmbH
- ▶Wolfsburg AG
- ▶Fraunhofer HHI
- ▶Stöbich technology

Projektlaufzeit: 01.11.2016 - 30.04.2020

Projektträger : Forschungszentrum Jülich GmbH

Gefördert durch: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

Bearbeiter: Marcel Thiele, M. Sc. (Tel.: 05321/3816-8161)
marcel.thiele@tu-clausthal.de

Projekt: Modulare Hochleistungsbatteriesysteme in Verbindung mit sicherer Schnellladetechnik (MoBat)

Dipl.-Ing. Alexander Oberland (Tel.:05321/3816-8063)
alexander.oberland@tu-clausthal.de

Projektkoordinator: Dr.-Ing. Ralf Bengler (Tel.: 05321/3816-8067)
bengler@iee.tu-clausthal.de

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. H.-P. Beck (Tel.: 72-2570)
sekretariat@iee.tu-clausthal.de

IEE

Projekt: Systemdienstleistung für den sicheren Betrieb des Energieversorgungssystems: Momentanreserve mit Hochleistungsbatterien (ReserveBatt)

Projekt: Die Energiewende stellt die Versorgungssicherheit im Stromversorgungsnetz vor neue Herausforderungen und fordert innovative Lösungsansätze. Wie bei zunehmender Nutzung erneuerbarer Energien und der damit verbundenen Ablösung konventioneller Großkraftwerke die Netzstabilität erhalten werden kann, soll in dem Projekt „ReserveBatt“ untersucht werden. Hierzu soll ein leistungsstarkes und intelligentes Batteriesystem zu jedem Zeitpunkt ein Gleichgewicht zwischen fluktuierender Energieerzeugung und -verbrauch gewährleisten.

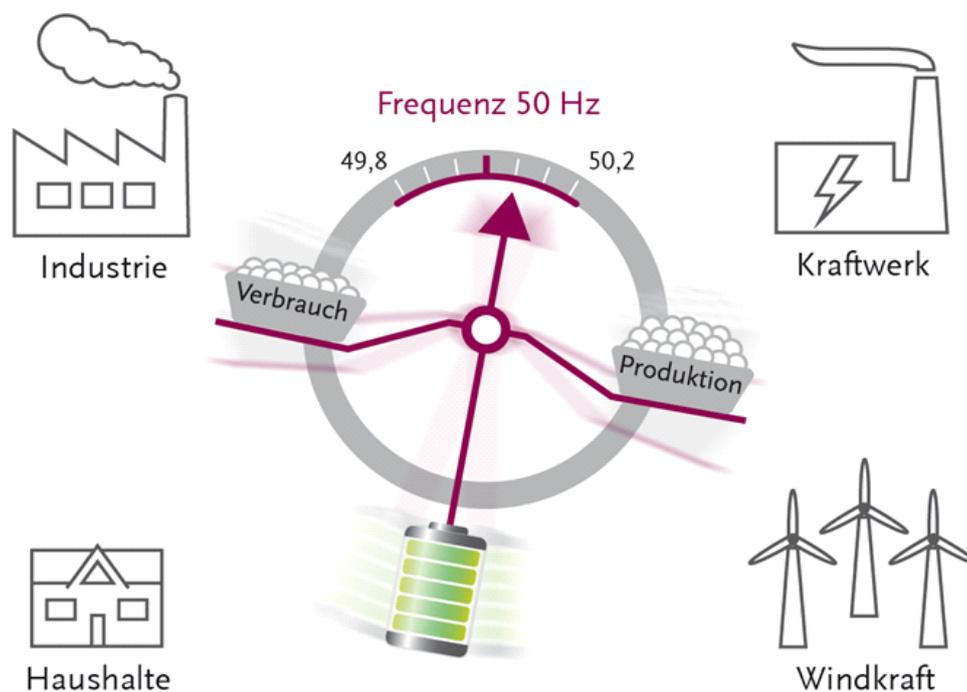


Abbildung1: Darstellung des Gleichgewichts im elektrischen Energieversorgungssystem zwischen fluktuierender Erzeugung und Verbrauch

Ziel: Die Ziele des Gesamtprojekts sind die Konzeption und der Aufbau eines Demonstrators zur Erbringung von Momentanreserve als Systemdienstleistung für Betreiber von Energieversorgungsnetzen sowie die Erforschung seines Verhaltens in der Praxis und dessen Bewertung in Bezug auf den vorgesehenen späteren Einsatzbereich. Abgerundet wird das Projekt durch den Entwurf und die Evaluierung von Verwertungsmöglichkeiten und möglichen Geschäftsmodellen für die Erbringung von Systemdienstleistungen. Der Demonstrator enthält als Kernkomponente einen sogenannten Stack-Wechselrichter, der im Rahmen des Projekts konzipiert und aufgebaut werden soll. Der Stack-Wechselrichter koppelt eine Lithium-Ionen-Hochleistungsbatterie mit

dem Versorgungsnetz und steuert den Energiefluss zwischen beiden Systemen. Der Demonstrator soll im Leistungsbereich von 400 kW mit einem Batteriespeicher bei einem Energieinhalt von etwa 50 kWh ausgelegt werden. Der Feldtestbetrieb soll sich über mehrere Monate erstrecken, um eine aussagekräftige praxisnahe Erforschung und Bewertung seines Verhaltens unter besonderer Beachtung des Sicherheitsaspektes zu gewährleisten.

Lösungsweg: Für die Konzeption, den Aufbau und die anschließende Untersuchung der Komponenten sowie des Gesamtsystems zur Erbringung der Momentanreserve aus einem Hochleistungs-Batteriespeicher werden folgende Schritte am Forschungszentrum Energiespeichertechnologien der TU Clausthal (EST) durchgeführt:

- Optimierte Auslegung eines Batteriespeichers hinsichtlich Leistungsfähigkeit und Energieinhalt unter Beachtung und Konzeption von Sensorik, Kühlung und Sicherheitsmaßnahmen sowie der Lebensdauer der Batterie
- Konzeption und Koordination des Aufbaus eines Leistungsspeichers bestehend aus Lithium-Ionen-Batterie und Leistungselektronik zur Erbringung von Momentanreserve und anderen Systemdienstleistungen (ohne Primär- und Sekundärregelleistung sowie Minutenreserve) auf Niederspannungsebene
- Berücksichtigung des Einflusses der Belastungen aus den Systemdienstleistungen (SDL) auf die Batterie - insbesondere der Auswirkungen von dynamischen Belastungen und sog. Mikrozyklen im Subsekundenbereich auf die Alterung des Speichers, sowie die Rückwirkungen auf das Gesamtsystemverhalten einschließlich der netzstabilisierenden Wirkung
- Bewertung der Wirkung der SDL aus der Batterie über die Leistungselektronik auf das Netz und Entwicklung einer „Präqualifizierungsvorschrift“ zur Erbringung von Momentanreserve
- Betrachtung der Wirtschaftlichkeit und Kosten/Nutzen-Vergleich auch zu anderen Speichertechnologien oder alternativen Flexibilitätsoptionen zum Erbringen von SDL
- Entwicklung eines Business-Case in Abhängigkeit vom aktuellen Marktgeschehen

Projektstand: Im derzeitigen Projektstand werden die entwickelten Komponenten der Projektpartner in das finale Gesamtsystem integriert. Dazu werden schrittweise die neuen Komponenten eingebaut und ihre Funktion getestet. Die folgende *Abb.: 2* zeigt das am Energiecampus installierten ReserveBatt-Umrichtersystem Pilot 1

Projekt: Systemdienstleistung für den sicheren Betrieb des Energieversorgungssystems: Momentanreserve mit Hochleistungsbatterien (ReserveBatt)

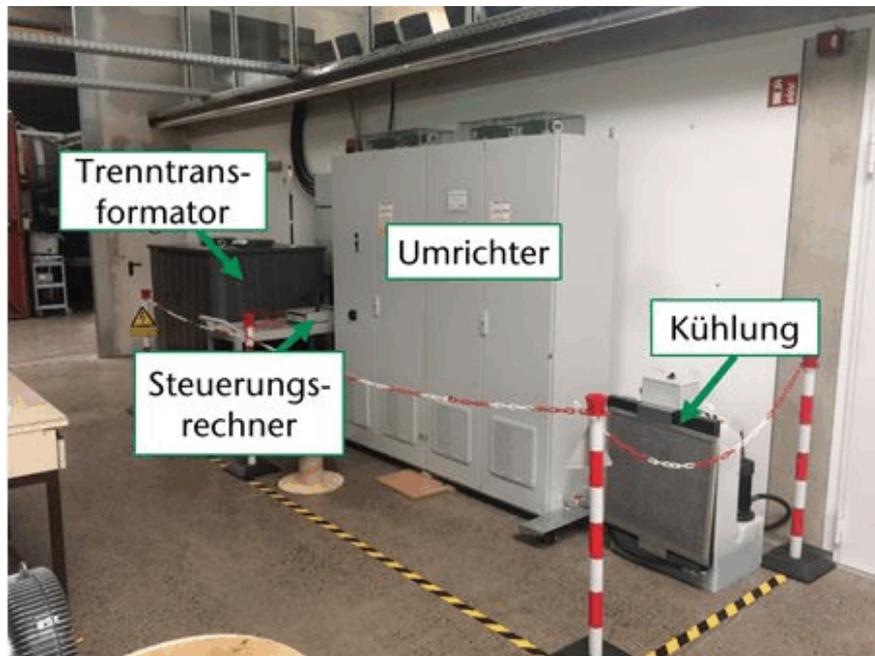


Abbildung 2: Integriertes 400 kW-ReserveBatt-Umrichtersystem Pilot 1 am Energiecampus

Der Umrichter ist über einen Trenntransformator direkt an die Niederspannungshauptverteilung am Energiecampus des EST angeschlossen und speist somit direkt in das Mittelspannungsnetz ein. Die Steuerung des Umrichters Pilot 1 erfolgt nach dem am IEE (Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme) entwickelten und patentierten Prinzip der virtuellen Synchronmaschine (VISMA) noch über einen externen Steuerungsrechner. Mit dieser Trennung von Steuerungsrechner und Umrichter kann bereits früh vor Projektende flexibel und mit verhältnismäßig wenig Aufwand das Verhalten des Umrichtersystems bei verschiedenen Parametrierungen und Ansteuerungstechniken der Leistungselektronik am Netz getestet werden. Das Umrichtersystem konnte dabei bereits 400 kW Momentanreserve netzparallel in das öffentliche Netz einspeisen. In einem weiteren Schritt erfolgt der Anschluss des Hochleistungsbatteriesystems an das Umrichtersystem Pilot 1. Dabei werden ausgiebige Leistungstests zur Analyse des Gesamtsystemverhaltens und Batterielebensdauerungsverhaltens durchgeführt. Die gesammelten Ergebnisse fließen dabei laufend in das derzeit entwickelte ReserveBatt-Umrichtersystem Pilot 2, indem alle Steuerungs- und Überwachungsfunktionen in einem integrierten System zusammengeführt werden, mit ein, so dass das Umrichtersystem später dauerhaft in einer industriellen Feldumgebung betrieben werden kann.

