



TU Clausthal

Jahresbericht 2014/2015

des

Institutes für Elektrische Energietechnik
und Energiesysteme



Inhaltsverzeichnis

0	Vorwort	1
1	Lehre	3
1.1	Vorlesungen	3
1.2	Übungen, Praktika, Mentoring	6
1.3	Seminarvorträge	9
1.4	Studien-, Bachelor-Diplom- und Masterarbeiten	11
2	Veröffentlichungen, Dissertationen, Habilitationen	28
2.1	Zeitschriften- und Tagungsaufsätze, Patente /- anmeldungen	28
2.2	Vorträge / Seminare	33
2.3	Geförderte Forschungsvorhaben	34
2.4	Veranstaltungen, Exkursionen, Gastaufenthalte	37
3	Forschungsarbeiten + Forschungsgebiete des Institutes	40
3.1	Ausbau der Institutseinrichtungen	40
3.2	Projektblätter	40
4	Personelle Besetzung	167
4.1	Hauptamtliche Mitarbeiter des Instituts	167
4.2	Nebenamtlich tätige Hochschullehrer bzw. Lehrbeauftragte	173
4.3	Wissenschaftliche Hilfskräfte	173
4.4	Mitgliedschaften in wissenschaftlichen Vereinigungen und in den Selbstverwaltungsgremien der Universität	174
5	Links	175
6	Anlagen	175

0 Vorwort

Liebe Freunde und Förderer, Ehemalige und Mitarbeiter des Institutes,

seit dem Erscheinen des letzten Jahresdoppelberichtes 2012/2013 ist der Umstrukturierungsprozess der TU Clausthal fast abgeschlossen. Ziel war es, trotz der 10 % igen Budgetkürzung die Universität konkurrenzfähig für die Zukunft aufzustellen und zwar in Abstimmung mit unseren befreundeten Wettbewerbern in Hannover und Braunschweig.

Als ein Allheilmittel gegen die 10 % Budgetkürzung wurde zwar die NTH, wie im IEE-Bericht 2012/2013 beschrieben, durch Gesetz gegründet, aus politischen Gründen jedoch 5 Jahre später wieder abgeschafft. Als eine Begründung dafür wurde angegeben, dass der hohe Abstimmungsaufwand zwischen den drei Mitgliedsuniversitäten in keinem gesunden Verhältnis steht zu den Vorteilen des universitären Verbundes.

Als Ersatz hat sich die Politik die Erstellung eines Masterplanes für die nächsten 10 Jahre seitens der drei ehemaligen Mitgliedsuniversitäten ausgedacht. Es wurde zu diesem Zweck an der TU Clausthal ein Bottom-up-Prozess gestartet, der die Forschungsausrichtung neu bestimmen sollte. Der einjährige Prozess führte schließlich zu dem folgenden TUC-Vorschlägen für vier Forschungsschwerpunkte:

- Nachhaltige Energiesysteme/Speicherkraftwerke
- Rohstoff und Ressourceneffizienz
- Materialwissenschaft
- Offene cyberphysische-Systeme

Diese Schwerpunktthemen befinden sich derzeit im Abstimmungsprozess mit dem Ministerium. Sie sollen im Masterplan festgeschrieben werden und über Ziel- und Leistungsvereinbarungen umgesetzt werden. Die ausführende Forschungsstelle an der TUC ist dann das EFZ, welches eine noch vor dem EFZN, im Jahre 2005 eingerichtete senatsunmittelbare d. h. fakultätsübergreifende Forschungseinrichtung ist, die bis zum 31.12.2015 identisch war mit dem Energieforschungszentrum Niedersachsen (EFZN) in Goslar. Nachdem ab dem 01.01.2016 das EFZN vertragsgemäß nun eine gemeinsame Einrichtung der fünf Mitgliedsuniversitäten Braunschweig, Clausthal,

Hannover Göttingen Oldenburg ist, ist das EFZ wieder das Energieforschungszentrum der TUC mit einem Landesetat von rd. 1Mio Euro.