Projektpartner:	<ul style="list-style-type: none">▶ Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut, Faseroptische Sensorsysteme (HHI-FS)▶ AKASOL AG▶ Infineon Technologies AG▶ Stöbich technology GmbH▶ LTI Motion GmbH▶ Tennet TSO GmbH, Harz Energie Netz GmbH (assoziiert)
Projektlaufzeit:	01.06.2017 - 31.05.2020
Gefördert durch:	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert.
Bearbeiter:	Dipl.-Ing. Frank Deblon (Tel.: 05321/3816-8063) frank.deblon@tu-clausthal.de
	Jens Grabow, M. Sc. (Tel.: 05321/3816-8065) jens.grabow@tu-clausthal.de
	Steven Reineke, M. Sc. (Tel.: 72-2929) steven.reineke@tu-clausthal.de
Projektkoordinator:	Dr.-Ing. Ralf Bengler (Tel.:05321/3816-8067) bengler@iee.tu-clausthal.de
Projektleiter	Prof. Dr.-Ing. H.-P. Beck (Tel.: 72-2570) sekretariat@iee.tu-clausthal.de

Projekt: ReserveBatt: Ereignisbasiertes Alterungsmodell für Lithium-Ionen-Batterien für hochdynamische Belastungen

Projekt: Für die Erbringung von Momentanreserve sind relativ hohe Leistungen bei gleichzeitig geringem Energieaufwand nötig. Dieses ist besonders mit Hochleistungsbatterien erreichbar. Dabei sind die Batterien individuellen Belastungen durch dynamische Strombelastungen bei verschiedenen Ladezuständen und Temperaturen ausgesetzt. Diese wiederum haben einen starken Einfluss auf die Lebensdauer. Deshalb werden im Rahmen des Projektes Alterungsmodelle entwickelt, die auf Basis von Messdaten und Simulationsdaten das Batterieverhalten mit zunehmender Alterung und die Lebensdauer der Batterie vorhersagen können. Neben der Entwicklung eines physikalisch-chemischen Alterungsmodells sollen im Projekt Ansätze aus früheren Arbeiten (DFG Be 1496/17-1: Alterungsmodelle von Lithium-Ionen-Batterien) zur Entwicklung eines ereignisbasierten Modells weiterentwickelt und für die spezielle Anwendung zur Erbringung von Momentanreserve adaptiert werden.

Ziel: Entwicklung eines Alterungsmodells als ereignisbasiertes Modell zur Beschreibung der Alterungseffekte von Lithium-Ionen-Batterien bei der Erbringung von Momentanreserve und die Entwicklung von validierten synthetischen Lastprofilen zur beschleunigten Durchführung von Alterungstests.

Stand der Technik: Die Entwicklung eines ereignisbasierten Lebensdauermodells für Lithium-Batterien ist nach Recherchen in der Literatur bisher nicht veröffentlicht und ist daher verstärkt voranzutreiben. Ansätze für den Einfluss der Reihenfolge von Belastungen auf die Batterie-lebensdauer und deren richtige Interpretation sind zum jetzigen Zeitpunkt kaum bekannt und werden einen weiteren Schwerpunkt in der fortlaufenden Modellentwicklung im Projekt bilden. Ansätze für Bleibatterien gehen v.a. auf die Arbeiten von Wenzl (Journal of Power Sources, 144 (2005), 373-38) zurück und sind in Rahmen eines Projekts mit der Deutschen Bahn auch umgesetzt worden. Ereignisorientierte Modelle überzeugen durch hohe Rechengeschwindigkeit; die Genauigkeit ist wesentlich von der Parametrierung abhängig und erfolgt mit Hilfe durchgeführter Experimente und Expertenwissen.

Lösungsweg: Bei der Entwicklung eines ereignisbasierten Modells werden die lebensdauerrelevanten Belastungen (Strom, Stromänderungsgeschwindigkeit, Spannung Temperatur, Ladezustand) der Batterie im ersten Schritt nach Belastungsbereichen aufgeteilt (Abbildung 2). Dabei werden die Daten je nach gesuchten Ereignissen mit Hilfe von Zählverfahren (Rainflow-Zählung, Verweildauerzählung, Von-Bis-Zählung) in Matrizen (Belastungsmatrizen) klassifiziert. Danach werden die Wöhler-Matrizen und die Belastungsmatrizen zur Berechnung der Schädigung pro Bereich (Kapazitätsverlust, Lebensdauerverlust) verwendet. Jede Wöhler-Matrix

enthält die Klassifizierung der bis zur Lebensdauerende aufgenommenen Belastungen eines Belastungsbereichs. Zudem werden die Wöhlermatrizen oder Referenzmatrizen durch Experiment oder Literaturrecherche ermittelt. Die Schädigungen aller Belastungsbereiche können zu einer Gesamtschädigung summiert werden (siehe Abbildung 2)

Weiteres ist bereits im letzten Jahresbericht des IEE

(http://www.iee.tu-clausthal.de/fileadmin/downloads/Jahresbericht_2016_2017.pdf, S. 111-115) über das Vorgehen zur Erstellung des Ereignisbasierten Modells berichtet worden. Um das Alterungsmodell möglichst allgemeingültig aufzustellen, sind die Versuche von Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltzellen (NMC) auf Lithium-Eisenphosphat-Zellen (LFP) erweitert worden. Abbildung 1 zeigt die untersuchten LFP Zellen.

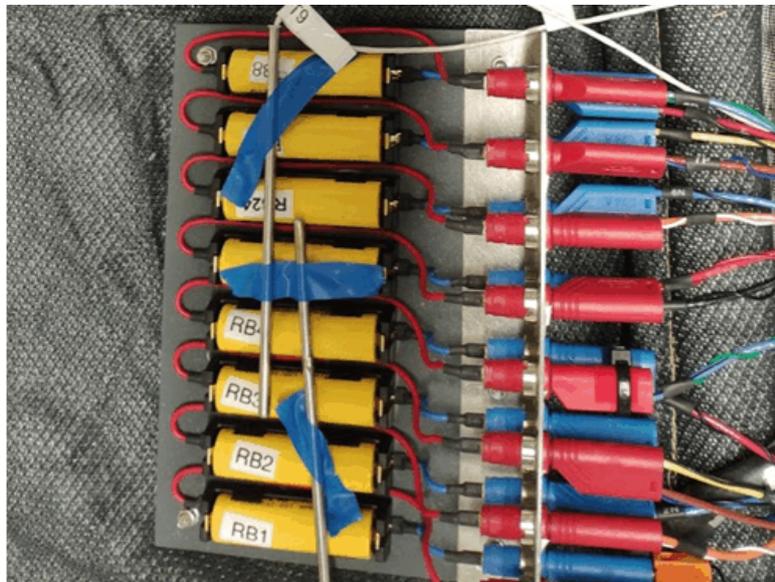


Abbildung 1: Darstellung der untersuchten LFP Zellen (3,3 V, 1,1 Ah, Typ: APR18650M1A)

Projektstand: Im Batterielabor des IEE und am Batterietestzentrum am Forschungszentrum Energiespeichertechnologien in Goslar laufen Experimente zur Validierung des ereignisbasierten Modells. Aufgrund der hohen Anzahl der Ladezustandsbereiche der Belastungsmatrizen, der langen Versuchslaufzeit und der begrenzt zur Verfügung stehenden Prüfkanäle werden aus der Belastungsmatrix Bereiche ausgewählt (siehe Tabelle 1).

Zur Analyse der Daten wird mit Matlab ein Tool entwickelt und die Messdaten in einer Datenbank archiviert. Zusätzlich werden LFP-Zellen anhand des schon beschriebenen Modells (http://www.iee.tu-clausthal.de/fileadmin/downloads/Jahresbericht_2016_2017.pdf, S.111-115) zur Verstärkung der Aussagen über die Validierung des ereignisbasierten Modells untersucht.

Projekt: ReserveBatt: Ereignisbasiertes Alterungsmodell für Lithium-Ionen-Batterien für hochdynamische Belastungen