Inhaltlich ist das IEE über die Systemtechnik der Speicherkraftwerke (Stromspeicher für fluktuierende Einspeisung) an dem Vorhaben beteiligt. Es geht also um nachhaltige Speicherkraftwerke von 1 kW bis 1 GW mit unterschiedlichen Technologien (Untertagespeicher, Batteriespeicher, Brennstoffzellen, Elektrolyseure, H₂-Turbinen etc.). IEE-Schwerpunkte sind dabei die Umrichtertechnik mit Speichern zur Erbringung der Systemdienstleistung für das Netz mittels Speicherkraftwerken, die aus regenerativen Quellen und Backup-Kraftwerken gespeist werden. Vordringliche Aufgabe derartiger Speicherkraftwerke ist die Aufnahme von sonst abzuregelnder Leistung und die Stabilisierung und Führung des Netzes vor dem Hintergrund geringer werdender konventioneller Erzeugerleistung.

Dieses Thema korrespondiert mit den CUTEC/TUC-Mega-Thema "Power to X", welches die branchenübergreifende Kopplung von Grundstoffindustrie, Chemischer Industrie und Energieversorgung vorsieht. Es ist jetzt schon abzusehen, dass das IEE mit seinen drei Arbeitsgruppen Leistungmechatronik/Umrichter (Dr. Turschner), Aktive Verteilnetze (Dr. Wehrmann) und Batterie-Speichersysteme (Prof. Wenzl) auch in Zukunft bei der Wandlung unseres Energiesystem hin zur Nachhaltigkeit eine akzeptierte Rolle spielen kann und wird. Die TU Clausthal hat deshalb vor Jahren schon mit der Modernisierung des Gebäudes und den Infrastruktur-Einrichtungen begonnen. Wenn Sie die Fassade des Institutsgebäudes auf der ersten Seite des letzten Jahrsberichtes mit der des vorliegenden Berichtes vergleichen, werden Sie die Aussage bestätigt finden. Auch der Nachfolger des Unterzeichnenden soll sich schließlich wohlfühlen. Wann er kommt ist allerdings noch nicht klar, weil die Stelle bis dato noch nicht ausgeschrieben wurde.

Glück auf!

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

1 Lehre

1.1 Vorlesungen

Die Studentenzahlen haben sich auch in den zurückliegenden zwei Jahren auf hohem Niveau stabilisiert. Im Mittel gibt es am IEE pro Jahr rd. 1000 Studierende im Grundstudium und 1000 im Fachstudium. Die relativ hohe Zahl der fortgeschrittenen Studierenden resultiert aus den vielen Wahlpflichtfächern, die vom haupt- und nebenamtlichen Lehrpersonal angeboten werden. Insbesondere den Lehrbeauftragten und den fünf Honorarprofessoren des IEE sei an dieser Stelle für Ihren Einsatz gedankt. Ein wissenschaftlicher Studiengang Energietechnologien (BA) und Energiesystemtechnik, wie der am IEE, wäre ohne diese Expertise nicht einschlägig. Ich hoffe, dass dies auch die Gutachter der bevorstehenden Akkreditierung dieser beiden Studiengänge so sehen, wenn Sie Mitte dieses Jahres ihr Urteil über die Fortsetzung dieses Curriculums entscheiden werden.

Darüber hinaus steht derzeit auch die Evaluation der Energieforschung der TUC/EFZ, des EFZN und der CUTEC an. Der Selbstbericht dieser drei Niedersächsischen Forschungseinrichtungen wird derzeit erstellt, wobei auch das IEE seine Beiträge einbringt. Auch dieses Ergebnis wird im laufenden Jahr vorgelegt und hoffentlich unsere Arbeit in einem angemessenen Licht darstellen, zumal die Auswirkungen auf die Lehre essentiell sein werden da zusätzliche Forschungsmittel davon abhängen.