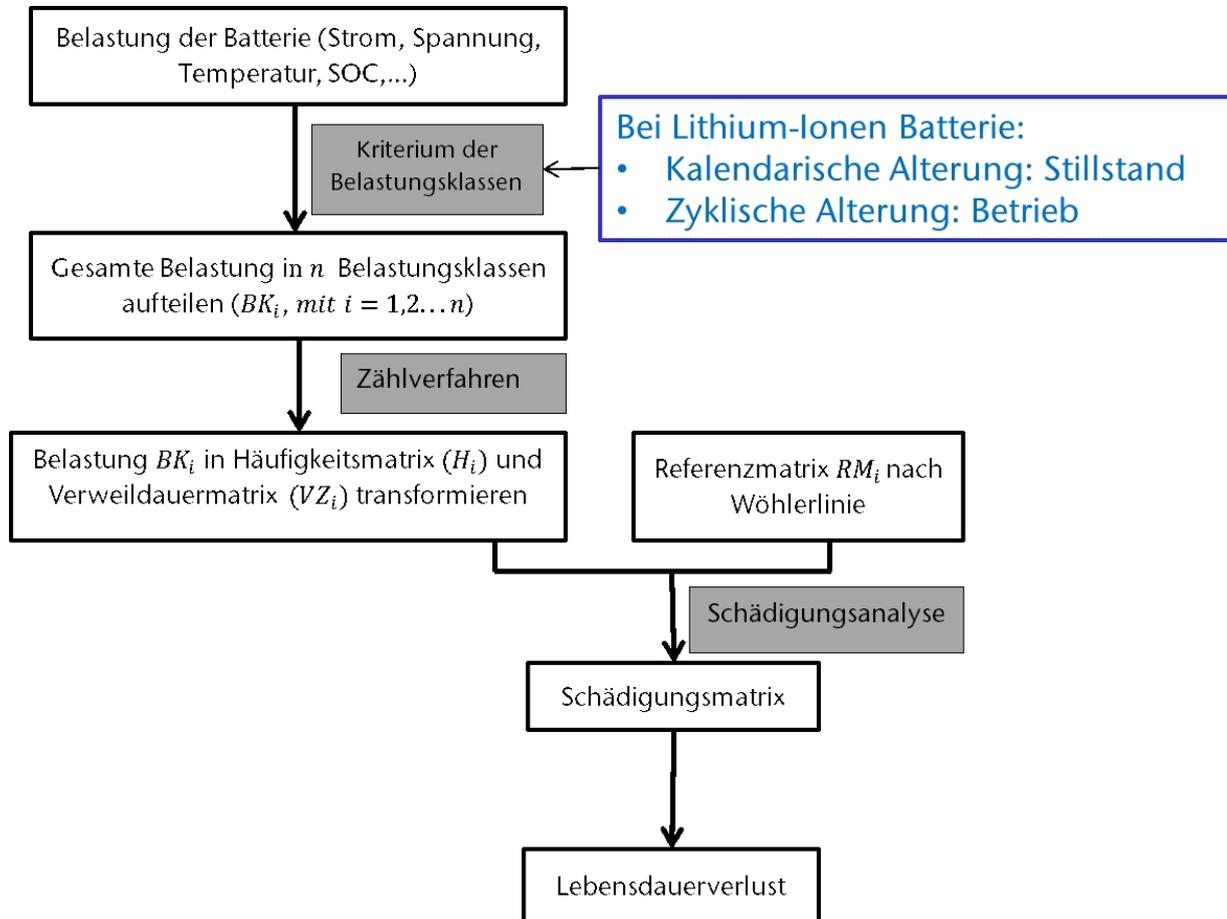


Abbildung 2: Prinzip des Lebensdauer-Modells

Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse einer Belastung mit einem künstlich generierten Belastungsprofil, welches nach dem Prinzip der Markov-Kette Anteile verschiedener Belastungsbereiche enthält

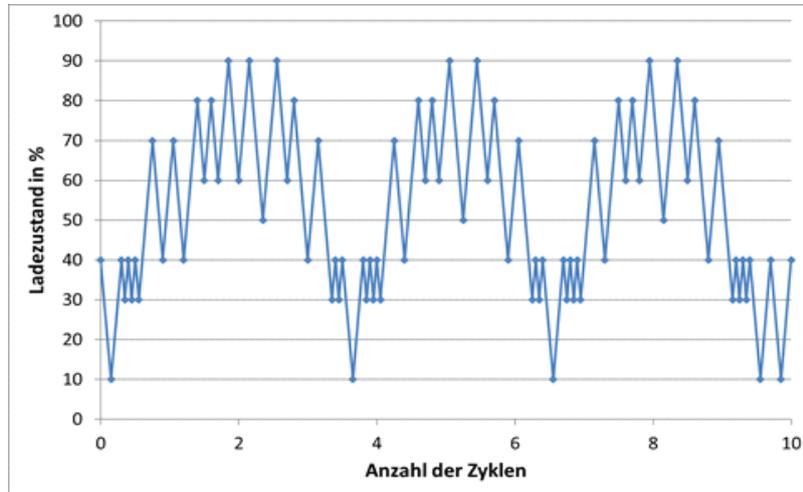


Abbildung 3: Ausschnitt eines Belastungsprofils aus mehreren Ladezuständen nach den Markov-Keten-Prinzip zur Validierung des Ereignisbasierten Modells (Abb. 4)

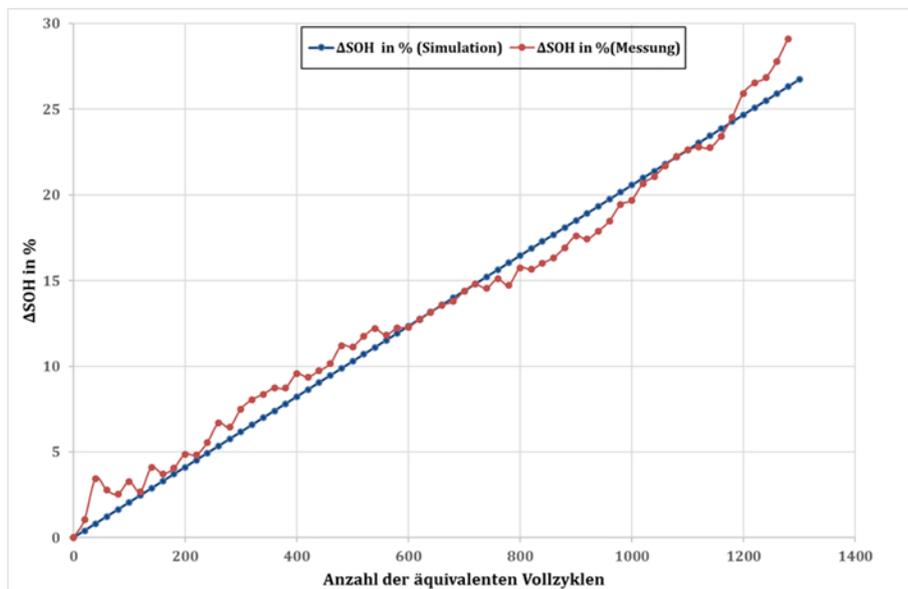


Abbildung 4: Vergleich des gemessenen prozentualen Kapazitätsverlusts bei 18650-Rundzellen NMC (3,6V, 2,25Ah, CGR18650CG) bei gemischter Belastung nach Abb. 3 mit dem berechneten Ergebnis des ereignisbasierten Modells auf Basis gemessener Monobelastungen. Zyklische Belastung mit 1C

Projekt: ReserveBatt: Ereignisbasiertes Alterungsmodell für Lithium-Ionen-Batterien für hochdynamische Belastungen

Tabelle 1 zeigt die Prüfmatrix zur Parametrierung des Ereignisbasierten Alterungsmodells mit LFP-Zellen (APR18650M1A). Die ersten Zwischenergebnisse sind voraussichtlich Ende April 2020 zu erwarten.

SOC in %	100																			
	95																			
	90																			
	85																			
	80																			
	75																			
	70																			
	65	450 95%																		
	60		570 96%																	
	55	450 97%																		
	50		540 95%																	810 90%
	45	450 96%																		
	40		540 97%																	
	35	450 97%																		
	30																			
	25																			
	20																			
	15																			
	10																			
5																				
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100									
	DOD in %																			

Tabelle 1: Prüfmatrix zur Parametrierung des Ereignisbasierten Alterungsmodells mit LFP-Zellen (3,3 V, 1,1 Ah, APR18650M1A). Die Tests (mit 5C) laufen noch bis ungefähr Mai 2020 (gelbe Markierungen stellen den aktuellen SOH in % und die Anzahl der äquivalenten Vollzyklen der bereits belasteten Zellen dar, rote markierte Bereiche werden anschließend gestartet).

Projektpartner:	<ul style="list-style-type: none">▶ Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut, Faseroptische Sensorsysteme (HHI-FS)▶ AKASOL AG▶ Infineon Technologies AG▶ Stöbich technology GmbH▶ LTI Motion GmbH▶ Tennet TSO GmbH, Harz Energie Netz GmbH (assoziiert)
Projektlaufzeit:	01.06.2017 - 30.11.2020
Gefördert durch:	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
Bearbeiter:	Dipl.-Ing. Eric Tchoupou Lando (Tel.: 72-3819) eric.tchoupou.lando@tu-clausthal.de
Projektkoordinator:	Dr.-Ing. Ralf Bengler (Tel.:05321/3816-8067) bengler@iee.tu-clausthal.de
Projektleiter	Prof. Dr.-Ing. H.-P. Beck (Tel.: 72-2570) sekretariat@iee.tu-clausthal.de

Projekt: Sicherheit von Lithium-Ionen-Batterien: Stabilität und Detektionsmöglichkeiten

Problem: In der Pannenstatistik des ADAC finden sich startunwillige Batterien allwinterlich auf dem vordersten Platz [1]. Fast 850.000 Mal mussten die ADAC-Straßenwachtfahrer 2010 Starthilfe wegen entladener oder defekter Batterien geben - und das keineswegs nur bei älteren Autos. Auch 2019 waren mit knapp 42 % schwache Batterien häufigste Pannenursache [2]. Viele kleine oder auch größere elektrische Helferlein belasten auch die Fahrzeugbatterien insbesondere, wenn diese nur auf Kurzstrecken eingesetzt werden oder bspw. längere Zeit stehen. Starthilfe wird aber nicht nur im Endkundenbereich durch den ADAC gegeben, auch benötigen Autohersteller und Autohäuser Starthilfegeräte im Einsatz. Stehen die Autos über mehrere Wochen, ob im Autohaus oder im Hafen, um verladen zu werden, ist die Batterie meist entladen. Gerade in den Häfen müssen 300 bis 400 Autos in kürzester Zeit gestartet und verladefertig gemacht werden. Hier führen Schichtarbeitsdruck und kostspielige Liegezeiten der Schiffe zu hohen Schadenssummen durch Bearbeitungs- und Anfahrschäden an den Fahrzeugen, die durch die Starthilfekolonnen ausgelöst werden.

Ziel: Ziel ist die Entwicklung und Erprobung eines mobilen Starthilfe-Boosters für gewerbliche Anwendungen. Zielgruppe sind Anwender, die viele Fahrzeuge in Serie innerhalb kurzer Zeit starten müssen, wie z.B. Dienstleister für das Verladen von großen Fahrzeugmengen in Häfen oder auf Abstellflächen von Fertigungsüberhängen der Automobilhersteller. Hier müssen viele hundert Fahrzeuge innerhalb kürzester Zeit verladefähig gemacht werden. Ein zeiteffizienter und zuverlässiger Startvorgang ist auf Grund der Personal- und Liegekosten unabdingbar und macht folglich einen leistungsstarken Starthilfe-Booster bei einem erheblichen Teil der Fahrzeuge erforderlich. Gerade diese mit Neufahrzeugen arbeitenden Dienstleister sind darauf angewiesen, dass die Starthilfe einfach zu bedienen ist. Ein weiteres Ziel ist es, die Geräte so zu konstruieren, dass sie als Koffer oder auf dem Rücken getragen werden können und dadurch mechanische Beschädigungen an den Fahrzeugen, wie z.B. durch eine lange Verkabelung oder sperrige Geräte, vermieden werden können.

Das Entwicklungsziel ist erreicht, sobald ein funktionsfähiger und seriennaher Prototyp gebaut ist, dieser alle erforderlichen Funktionen nachweisen kann und aus dem Entwicklungsergebnis eine Grundlage für die Weiterentwicklung zu einem für eine Serienfertigung geeigneten Zustand abgeleitet werden kann. Dazu gehören eine Beschaltungs- und Funktionsdokumentation, sowie eine Bauteilestückliste mit Bezugsquellenempfehlung.

Stand der Technik: Derzeit nutzen Anwender, die viele Fahrzeuge in Serie innerhalb kurzer Zeit starten müssen, oftmals schwere, mit Bleibatterien versehene Handwagen als Eigenbau, die zwischen den Fahrzeugen rangiert werden müssen. Hier kommen oft große LKW-Batterien zum

Einsatz, so dass ein Handwagen ein mittleres Betriebsgewicht von 100 kg aufweist. Dieses hat eine geringe Flexibilität und Effizienz zur Folge und ist nicht zeitgemäß. Zudem können diese Art von Starthilfegeräten in der Regel nicht schnell über das Bordnetz eines Fahrzeugs nachgeladen werden, sondern müssen trotz der Batteriegröße nach einigen Dutzend Startvorgängen mit Hilfe eines externen Ladegerätes geladen werden, wobei der Ladevorgang durchschnittlich 10 Stunden dauert. Geräte, wie sie zum Beispiel in Werkstätten vorhanden sind, sind für den Einsatz im Outdoor-Bereich und zum häufigen Starten ungeeignet. Sie benötigen in der Regel einen Netzanschluss und sind nicht für das mehrmalige Starten nacheinander ausgelegt. Aus dem Konsumerbereich sind ebenfalls Starthilfegeräte bekannt. Moderne Geräte sind bereits mit Lithium-Ionen-Batterien erhältlich und daher klein und handlich. Der Energieinhalt reicht jedoch meist nur für maximal zwei bis drei Startvorgänge nacheinander und die Gesamtlebensdauer ist auf wenige Zyklen beschränkt. Es ist nicht vorgesehen, diese Batterien direkt am Fahrzeug nachzuladen, sondern mit Hilfe eines zusätzlichen Ladegerätes. Diese zum Teil relativ günstigen Geräte sind nicht für den industriellen oder gewerblichen Bereich konstruiert und ausgelegt. Darüber hinaus muss besonders beim Startvorgang hochwertiger Kfz aktiv die Einhaltung von Spannungsgrenzen gewährleistet werden, um Störungen oder Beschädigungen am Bordnetz, insbesondere sicherheitsrelevanter Funktionen, zu vermeiden.

Lösungsweg: Das Funktionsprinzip des Starthilfe-Boosters basiert darauf, dass die durch einen Startvorgang von ihm entnommene elektrische Energie direkt nach einem erfolgreichen Startvorgang von dem Generator des gestarteten Motors zurück gespeist wird und im Energiespeicher des Boosters effizient eingelagert wird.

So soll es möglich sein, eine beliebige Anzahl von Fahrzeugen in direkter Reihenfolge nacheinander starten zu können, ohne den Booster über ein Netzteil nachladen zu müssen. Um die wartungsfreie Nutzungsdauer zu erhöhen, ist ein schneller Wechsel des eingesetzten Batteriespeichers unerlässlich.

Der Energiespeicher des Boosters soll mindestens drei Startvorgänge nacheinander ohne Nachladung ermöglichen, wenn z.B. vorausgegangene Startversuche erfolglos waren.

Beim Anschluss des Boosters an eine entladene Bordnetzatterie ist darauf zu achten, dass kein unkontrollierter Ausgleichsstrom zwischen Booster und entladener Batterie nach Herstellung der Kontaktierung fließen kann, damit es zum einen zu keinen Schädigungen an Elektronik, Bordnetz- und Starthilfebatterie kommt und zum anderen eine zu tiefe Entladung der Starthilfebatterie verhindert wird.

Beim Startvorgang eines Fahrzeugs sind Ströme von mehreren hundert Ampere erforderlich, beispielsweise von über 1.000 A bei großen Diesel-Pkw- und über 2.000 A bei Lkw-Motoren

Projekt: Sicherheit von Lithium-Ionen-Batterien: Stabilität und Detektionsmöglichkeiten

und anderen großen Motoren. Unmittelbar zu Beginn des Startvorgangs, bei stehendem Anlassermotor, wird die Starterbatterie nahezu im Kurzschluss betrieben und der Batteriestrom im wesentlichen durch den ohmschen Wicklungswiderstand begrenzt bis sich durch die Drehung des Anlassers eine Gegenspannung aufbaut. Der sich dabei einstellende Strom beträgt ca. 30 – 50 % des Spitzenstroms. Durch die Kompressionsvorgänge im Verbrennungsmotor ergeben sich große Leistungsschwankungen, die dem Starthilfesystem eine entsprechend hohe Dynamik abfordern. In der Regel dauert ein Startvorgang jedoch nicht länger als drei Sekunden. Die benötigte Ladungsmenge liegt oft bei ca. 1.000 As und die Energiemenge je nach Spannungslage unter 10.000 Ws. Der in den ersten 0,5 Sekunden, also zu Beginn des Anlassvorgangs benötigte Spitzenstrom kann häufig auch von einer gealterten Batterie oder einer Batterie mit sehr geringer Kapazität geliefert werden („Kondensatorwirkung“). Der danach für ca. 1 bis 2 Sekunden fließende Strom kann dagegen von einer gealterten oder stark entladenen Batterie nicht mehr geliefert werden, insbesondere dann nicht, wenn die Temperatur der Batterie und/oder des Motors sehr niedrig ist.

Bei der Auslegung eines Starthilfegeräts oder Starthilfesystems ist primär nicht der Energieinhalt des Speichers entscheidend, sondern – abgesehen von der spezifischen Energiedichte - seine Leistungsfähigkeit bzw. sein Hochstromverhalten auch bei tiefen oder hohen Temperaturen. Aus diesem Grunde sollen unterschiedliche Speichertechnologien untersucht werden. Neben Batterien wurden auch Doppelschichtkondensatoren (DSK) betrachtet, aber auf Grund hoher Kosten und einer schlechten volumetrischen Energiedichte für die Anwendung als nicht praktikabel erachtet.

Im Rahmen des Projektes wurden deshalb unterschiedliche Lithium-Ionen-Zellen nach ihrer Leistungsfähigkeit untersucht. Es wurde festgestellt, dass sich Lithium-Titanat Zellen (LTO) für die Anwendung besonders gut eignen. Die entscheidenden Faktoren sind dabei die Leistungsfähigkeit der Zellen, sowohl in Lade- als auch in Entladerichtung, und die Einsatzmöglichkeit bei tiefen Temperaturen.

In Abhängigkeit von Randbedingungen des priorisierten Speichers wurde der in Abbildung 1 dargestellte Lösungsweg entwickelt. Die verwendeten LTO-Zellen haben eine Ladeschlussspannung von 2,8 V, sodass die Reihenschaltung von 5 Zellen eine Spannung von 14 V ergibt. Diese maximale Spannung liegt im erlaubten Betriebsbereich eines 12 V - Netzes, sodass die Booster-Batterie für einen Startvorgang direkt an das Bordnetz des Fahrzeugs angeschlossen werden kann. Da die PKW-Lichtmaschinen eine Spannung > 14 V haben, soll die Batterie des Boosters nach einem erfolgreichen Startvorgang mit einem Tiefsetzsteller geladen werden.

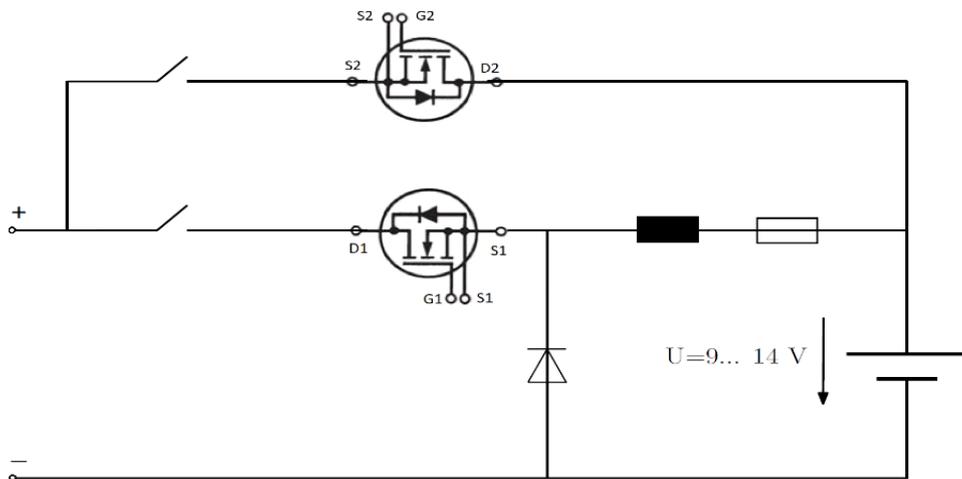
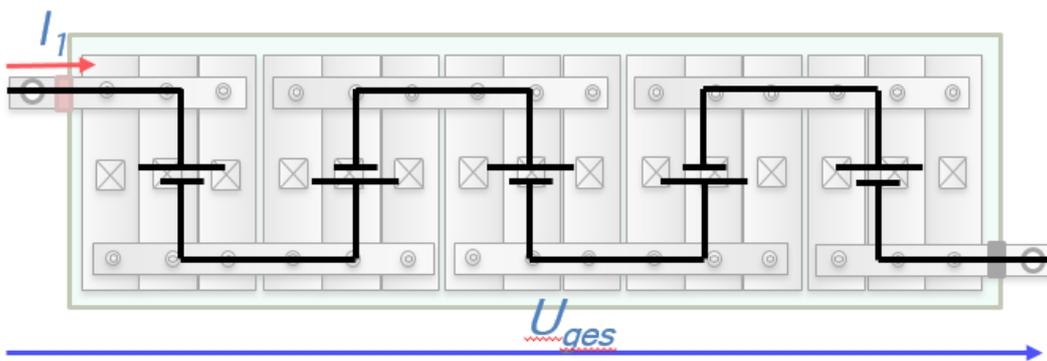


Abbildung 1: Vereinfachtes Ersatzschaltbild des Lösungskonzeptes, + und - stellen die Anschlüsse an die Bordnetzatterie und den Fahrzeug-Anlasser dar. Beim Startvorgang wird die Batterie des Boosters direkt an das Bordnetz angeschlossen und der Ladevorgang der Batterie wird durch einen Tiefsetzsteller realisiert.