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

- Grundlagen der Elektrotechnik
- Energiesysteme
- Elektrizitätswirtschaft
- Regenerative Energiequellen

Sie tragen 3/4 der Studierendenzahlen. Ähnliches gilt für die dazugehörigen Übungen. Was die Promotionen angeht gibt es einen Stau im Jahr 2015/2016, was dazu führt, dass in den kommenden Jahren im Schnitt pro Jahr 4 Promotionsprüfungen anstehen. Dies ist erfreulich, wenn doch der Schnitt an der TUC bei einer Promotion pro Professor und Jahr liegt. Der Stau sollte sich, wegen des in absehbarer Zeit bevorstehenden Wechsels in der Institutsleitung baldmöglichst auflösen, um Unregelmäßigkeiten bei der Übergabe der Institutsleitungsfunktion zu vermeiden.

		2014	2015
Beck/Wehrmann	Grundlagen der Elektrotechnik I/II (W 8800 / S 8801) Elektrotechnik für Ingenieure I/II (W8800 / S 8801)	1353	1215
Beck/Turschner	Elektrische Energietechnik (S 8803)	53	72
Beck/Turschner	Regelung Elektrischer Antriebe (W 8808)	35	27
Beck	Energieelektronik (W 8811)	39	55
Beck/Turschner u. a.	Energiesysteme (W 8804)	104	120
Heldt	Sonderprobleme Elektrischer Maschinen (W 8805)	18	30
Beck/Wehrmann	Elektrische Energieverteilung (W 8812)	35	55
Beck/Wehrmann	Elektrische Energieerzeugung (S 8815)	30	40
Beck/Turschner	Leistungmechatronische Systeme (S 8826)	50	-
Turschner	Leistungmechatronische Regelungssysteme	-	-
Turschner/Jahn (ab WS 2013/14)	Regenerative Elektrische Energietechnik (W 8818)	40	45
Maubach	Elektrizitätswirtschaft (S 8819)	111	130
Baake	Theorie Elektromagnetischer Felder (S 8817)	33	40
Wenzl	Batteriesystemtechnik und Brennstoffzellen (W 8816)	28	40
Faulstich	Dyn. Systeme in Natur, Technik und Gesellschaft (S 8825)	58	61
Lülf	Optimierung und Instandhaltung von Elektroenergie- anlagen (S 8828)	34	-
Kühl	Regenerative Energiequellen (W 8830)	50	80
Beck/ Darrelmann	Autonome Netze (W 8832)	12	27
Buddenberg	Fossile und regenerative Energieressourcen (W 8831)	45	60
Sourkouni-Argi- rusi	Materialien für die Elektrotechnik und die Elektrische Energietechnik (S 8833)	-	-
	Summe:	2128	2097

Insgesamt wurden im Verlauf dieser zwei Jahre 2297 Bachelor- und Masterprüfungen von den prüfungsberechtigten Hochschullehrern bzw. Lehrbeauftragten des Institutes abgenommen. Alle Prüfungen wurden, der guten Tradition der TUC entsprechend, mündlich bzw. halbschriftlich (Grundlagen der Elektrotechnik I, II, mit Praktikum 1494 Teilnehmer) durchgeführt. Mündliche Prüfungen sind in Gegensatz zu Klausuren auch Lehrveranstaltungen, weil eine Interaktion und Kommunikation zwischen Prüfer und Prüfling stattfindet, die darüber hinaus auch eher der Situation der späteren Berufswelt entspricht. Da diese Prüfungsform des reinen Gespräches aus Kapazitätsgründen nicht immer vollständig eingehalten werden kann, gibt es im Praktikum „Grundlagen der Elektrotechnik I, II“ nach wie vor ein mündliches Testat mit einem vorgeschalteten schriftlichen Fragenteil.

Im übrigen könnten die unterschiedlichen Dipl. und BA/MA-Prüfungsordnungen der im Folgenden aufgelisteten Studiengängen mit einer Klausur kaum eingehalten werden, weil nicht individuell auf den Prüfungsumfang (z. B. E-Technik I, E-Technik II und deren Kombinationen mit oder ohne Praktikum) eingegangen werden kann. Es müßten mehrere verschiedene Klausuren angeboten werden, was den Prüfungsaufwand weiter steigern würde. Die Praxis zeigt jedoch, dass der Aufwand für diese Vorgehensweise auf Dauer zu hoch ist. Es wird deshalb angestrebt für alle u. a. Studiengänge ein Modul Grundlagen der E-Technik mit ca. 12 ECT (8 SWS) einzuführen. Inwieweit dies gelingt bleibt offen.

Die StudentInnen belegten die angebotenen Kurse in Grundlagen der Elektrotechnik I, II im Rahmen folgender Studiengänge der Fakultäten I, II und III:

- Energie und Rohstoffe
- Energietechnologien
- Maschinenbau
- Materialwissenschaft und Werkstofftechnik
- Technische Informatik
- Verfahrenstechnik/Chemieingenieurwesen
- Wirtschaftsingenieurwesen

Im Rahmen des Fachstudiums werden die weiteren Lehrangebote des IEE derzeit folgenden Studiengängen als Pflicht-, Wahlpflicht- und Schwerpunktfach zugeordnet :

- Maschinenbau, Studienrichtung “Mechatronik”
- Energietechnologien (BA)
- Energiesystemtechnik (MA/FH-Absolventen)
- Wirtschaftsingenieurwesen, Studienrichtung Rohstoffe und Energie
- Physikalische Technologien, Schwerpunkt Energiesysteme

Der Fachbereich MVC hat entsprechend den Empfehlungen der Wissenschaftlichen Kommission des Landes, die bisher erfolgreiche Studienrichtung Elektrotechnik und Systemautomatisierung in Mechatronik umgestellt und durch zwei neue Professuren Regelungstechnik + Mechatronik und Automatisierungstechnik + Elektrotechnik verstärkt.

Für Mechatronikanlagen größerer Leistung (> 10 kW) haben wir den Begriff "Leistungsmechatronik" geprägt und zwar in Analogie zur Elektronik/Leistungselektronik. Leistungsmechatronik enthält als Kerngebiete die Leistungselektronik, Antriebstechnik, Regelungstechnik und Technische Informatik; sie ist damit ein Gebiet der (elektrischen) Energiesystemtechnik. Sie unterscheidet sich von der bisherigen Antriebstechnik durch die noch weiter ausgedehnten Gebiete: Modellbildung, Simulation und Optimierung. So ist z. B., wie in einem laufenden Forschungsprojekt, auch der Walzspalt inklusive der elektrischen Antriebstechnik teil des Gesamtmodells, weil nur durch diese Weiterfassung der Systemgrenzen die Selbsterregungseffekte im Walzgerüst und deren eingebettete Abhilfemaßnahme durch entsprechend geregelte elektrische Antriebe als aktive Schwingungsdämpfer beherrscht werden können. Zwei Doktorarbeiten zu diesen Thema erscheinen im Jahr 2016.

Neben der Leistungsmechatronik gehören die regenerative dezentrale elektrische Energietechnik und die Speichersysteme mit Elektroenergie-Zugang zu den Arbeitsgebieten des IEE und zwar in Forschung und Lehre, wie es an einer Technischen Universität sein sollte. Das gesamte Arbeitsgebiet wird unter dem Begriff (elektrische) Energiesystemtechnik als Teil des grundständigen, namensgleichen Ma-Studienganges zusammengefasst.

1.2 Übungen, Praktika, Mentoring

Im Berichtszeitraum wurden folgende Übungen und Praktika durchgeführt. Die Zahlen geben jeweils die geschätzte Teilnehmerzahl an.