Projektstand: Nach dem Aufbau des Labormusters wurden Starttests an verschiedenen Fahrzeugen durchgeführt. Dabei wurden zwei Modulkonfigurationen mit unterschiedlicher Form der Verbinder untersucht. In Abbildung 2 sind die betrachteten Schaltungstopologien a) 5S3P und b) 5S4P dargestellt. Obwohl die 5S4P -Konfiguration das Gewicht des Speichers um 0,75 kg erhöht, hat sich jedoch bezüglich der Leistung bzw. des thermischen Verhaltens diese als viel besser erwiesen.

a)



Projekt: Sicherheit von Lithium-Ionen-Batterien: Stabilität und Detektionsmöglichkeiten

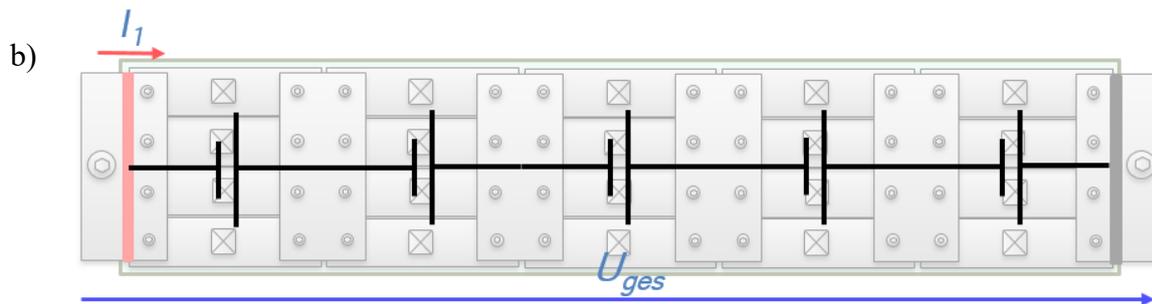


Abbildung 2: Untersuchten Modulkonfigurationen für den Speicher des Starthilfegeräts a) 5S3P und b) 5S4P mit unterschiedlicher Form der Verbinder

Die Komponenten wurden in ein als Koffer tragbares Gehäuse verbaut, und es wird aktuell die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems unter Variation der Temperatur und Startleistung untersucht. Nach einem erfolgreichen Startvorgang dauert die Ladedauer in den meisten Fällen weniger als 45 s. Dabei wird der Speicher mit einem konstanten Strom von 35 A geladen, bis die Ladeschlussspannung von 14 V erreicht wird. Um eine Robustheit und funktionale Sicherheit des Gesamtsystems zu erreichen, werden verschiedene Szenarien nachgebildet. Dabei soll die Bedienung des Gerätes möglichst einfach und sicher sein. Außerdem wird für den sicheren Betrieb der verbauten Lithium-Ionen-Batterie ein für solche Anwendung passendes BMS entwickelt.



Abbildung 3: Das Testfahrzeug und das erste Labormuster bei einer Versuchsdurchführung

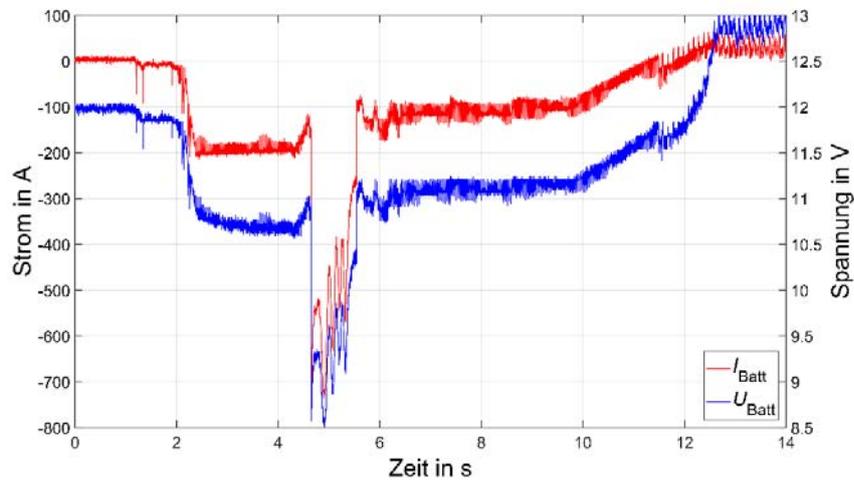


Abbildung 4: Strom- und Spannungsverläufe eines Kaltstartes bei einer Temperatur von -12°C



EUROPÄISCHE UNION
Europäischer Fonds für
regionale Entwicklung



Dieses Projekt wird mit Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung gefördert.

Industrieller Starthilfe-Booster

Innovatives Starthilfegerät für PKW nach Industriestandard, das ohne schwere Speicherbatterie Fahrzeuge in unbegrenzter Anzahl nacheinander startet.



Niedersachsen

www.europa-fuer-niedersachsen.de

Projekt: Sicherheit von Lithium-Ionen-Batterien: Stabilität und Detektionsmöglichkeiten

Literatur: [1] ADAC: <https://www.adac.de/infotestrat/unfall-schaeden-und-panne/pannenstatistik/>, abgerufen am 31.05.2017
[2] Seesener Beobachter: „Gelbe Engel rücken 294000-mal aus“, Druckerei und Verlag H. Hofmann GmbH & Co.KG, 13.02.2020

Projektpartner: Akkuteam Energietechnik GmbH

Projektlaufzeit: 01.03.2018 - 30.09.2020

Gefördert durch: NBank

Bearbeiter: Nury Orazov, M. Sc. (Tel.: 05321/3816-8065)
nury.orazov@tu-clausthal.de

Projektkoordinator: Dr.-Ing. Ralf Bengler (Tel.: 05321/3816-8067)
bengler@iee.tu-clausthal.de

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Beck (Tel.: 72-2570)
sekretariat@iee.tu-clausthal.de

IEE

Projektübersicht

Abteilungsleiter: Dr.-Ing. Jens zum Hingst
 Tel.: +49-5321-3816-8054
 E-Mail: zum.hingst@cutec.de

Abteilung Energiesystemintegration, CUTEC Forschungszentrum

Die Abteilung Energiesystemintegration führt anwendungsorientierte Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Ausgestaltung zukünftiger Energiesysteme durch. Diese Energiesysteme sind einerseits durch die Kopplung der Verbrauchssektoren Strom, Wärme, Verkehr und industrielle Prozesse gekennzeichnet. Andererseits stellen erneuerbare Energien, insbesondere Wind- und Solarenergie die Hauptenergiequellen dar, um eine Reduktion der Treibhausgasemissionen zu erreichen.

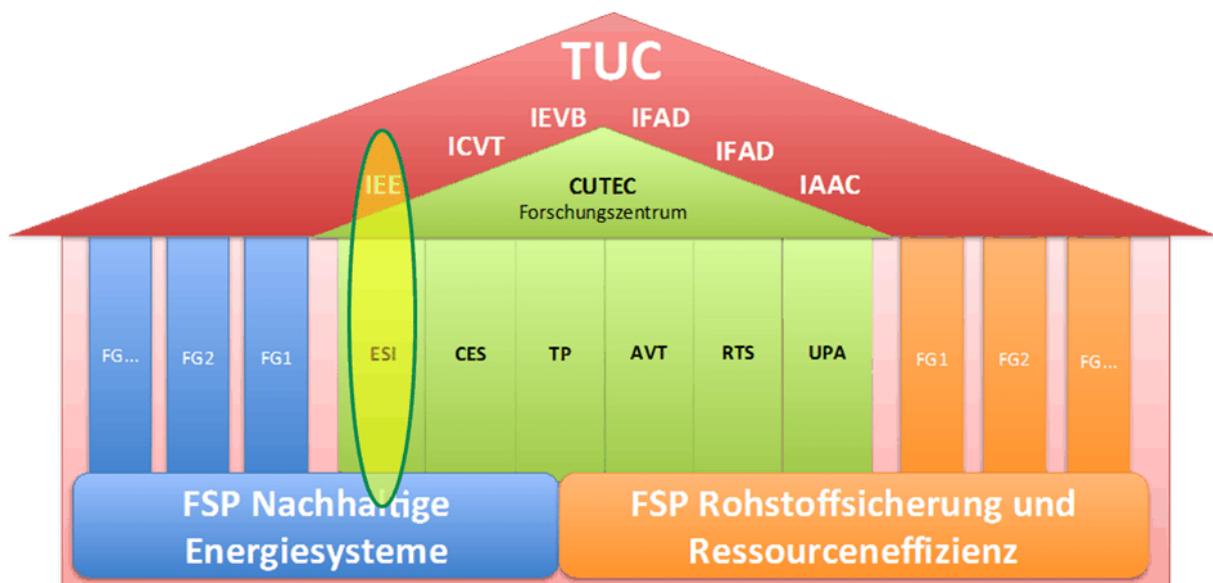


Abbildung 1: Zuordnung der Abteilungen des CUTEC Forschungszentrums zu den Partnerinstituten der TU Clausthal

Das CUTEC Forschungszentrum besteht aus 6 Fachabteilungen. Die Fachabteilungen des CUTEC Forschungszentrums arbeiten dabei eng mit den entsprechenden Instituten der TU Clausthal zusammen. Die Abteilung Energiesystemintegration ist vor diesem Hintergrund dem Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme zugeordnet (vergleiche Bild 1).