		2014	2015
Große Übung	Grundlagen der Elektrotechnik I/II (Wehrmann/Spielmann)	1353	1215
Tutorien	Grundlagen der Elektrotechnik I/II (Wehrmann/Oberland)	850	354
Praktika	Grundlagen der Elektrotechnik I/II (Wehrmann/Stubbe/Ufkes/wiss. Hilfskräfte)	847	647

		2014	2015
Übung	Elektrische Energietechnik (Turschner/Werther/Fiebrich)	53	72
Übung	Regelung Elektrischer Antriebe (Turschner)	35	27
Übung	Leistungsmechatronische Systeme (Turschner)	50	-
Übung	Leistungsmechatronische Regelungssysteme (Turschner)	-	-
Übung	Energieelektronik (Bentaleb/Schwake)	39	55
Übung	Elektrische Energieerzeugung (Wehrmann/Umbach/Werther)	30	40
Praktikum	Energieelektronik (Bentaleb)	39	-
Grundpraktikum	im Hauptstudium (Maschinenbau) (Chen/Turschner/Pöschke/Tchoupou Lando)	22	9
Praktikum	Elektrische Energiespeicher (Benger/Oberland)	12	-
Praktikum	Regenerative Elektrische Energietechnik (Heyne/Ufkes)	40	-
Übung	Regenerative Elektrische Energietechnik (Turschner)	40	45
Übung	Elektrische Energieverteilung (Schnieder/Ufkes)	35	55
Übung	Batteriesystemetechnik und Brennstoffzellen (Wenzl)	28	40
Grundpraktikum	Energiesystemtechnik (Turschner/Chen/Pöschke/Tchoupou Lando)	17	32
Praktikum	Elektrische Antriebe I (Chen/Turschner/Pöschke/Tchoupou Lando)	16	24
Praktikum	Hochspannungstechnik (Wehrmann)	11	-

		2014	2015
Übung	Theorie der elektromagnetischen Felder (Baake)	33	40
Übung	Sonderprobleme elektrischer Maschinen (Heldt)	18	30
Übung	Dyn. Systeme in Natur, Technik und Gesellschaft (Faulstich)	58	61
Übung	Optimierung und Instandhaltung von Elektroenergieanlagen (Lülf)	34	-
Übung	Regenerative Energiequellen (Kühl)	50	80
Übung	Autonome Netze (Darrelmann)	12	27
Übung	Fossile und regenerative Energieressourcen (Buddenberg)	45	60
Übung	Elektrizitätswirtschaft (Neumann/Koring)	111	130
Übung	Materialien für die Elektrotechnik und die Elektrische Energietechnik (Sourkouni-Argirusi)	-	-
Gemeinschafts- seminar	Gemeinschaftsseminar zur Elektrischen Energietechnik und Energiesystemtechnik (Koring/Schnieder)	24	23
	Summe:	3902	3066

1.3 Seminarvorträge

2014

Bohnenberger, Mario	Verteilnetze als zukünftige Erbringer der Systemdienstleistungen
Boßmeyer, Marcel	Auswirkungen der Witterung auf Freileitungen
Lerch, Kathrin	Supraleitung in der Energieversorgung
Pohl, Richard	Wasserstoff- und Biogaseinspeisung in Erdgasnetze
Grodde, Florian	Aktuelle Antriebskonzepte von Elektrofahrzeugen
Weiß, Jennifer	Entwicklung und Technologie der Ladeinfrastruktur von Elektrofahrzeugen
Waidelich, Alan C. C.	Der Bleiakkumulator - Aufbau, Funktionsweise, Alterungsmechanismen
Muhsman, S.	Kleinwindenergieanlagen
Ditgens, P.	Die Marktprämie - ein Modell zur Integration erneuerbarer Energien?
Musial, S.	Kostentreiber der Energiewende
Panning, K.	Wie ist die Kostenstruktur eines Verteilnetzbetreibers und wie würden die Stromrechnungen aussehen, wenn er kostenorientiert abrechnen würde?
Wohlers Soto, C.	Wasserregale der Neuzeit am Beispiel der Kraftwerke Oberhasli
van Wingerden, B.	Energiegewinnung durch Nutzung des Kernzerfalls
Busche, L.	Unkonventionelle Verbrennungskraftwerke
Seikel, A.	Der Magnetohydrodynamischer Generator (MHD-Generator)
Er, D.	Spannungshaltung in Niederspannungsverteilsnetzen
Rohde, H.	Inselnetzerkennungsverfahren in elektrischen Netzen
Walte, A.	Regelung elektrischer Netze
Nack, Ch.	Konzepte zur Eigenverbrauchsoptimierung bei Mietobjekten