Neben der technischen Umsetzung dieser gekoppelten Energiesysteme in Form von Modellanlagen wie dem „Energiepark Clausthal“, werden in der Abteilung Energiesystemintegration theoretische Betrachtungen in Form von Energieszenarien durchgeführt, um die Anforderungen zukünftiger Energiesysteme zu analysieren und Lösungen zur Integration von Erzeugungsanlagen und Speichersystemen zu erarbeiten. Zur Bewertung der Nachhaltigkeit sowie zum Vergleich verschiedener Ausgestaltungen derartiger Energiesysteme erfolgt eine Bilanzierung der resultierenden Treibhausgasemissionen (über den gesamten Lebensweg).

Aktuelle Projekte:

- **Investitionen für eine kombinierte und vereinigte Technologiekonzipierung nachhaltiger Material- und Energiekreisläufe (CUTEK-I), Teilprojekt Energiesystemintegration**

Zukünftige Energiesysteme werden durch die Kopplung der Sektoren Strom, Wärme, Mobilität und industrielle Nutzung sowie den damit steigenden Bedarf an elektrischer Energie gekennzeichnet sein. Dabei steht die Nutzung regenerativer Energiequellen im Vordergrund.

Das Modellsystem Energie ist die Weiterentwicklung und Erweiterung des am CUTEK angesiedelten Energieparks Clausthal, an dem seit über zehn Jahren experimentelle Untersuchungen des Energiesystems durchgeführt werden.

Im Modellsystem Energie wird das Zusammenwirken von verschiedenen Erzeugungsanlagen und Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen in Kombination mit (Wärme-)Speichern untersucht. Im Rahmen des vorliegenden Investitionsprojektes sind hier verschiedene Erweiterungen insbesondere zur Speicherung elektrischer Energie (Batteriespeicher mit Umrichtersystem, Redox-Flow-Batterie) und zur Wandlung in chemische Energieträger (Elektrolyse) vorgesehen. Das System soll dann in der Lage sein, bedarfsgerecht Elektrizität und/oder Wärme zur Verfügung zu stellen bzw. zu nutzen oder zu speichern und dadurch Systemdienstleistungen zu erbringen. Durch die Nutzung der verschiedenen Energiespeicher können zeitversetzt auch Mobilitätsanforderungen und weitere Bedarfe befriedigt werden. Mit der Einbindung der Elektrolyse ist die Langfristspeicherung in chemische Energieträger möglich, die nach Speicherung für die unterschiedlichen Energiebedürfnisse herangezogen werden können oder Grundstoffe für anschließende Prozesstechnologien liefern. In den folgenden Schritten sollen zusätzliche innovative Verfahren und Umwandlungstechnologien erforscht, eingesetzt und angepasst werden, die zur Umsetzung der

Projektübersicht

vollständigen Energiewende notwendig werden.

Bearbeiterin: Dr. Siemers

Projektkoordinator: Dr. Zum Hingst

Projektleiter: Prof. Beck

- **Begleitforschung zum Gesamtsystem des Reallabors Emsland (Vorstudie Energie-region südliches Emsland)**

Durch die im Rahmen des Atomausstiegs beschlossene Stilllegung des Kernkraftwerkes Emsland im Jahre 2022 fällt in der Wirtschaftsregion südliches Emsland ein zentrales CO₂-frei stromerzeugendes Kraftwerk mit 1,3 GW weg. Dadurch fehlen in der Region rund 8 TWh elektrische Energie pro Jahr. Auch vor diesem Hintergrund beinhaltet der aktuelle Entwurf des Netzentwicklungsplans 2030 (Stand 2019) auf Basis der Vorschläge der TU Clausthal an die Bundesnetzagentur zwei HGÜ-Konverterstationen, die die Offshore-Windparks in der Nordsee über die DC-Leitungen NOR-3-2 und NOR-6-3 mit dem Verbundnetz auch räumlich in der Nähe des stillgelegten KKW Emsland verbinden, um die fehlende Energie als Ersatz für den Atomstrom am Netzknoten Hanekenfähr einzuspeisen. An diesem Netzknoten sind noch weitere Gas- und thermische Kraftwerke mit mehr als zwei GW angeschlossen, so dass der sehr leistungsstarke Netzknoten auch in Zukunft voll ausgelastet werden kann und ein Netzausbau an anderer Stelle entfällt. Die HGÜ-Konverterstationen haben eine Anschlussleistung von rd. 2 x 0,9 GW. Sie könnten bei rd. 4000 Volllaststunden der Offshore-Windparks 7,2 TWh (KKW Emsland erzeugt rd. 8 TWh/a) CO₂-frei einspeisen; nun allerdings dargebotsorientiert, d. h. fluktuierend und nicht wie bisher nachfrageorientiert. An diesem Unterschied, der kennzeichnend ist für die zweite Phase der Energiewende (in der ersten Phase konnten die vorhandenen Kraftwerke die Fluktuation noch ausgleichen) wird eine neue Generation von regenerativen Speicherkraftwerken benötigt, die einerseits weiterhin die für den Betrieb des 380 kV-AC-Übertragungsnetzes notwendigen Systemdienstleistungen (Regelleistung, Blindleistung, Momentanreserve, Kurzschlussleistung etc.) zur Verfügung stellen und andererseits eine effiziente Speicherfunktion mit einem flexiblen Teillastbetrieb im Entlade- und Lademodus garantieren. So könnte bei anwachsenden Fluktuationen auch die leistungsstärkere Residuallast (Netzlast minus HGÜ-Konverter-Einspeisung) von dem regenerativen Speicherkraftwerk geliefert werden, die auch das Netz stabilisiert.

Aus diesen Anforderungen an die notwendigen Speicherkraftwerke ergeben sich eine Reihe von technisch-wirtschaftlichen Problemen, die im Rahmen einer Vorstudie thematisiert werden, um zusammen mit der Industrie geeignete Lösungswege zu entwickeln und zu

erproben. Dadurch entsteht ein „Reallabor Südliches Emsland“. Ziel ist es, ein national und international sichtbares Großdemonstrationsprojekt zu schaffen, welches zeigt, wie ein Kernkraftwerk durch ein regeneratives Speicherkraftwerk ersetzt werden kann. Dies hätte auch zur Folge, dass die gesellschaftspolitischen Auswirkungen des deutschen Atomausstieges nicht gegen, sondern für die nachhaltige Entwicklung eines florierenden Wirtschaftsstandortes nutzbar sind.

Bearbeiter: Dr. Siemers

Projektkoordinator: Dr. Zum Hingst

Projektleiter: Prof. Beck

- **Biomasse-Integration zur Systemoptimierung in der Energieregion Hümmling mit ganzheitlichem, sektorübergreifendem Ansatz (BISON)**

Ziel ist die Konzeption und Demonstration eines vollständig regenerativen dezentralen Energiesystems für eine energieautarke Region (virtuelle Kraftwerksregion) unter besonderer Berücksichtigung der Systemintegration von Biomasse. Dies soll mittels eines ganzheitlichen sektorübergreifenden Ansatzes am konkreten Beispiel der „Energieregion Hümmling“ erfolgen.

Unter der Berücksichtigung eines möglichen Zielzustandes des Energiesystems mit nahezu 100 % erneuerbarer Energie in allen Sektoren und ausgehend vom heutigen „Ist-Zustand“ sollen also optimale Transformationspfade entwickelt und real beschrritten werden. Da die Region Hümmling schon heute auf Viertelstunden-Basis durch nahezu 100 % erneuerbaren Strom versorgt wird, kann davon ausgegangen werden, dass der Zielzustand im Laufe der nächsten 5 - 15 Jahre erreicht werden kann. Der Abschluss der Transformation wäre damit in der Region Hümmling also wesentlich früher abgeschlossen, als Deutschland oder die EU diesen Zielzustand erreichen werden.

Die in dieser Region frühzeitig gewonnenen Erkenntnisse, welche auf dem Weg zum „Zielzustand“, einem Energieversorgungssystem mit nahezu 100 % erneuerbarer Energien in allen Sektoren, durch den Realbetrieb neuer Technologien im industriellen Maßstab gesammelt werden, lassen sich auf andere Regionen übertragen und können somit wertvolle Informationen für die Ausgestaltung der deutschen und europäischen Energiewende liefern. In dem Modellprojekt sollen insbesondere die Chancen und Vorteile der Bioenergie innerhalb des „Zielzustandes“ aufgezeigt und identifiziert werden. Dabei können die verschiedenen, für Bioenergieanlagen spezifischen energiewirtschaftlichen Eigenschaften zu unterschiedlichen Zeitpunkten der Systemtransformation eingebracht werden. Während

Projektübersicht

Systemdienstleistungen schon heute benötigt werden, gewinnt der Ausgleich von mittel- bis langfristigen Schwankungen der Stromerzeugung im Zuge der fortschreitenden Energiewende zunehmend an Bedeutung – insbesondere, wenn fossilbefeuerte, regelbare Kraftwerke zunehmend durch dargebotsabhängige erneuerbare Energien abgelöst werden.

Innerhalb der „Energierregion Hümmling“ soll ein neues ganzheitliches Konzept für eine energieautarke Region konzipiert und demonstriert werden. Dies ist auch erforderlich, um die Zukunftsfähigkeit der Biogasanlagen zu sichern und das Konzept der Bioenergiedörfer weiterzuentwickeln.

Bearbeiter: Herr Piontek, M. Sc., Dr. Siemers

Projektkoordinator: Dr. Zum Hingst

Projektleiter: Dr. Zum Hingst

- **Innovative Akzeptanzforschung für nachhaltige Entwicklung durch Gamification (GAME) - Teilprojekt Energie**

Die gesellschaftliche Akzeptanz der Energie- und Ressourcenwende ist eine wesentliche Voraussetzung für deren Umsetzung. Das Forschungsvorhaben GAME hat das Ziel, mittels einer innovativen Verknüpfung bislang lediglich komplementär verfolgter Forschungsmethoden die Akzeptanz von Nachhaltigkeitszielen zu erforschen. Dazu wird ein Spieledesign verwendet, bei dem sich Nutzerinnen und Nutzer in einem „Haushalts-Nachhaltigkeits-Spiel“ befinden. Mittels spieltheoretischer Interaktionsmodelle werden bestimmte Handlungsoptionen als soziale Dilemmasituationen (etwa im Bereich der Investition in energieeffiziente Haushaltsgeräte oder der Beteiligung an Recyclingsystemen) rekonstruiert und in ökonomische Entscheidungsexperimente überführt.

Das Forschungsprojekt zielt darauf, Erkenntnisse über das nachhaltige Verhalten von Individuen in durch Zielkonflikte geprägten Situationen zu entwickeln, sie aber gleichzeitig durch geeignete Treatmentstrukturen und Lern- sowie Rückkopplungseffekte zu befähigen, diese Zielkonflikte aufzulösen und einen individuellen Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung zu leisten. Durch die Verknüpfung der bislang ausschließlich in der akademischen Verhaltensforschung angewandten Methoden der Experimentalökonomik mit den bislang vorwiegend im Unterhaltungsbereich eingesetzten Methoden der Gamification wird gleichzeitig ein Beitrag zur gesellschaftlichen Verbreitung der aktivierenden Nachhaltigkeitsforschung geleistet.

Im Arbeitspaket Energieeffizienz wird die quantitative Modellierung der niedersächsischen Energieszenarien 2050 für die Belange des Projektes aufbereitet und modifiziert. Konkret erfolgt eine regionale und sektorale Disaggregation der auf der Systemebene aufsetzenden

Szenarien. Die normativen Nachhaltigkeitsziele im Bereich Energieeffizienz auf der Systemebene werden auf diese Weise in konkrete Handlungsoptionen privater Haushalte bei Konsum- und Investitionsentscheidungen transformiert. Basierend auf den Entscheidungen der Spieler in einer Gruppe wird der Gesamtenergieverbrauch im entsprechenden Bereich berechnet. Mithilfe der Simulationssoftware 100Prosim wird der Verbrauch auf regionale oder Bundesebene hochgerechnet und mit den Zielen der niedersächsischen Energieszenarien verglichen. Hier wird angenommen, dass alle Personen in der Region das gleiche Verhalten wie die Gruppe haben. Die Ergebnisse liefern Informationen über Strommangel bzw. -überschuss im Vergleich zu prognostizierten Energiebereitstellung im Jahr 2050 und auch der benötigte Ausbau der PV- und Windanlagen, um diesen Verbrauch zu decken.

Bearbeiter: Dr. Hashemifarzad

Projektkoordinator: Dr. Zum Hingst

Projektleiter: Prof. Beck

- **Ein Beitrag zur elektrischen Energieübertragung im Nahfeld von Tesla-Spulen mit kapazitiver Kopplung**

Kontaktlose Energieübertragung gewinnt in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung. Obwohl sie immer noch ein Schwerpunkt vieler Forschungsgruppen ist, steigt die Anzahl der auf dem Markt verfügbaren Anwendungen bereits seit mehreren Jahren stetig an. So werden elektronische Geräte, die auf dieser Art der Energieübertragung basieren, sowohl in medizinischen implantierbaren Unterstützungssystemen als auch zum Laden von Mobiltelefonen und Elektrofahrzeugen benutzt, wo sie eine Erhöhung des Benutzerkomforts ermöglichen.

Die kontaktlose Energieübertragung kann in zwei grundlegende Verfahren, die Energieübertragung im Nahfeld sowie die Energieübertragung im Fernfeld, unterteilt werden. Bei der Übertragung im Fernfeld findet der Energietransfer durch elektromagnetische Wellen hoher Frequenzen statt. Diese Art der Energieübertragung hat immer den Nachteil, dass entweder eine Bündelung der Wellen zu einem Strahl nötig ist (z.B. Laser), oder alternativ der Wirkungsgrad der Energieübertragung nur sehr kleine Werte erreicht. Anders verhält es sich bei der Nahfeldkopplung. Hier wird die Energie direkt im magnetischen Feld (induktive Kopplung durch magnetische Induktion oder magnetische Resonanz) oder im elektrischen Feld (kapazitive Kopplung) übertragen. Eine Ausbreitung einer elektromagnetischen Welle findet idealerweise nicht statt. Da der Empfänger direkt durch das vom Sender erzeugte Feld gespeist wird, sind jedoch die überbrückbaren Distanzen, im Vergleich zur

Projektübersicht

Übertragung im Fernfeld, stark limitiert [1].

Ein Großteil dieser kontaktlosen Übertragungssysteme basiert auf der induktiven Nahfeldkopplung zwischen zwei oder mehreren Spulen. Die Anzahl der Veröffentlichungen zu alternativen Übertragungsverfahren im Nahfeld, wie zum Beispiel zur kapazitiven Energieübertragung, ist deutlich geringer. Obwohl am Beispiel der kapazitiven Kopplung bereits vereinzelt Anwendungen auf dem Markt verfügbar sind, haben diese aktuell eine eher untergeordnete Bedeutung [1].

Aus diesen Gründen ist das Ziel dieser Arbeit die kapazitive Energieübertragung auf ihre Skalierbarkeit hinsichtlich Größe der Übertragungsdistanz und Höhe der übertragbaren Leistung zu untersuchen. Dazu werden Tesla-Spulen unterschiedlicher Anordnungen verwendet und das elektromagnetische Feld jeder Anordnung analytisch und numerisch gerechnet und graphisch dargestellt. Zum Schluss werden diese Ergebnisse mit den Ergebnissen der experimentellen Messungen verglichen und analysiert.

Bearbeiter: Herr Tkalčec, M. Sc.

Projektkoordinator: Dr. Zum Hingst

Projektleiter: Prof. Beck

[1] Huwig, D.: Energieübertragung durch Nahfeldkopplung, November 2014
https://www.etatronix.de/wp-content/uploads/2014/11/Huwig_Energieuebertragung_durch_Nahfeldkopplung.pdf

- **Energie- und Wasserspeicher Harz (EWAZ): Entwicklung innovativer Ansätze zur Kopplung nachhaltiger Systemdienstleistungen von Hochwasserschutz, Ressourcensicherung und Energiespeicherung**

Aufgabenstellung dieses interdisziplinären Vorhabens, mit der systemischen Kopplung der Energie- und Wasserwirtschaft, ist es eine wissenschaftliche fundierte Konzeption für einen „Energie- und Wasserspeicher Harz“ zu entwickeln, der die zukünftigen überregionalen Anforderungen in den Zieldimensionen Energieerzeugung und -speicherung, Hochwasserschutz, Trinkwassergewinnung sowie der Niedrigwasserabgabe erfüllt. Hierzu werden verschiedene Maßnahmen systemisch erfasst und anschließend unter Kosten-Nutzen-Aspekten (auch aus volkswirtschaftlicher Sicht) miteinander verglichen. Da der Harz hydrologisch als großes Wasserüberschussgebiet zu betrachten ist und Klimawandelprojektionen zukünftig eine Erhöhung des dortigen mittleren jährlichen Wasserdargebots erwarten lassen, erscheint ein solcher integrativer Ansatz zwingend geboten.

Das Projekt wird im Rahmen der EFRE-Förderlinie Innovationsverbünde im Spezialisie-

rungsfeld Energiewirtschaft gefördert und hat eine Laufzeit von drei Jahren. Neben dem CUTEC Forschungszentrum sind forschungsseitig das Institut für Bergbau und das Institut für Wirtschaftswissenschaft der TU Clausthal, das Leichtweiß-Institut für Wasserbau der TU Braunschweig und die Fakultät für Bau-Wasser-Boden der Ostfalia Hochschule an dem Verbundprojekt beteiligt. Seitens der Industrie unterstützen die Harzwasserwerke GmbH und die Harz Energie GmbH & Co.KG als Kooperationspartner das Projekt.

Bearbeiterin: Hasan Yener Şişik, M. Eng.

Projektkoordinator: Dr. Zum Hingst

Projektleiter: Prof. Beck

4 Personelle Besetzung

4.1 Hauptamtliche Mitarbeiter des Instituts

Hochschullehrer: (Institutsdirektor)	Prof. Dr.-Ing. H.-P. Beck (Lehrstuhl Elektrische Energietechnik und Grundlagen der Elektrotechnik)
Abteilungsleiter	Prof. Dr.-Ing. M. Faulstich (Lehrstuhl Nichtelektrische Energiesysteme)
Wissenschaftlicher Direktor: (Abteilungsleiter)	Dr.-Ing. E.-A. Wehrmann (Austritt 09/19)
Honorarprofessor:	Prof. Dr. rer. nat. H. Wenzl, Prof. Baake, Prof. Buddenberg, Prof. Lülff, Prof. Maubach
Wiss. Assistent/Abteilungsleiter:	Dr.-Ing. D. Turschner Dr. Ing. R. Benger
Wissenschaftliche Mitarbeiter:	L. Beushausen, M. Sc. (Austritt 03/19) Dipl.-Ing. F. Deblon A.-K. Fries, M. Sc. H. Göken, M. Sc. J. Gollenstede, M. Sc. (Austritt 05/19) J. Grabow, M. Sc. A. Hashemifarzad, M. Sc. (Austritt 12/18) Ch. Klaas, B. Sc. Dipl.-Wirtsch.-Ing. K. Koring (Austritt 06/19) N. Kreth, M. Sc. G. Lin, M. Sc. Dipl.-Ing. A. Oberland N. Orazov, M. Sc.