Fangmeier, J.	Der GOELRO Plan - Ein Überblick über die Sowjetische Energiewende von 1920
Fritz, A.	Energy-Only-Markt 2.0 statt Kapazitätsmechanismen
Bröckel, M.	Stand der Technik von Stromspeichertechnologien zur Speicherung regenerativer Energie
Müller, N.-H.	Power-to-Heat
Ebben, K.	Power-to-Gas
Berger, J.	Stoffliche Energiespeicher und flexible Produktionsprozesse zur Speicherung elektrischer Energie

2015

Hofheinz, J.	Zink-Luft-Akkumulator
Jahn, L.	Sicherheitseinrichtungen für Lithium-Batterien
Reineke, St.	Verschiedene Materialkonfigurationen der Aktivmaterialien von Lithium-Batterien und deren Einfluss auf die technischen Eigenschaften dieser
Hoppe, J.	Elektromobile Nutzfahrzeuge
Quillfeldt, F.	Batteriewechselkonzepte für Elektrofahrzeuge
Dieckmann, Lukas	Betriebsstrategien für Biogasanlagen
Basse, Jannik	Meereskraftwerke: Welche Möglichkeiten gibt es, Energie aus den Meeren zu gewinnen?
von Hacht, Lina-Marie	Windkraft - Alternative Konzepte zur Stromerzeugung
Simons, Ronia	Vermiedene Netznutzungsentgelte im Zuge der Energiewende
Mayerhofer, Ragnar	Der intelligente Haushalt - Heizungs- und Laststeuerung per App
Jansen, Marcel	Energiemanagementsysteme im Haushalts- und Gewerbebereich
Lux, Lenard	Zukunft der 48Volt-Bordnetz-Batterie für Autos
Hartleb, Michael	Elektrifizierung Afrikas

Klink, Jacob	Wärmebereitstellung im Haushalt
Stenger, Simon	Schaltertechnologien von regelbaren (Ortsnetz-) Transformatoren
Borchert, Jan-Eric	Ermittlung von Kennzahlen zur Netzplanung in Niederspannungsverteilsystemen
Mordhorst, Marcel	Systemdienstleistungen
Meyfarth, Anna	Vorstellung Vergleich verschiedener Schutz- und Selektivitätskonzepte im Mittel- und Niederspannungsverteilsystem
Menze, Nico	Bedeutung der Netzfrequenz
Depner, Tobias	Elektromobilität im Industrieinsatz
Piontek, Daniel	Elektromobilität: Stand der Technik und Herausforderungen bei der Komponentenentwicklung für die 48 V-Bordnetze
Bockwinkel, Daniel	PV-Wechselrichter: innovative Schaltkonzepte
Hainke, Britta	Technologien- und Preisentwicklung von Lithium-Batterien
Mürmann, Laura	Der Sayano-Shushenskaya Störfall
Bischoff, Florian	Power-to-Heat

1.4 Studien-, Bachelor-, Diplom- und Masterarbeiten

Studien- und Bachelorarbeiten

2014

Gollenstede, Julian	Inbetriebnahme und Untersuchungen an einem pulsweitenmodulierten VISMA-Wechselrichter mit Spannungssollgrößenmodell Betreuer: Dr. Turschner, Dr. Wehrmann
---------------------	--

Schütte, Tobias	Konzept und Demonstrator für eine zukunftsfähige Bordnetzversorgung Betreuer: Dr. Turschner, Dr. Wehrmann
Schäfer, Simon F.	Einsatzmöglichkeiten von Batterien für Regelleistungserbringung Betreuer: Prof. Wenzl, Dr. Turschner
Strenge, Tobias	Konzepte des Netzschutzes unter Berücksichtigung vermehrter dezentraler Einspeisung Betreuer: Dr. Wehrmann, Dr. Turschner, Dipl.-Ing. Umbach
Ebel, Wladimir	Energieeinsparung beim Schnellstart eines Verbrennungsmotors Betreuer: Prof. Wenzl
Stücher, Johannes	Einsatz von Spitzenlastkraftwerken zur Integration erneuerbarer Energien Betreuer: Prof. Wenzl, Dr. Wehrmann
Bayhan, Ebru	Development, Installation and Commissioning of Small Scale Model of a High Voltage Ride Through (HVRT) Test Equipment Betreuer: Dr. Turschner, Dr. Wehrmann
Stork, Sebastian	Auswirkung des Flexibilisierung von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen durch Wärmespeicher und elektrische Zuheizung auf Umfang und zeitliche Verteilung des Gasbedarfs Betreuer: Prof. Müller-Kirchenbauer (ITE), Prof. Wenzl
Steinberger, Thomas	Entwicklung einer Betriebsstrategie zur Versorgung eines 48 Volt-Inselbordnetzes im Kraftfahrzeug Betreuer: Prof. Wenzl, Dr. Turschner
Schumacher, Jannik	Entwicklung eines Modells zur Simulation verschiedener Kenngrößen einer Zink-Luft-Batterie Betreuer: Prof. Wenzl, Dr. Turschner

Göbel, Martin A.	Untersuchung des vermiedenen Netzausbaus bei dezentraler Einspeisung im Niederspannungsnetz durch den Einsatz von rONT Betreuer: Dr. Wehrmann, Dipl.-Ing. Umbach
Huang, Zhao	Wärmebilanz einer Li-Ionen-Batterie für elektrische Fahrzeuge, Teil 1, Wärmeleitung Betreuer: Prof. Wenzl/Dr. Benger
Sun, Cheng	Berechnung des Wirkungsgrad-Kennfeldes eines Asynchronmaschinen-Modells in Matlab/Simulink Betreuer: Dr. Turschner
Fritz, Alexander	Nutzung von Gas- und Wärmenetzen zur Integration erneuerbarer Energiequellen Betreuer: Prof. Wenzl, Prof. Müller-Kirchenbauer (ITE)
Gräfenstein, Artjom	Netzausbau zur Integration erneuerbarer Energiequellen Betreuer: Prof. Wenzl
Dombrowski, Imke	Hardwarekonzept zur Steuerung und Regelung eines SOFC-Brennstoffzellen-Systems Betreuer: Dr. Turschner
Dombrowski, Imke	Softwarekonzept zur Steuerung und Regelung eines SOFC-Brennstoffzellen-Systems Betreuer: Dr. Turschner
Khalatbari, Mehrdad	Konzept für ein Plusenergiegebäude - Wärme und Strom Betreuer: Prof. Kühl, Dr. Wehrmann
Ketels, Hauke	Experimentelle Grundlagenanalyse und Simulation einer OVRT Testeinrichtung basierend auf dem Ferranti-Effekt Betreuer: Dr. Turschner, Dr. Wehrmann, Dipl.-Ing. Meggers (DNV GL)