S. Reineke, M. Sc.
Dipl.-Ing. V. Spielmann
Dipl.-Ing. E. Tchoupou Lando
M. Thiele, M. Eng.
K. Tkalcec, M. Sc. (Austritt 10/18)
Dipl.-Ing. A. Ufkes

Externe Doktoranden:

Becker, Andreas (Powersolution)
Bedrunka, Alexander (Hochschule Hannover)
Beushausen, Lennart
Fiebrich, Stefan (EFZN)
Gollenstede, Julian (Bosch)
Haslbeck, Matthias (OTH Regensburg)
Ranaweera, Chaminda (Cutec)
Schmicke, Christian (Hochschule Hannover)
Werther, Benjamin (Powersolution)

MitarbeiterInnen im Technischen
und Verwaltungsdienst (MTVD):
(Landes- und Drittmittelstellen)

Frau C. Schönemann
Frau Zugehör
Herr J.-N. Gebhardt
Herr F. Hesse (Auszubildender, ab 21.01.2019
Techn. Mitarbeiter, Austritt 12/19)
Herr M. Kirchner
Herr I. Lührig
Herr K. ter Smitten
Herr M. Buchholz (Auszubildender, Austritt
01/18)
Herr Gehrke (Auszubildender)
Herr M. Gieseler (Auszubildender, Austritt
01/18)
Herr C. Köthe (Auszubildender)
Herr K. Maib (Auszubildender)

Die Mitarbeiter des Institutes für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme



H.-P. Beck
(Direktor)

- 2570



M. Faulstich
(Lehrstuhl für
Umwelt-und
Energietechnik)



E.-A. Wehrmann
(ehem. Wiss. Di-
rektor)



D. Turschner
(Wiss. Assistent)

- 2592



R. Benger
(Wiss. Assistent)

- 05321/3816-
8067



S. Zugehör
(Sekretariat)

- 2299



L. Beushausen
(ehem. Mitarbei-
ter)



F. Deblon
(WiMa, System-
integration)

- 05321/3816-
8063



A.-K. Fries
(WiMa, Elektr.
Verteilnetze)

- 2593



H. Göken
(WiMa, System-
integration)

- 05321/3816-
8161



J. Gollenstede
(ehem. Mitarbeiter)



J. Grabow
(WiMa, System-
integration)

- 05321 3816-
8065



A. Hashemifarzad
(chem. Mitarbeiter)



Ch. Klaas
(WiMa, Virtuelle
Synchronmaschi-
ne)
- 3736

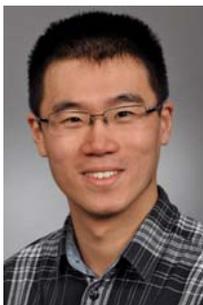


K. Koring
(chem. Mitarbei-
terin)



N. Kreth
(WiMa, Elektr.
Verteilnetze)

- 3597



G. Lin
(WiMa, Leis-
tungsmechatronik)

- 3728



A. Oberland
(WiMa, Batterie-
systeme)

- 05321/3816-
8063



N. Orazov
(WiMa, System-
integration)

- 05321/3816-
8065



S. Reineke
(WiMa, Leistungs-
mechatronik)

- 2929



V. Spielmann
(WiMa, Batterie-
systeme)

- 2594



M. Thiele
(WiMa, Speicher-
systeme)

- 05321/3816-
8161



E. Tchoupou Lando
(WiMa, Batterie-
systeme)

- 3819



K. Tkalcec
(WiMa, Energie-
systemanalyse)

- 05321/3816-
8101)



A. Ufkes
(WiMa, Netze)
- 2594



M. Buchholz
(ehem. Auszubildender)



J.-N. Gebhardt
(Elektronik)
- 3720



L. Gehrke
(Auszubildender)
- 2940



M. Gieseler
(ehem. Auszubildender)



F. Hesse
(Elektronik)
- 2572



M. Kirchner
(Elektronik)
- 3839



Ch. Köthe
(Auszubildender)
- 3839



I. Lührig
(Energietechnik)
- 5067



K. Maib
(Auszubildender)
- 2940



C. Schönemann
(Techn. Zeichnerin)
- 2177



K. ter Smitten
(Mechanik)
- 2571

4.2 Honorarprofessuren und Lehrbeauftragte

	Lehrgebiete:
Prof. Dr.-Ing. E. Baake (bis SS 2018)	Lehrgebiet Theorie Elektromagnetischer Felder
Dr.-Ing. R. Bengler	Batteriesystemtechnik und Brennstoffzellen Sicherheit und Zuverlässigkeit von Batteriesystemen
Prof. Dr.-Ing. Buddenberg	Fossile und regenerative Energieressourcen
Dipl.-Ing. H. Darrelmann (bis WS 2019/20)	Autonome Netze
Dr. rer. nat. W. Faber	Energiesysteme: Kapitelteil Kernbrennstoffe
Dr.-Ing. J. Heldt (bis WS 2018/19)	Sonderprobleme Elektrischer Maschinen
Dr. Ing. J. Jahn	Regenerative Elektrische Energietechnik
Prof. Dr.-Ing. J. Kühl (Ostfalia)	Regenerative Energiequellen
Prof. Dr.- Ing. G. Lulf	Optimierung und Instandhaltung von Elektroenergie- anlagen
Prof. Dr.-Ing. K.-D. Maubach (bis WS 2019/2020)	Elektrizitätswirtschaft
Dr.-Ing. S. Mecke	Grundstoffindustrie und Energiewende
Dr.-Ing. W. Siemers	Berechnung und Bewertung der Emissionen von nachhaltigen Energiesystemen und Energieprozessen
Dr.-Ing. J. zum Hingst	Elektrische Energieverteilung

4.3 Wissenschaftliche Hilfskräfte

Herr H. Al-Ashwal	Herr T. Jordan	Herr D. Reineke
Frau I. Brand	Herr F. Keßler	Herr S. Reineke
Frau M. Dreher	Frau H. Lange	Herr Rohde
Herr L. H. Fischer	Frau K. Lerch	Frau G. Simion
Herr P. Geißler	Frau A. Moeske	Frau J. Stael von Holstein
Herr R. Griemert	Herr N. Orazov	Frau H. Stelmaszyk
Herr H. Hanse	Herr. D. Piontek	Herr S. Stenger
Herr M. Hartleb	Herr Ch. Ranaweera	Herr J. Wecken
Herr A. Hebenbrock	Herr T. Reichrath	

4.4 Mitgliedschaften in wissenschaftlichen Vereinigungen und in den Selbstverwaltungsgremien der Universität

Prof. Dr.-Ing. H.-P. Beck	<ul style="list-style-type: none"> - DFG-Gutachter - Member of the International Scientific Committee for Electrical Power Quality and Utilisation - Ordentliches Mitglied der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft - Ordentliches Mitglied der acatech (Akademie für Technikwissenschaften e. V.), AG Energiewende - Mitglied der Initiative GET H2 (Wasserstoff-Reallabor) - Gutachter der Bayerischen Forschungsstiftung - Gutachter der Baden Württemberg Forschungsstiftung - Gutachter Landgericht Hamburg - Gutachter BMBF, Mobility to Grid - Gutachter BMWi, Energiewende - Mitherausgeber der Hütte Springer Verlag 2016/2019 - Vorstandsmitglied des CUTEC-Instituts (ab 01.08.2017) - Studiengangverantwortlicher En, EST - Koordinator TUC-Schwerpunkt Nachhaltige Energiesysteme
---------------------------	--

- Dr.-Ing. D. Turschner
- Mitglied der Jury bei “Jugend forscht”
 - Mitglied des internationalen Programmkomitees “International Conference on Renewable Energy and Power Quality ICREPQ
 - Mitglied im Prüfungsausschuss “Energie und Rohstoffe”
 - Mitglied der Kommission zum wissen. Fehlverhalten
- Matthias Kirchner
- Projekt “Restrukturierung elektrischer und elektronischer Werkstätten der TUC”

5 Links

- www.tu-clausthal.de
- www.iee.tu-clausthal.de
- www.est.tu-clausthal.de
- www.efzn.de

6 Anlagen

Die Anlagen sind in der angegebenen Reihenfolge eingebunden

- Anlage 1 Ressourcen des Institutes
- Anlage 2 Ausbau der Institutseinrichtungen im Berichtszeitraum

Ressourcen des Institutes

●	Verfügbare Gebäudefläche	1670 m ²
	-Bürofläche	826 m ²
	-Labor-/Prüffeldfläche	794 m ²
	-Büros und Labor (EST Goslar)	300 m ²
●	Mitarbeiter (Stand Ende 2019)	
	-wissenschaftliches Personal/Doktoranden	14
	-techn./Verwaltungsangestellte	9
	-Lehrbeauftragte	9
	-Wissenschaftliche Hilfskräfte	26
	-externe Doktoranden	6
		Σ 64
●	Prüffeld mit	
	- Maschinen-/Antriebslabor	
	- Energieelektroniklabor	
	- Hochspannungs-/Energieanlagenlabor	
	- Prüfstände für Walzwerks-, Bahn- /Schredder-Antriebe mit Umrichter	
	- Batterie-Prüfstand und Impedanzspektrometer	
	- Prüfstand für Windkraftanlagen zur Getriebeprüfung	
	- Schleudergrube	
	- Brennstoffzellen-Versuchseinrichtung, Elektolyseur	
●	Energiekonditionierungsanlage (VISMA/Mini, VISMA)	
●	Prozeßrechner-/Simulationstechniklabor: 5 Digitale Signalprozessor - Einschübe, CIP-Pool	
●	MATLAB-Simulink, SABER, PSPICE, PowerFactory, Integral	
●	Digitale Signalprozessoreinheiten (Einschübe der Firma dSpace)	
●	Labor elektrische Verteilnetze (Multi-VISMA), (EST)	
	- 2 Synchronmaschinen-/Asynchronmaschinensätze Netznachbildungen	
	- Nachbildung Umrichternetzeinspeisung	
●	Speicherlabor (EST)	

- Pufferbatterien VISMA \pm 350 V DC/50 Ah
- Schwungmassenspeicher
- Doppelschichtkondensator-Speicher
- Zell- und Modulprüfstände 0-100 V, 300 A
- Batterietestzentrum (EST)
 - Brandöfen (3x3x2,5m³, 1,5x1,5x2,5m³)
 - Leistungsprüfstand 1000 V, 1200 A, 1,2 MW
 - Klimacontainer (3x3x2,3m³)
 - Klimakammern bis 1000 li
 - Impedanzspektrometer
 - Wärmebildkameras
 - Gasmesssystem
 - Temperaturfeldmessung
 - Blei-Säure-Batterie 800V, 1000Ah
 - VISMA-Momentanreserve-Umrichter 400kVA
- Energiepark Clausthal (CUTEC)
- Labor für Energieumwandlung und -übertragung

Ausbau der Institutseinrichtungen im Berichtszeitraum

Anlage 2

Zur weiteren Komplettierung der Institutseinrichtungen wurden folgende Neuanschaffungen getätigt:

- Tesla- Elektroversuchsfahrzeug Modell S
- Schnelllade-DC-Tankstelle 50 kW mit Batteriecontainer
- Fassadenintegrierte Photovoltaikanlage 10 kW
- Earsy-Windmühle 10 kW
- Versuchsanlage zur Kurzunterbrechungskompensation in Niederspannungsnetzen
- Virtuelle Synchronmaschine (Multiterminal-VISMA-Verbund)
- Aktives Verteilnetz Labor mit 2 realen und 2 virtuellen Synchronmaschinen mit Leistungsnachbildungen
- Schnellladeeinrichtung (MoBat) für Pulsbetrieb (800 V, 1000 A, $f_p > 0,1$ Hz) im BTZ/IEE
- 400 kVA-VISMA-Umrichter mit Hochleistungsbatterie (50 kWh, 500 V, 500 A)