Schramm, Benjamin	Analyse, Quellcodedokumentation und Programmierung eines Mikrocontrollers, als Steuerung eines mobilen bidirektionalen Ladegerätes, am Beispiel des Mikrocontrollers Cypress Cy829466 Betreuer: Dr. Turschner, Dr. Wehrmann, Dipl.-Ing. Schwake
Mackensen, Daniel	Regelung einer fremderregten Gleichstrommaschine mit Matlab Simulink und dSpace Betreuer: Dr. Turschner, Dr. Bauer (Inst. f. Elektr. Informationstechnik)
Schenk, Marius	Auslegung von Inselsystemen für die Elektrifizierung von Dörfern un Tansania Betreuer: Dr. Wehrmann, Dr. Turschner, Dipl.-Ing. Umbach, Dipl.-Ing. Peterschmidt (Inensus), Dipl.-Ing. Peters (Inensus)
Malobabic, Kerstin	Entwicklung eines Verfahrens zur Ermittlung des maximalen Energieinhalts der Triebstrangschwingung einer Windkraftanlage bei dynamischer Windlast Betreuer: Dr. Turschner, Dipl.-Ing. Ell, Dipl.-Ing. Stubbe
Gebbe, Markus	Potentiale zur Nutzung überschüssiger elektrischer Energie zur Wärmebereitstellung Betreuer: Prof. Wenzl, Dr. Wehrmann
Kesten-Kühne, Janis	A Feasibility Study Of Smart Grid Appliances Using The Example Of Smart Grid Refrigerators Betreuer: Dr. Wehrmann
Yanze Mbiaffeu, Steve Brice	Konstruktion einer Solarthermie Anlage zur Vorheizung des Badewassers im Spiegelbad Wildemann Betreuer: Prof. Kühl (Ostfalia Hochschule)
Janssen, Dirk	Untersuchung zur Auslegung eines Laststufenschalters für einen 50 kVA Transformator Betreuer: Dr. Wehrmann, Dr. Turschner, Dipl.-Ing. Schnieder, Dipl.-Ing. Werther

2015

- Creydt, Martin Neugestaltung der Demonstrationstafeln für den Versuch Schutzmaßnahmen an der TU Clausthal
Betreuer: Dr. Wehrmann, Dipl.-Ing. Stubbe
- Ebert, Kilian Ermittlung der Energieeffizienz einer bestehenden BHKW-Anlage mit Dampferzeugung
Betreuer: Prof. Wenzl, Prof. Weber (Inst. f. Energieverfahrentechnik u. Brennstofftechnik)
- Lamert, Andreas Untersuchung der möglichen Wechselwirkungen dezentraler Erzeugungsanlagen mit $\cos \varphi$ (P)-Kennlinie zur Spannungsstützung mit regelbaren Ortsnetztransformatoren
Betreuer: Dr. Wehrmann, Dr. Turschner
- Büger, Christof Entwicklung einer Anwendung für Leichtbauroboter zum partiellen Schleifen von Funktionsflächen in Presswerkzeugen
Betreuer: Dr. Turschner, Dr. Wehrmann, Dr. Hessling (Daimler AG)
- Berger, Alexej Bewertung und Optimierung von Alterungsprozessen mediengetrennter, piezoresistiver Druckmesszellen und Druckaufnehmer
Betreuer: Dr. Turschner, Dr. Wehrmann, Dipl.-Ing. Hartung (Jumbo)
- Koch, Sabine Toni Drehzahlsteuerung einer Zweistufigen Pumpenanlage
Betreuer: Dr. Turschner, Dipl.-Ing. Liebming (IVG Caverns)
- Hahn, Matthias Entwurf eines DC-Schalterkonzepts zur direkten Kopplung von PV-Anlage mit Batteriespeicher im kV-Bereich
Betreuer: Dr. Turschner, Dipl.-Ing. Pashyn (Belectric Solar-kraftwerke)
- Klarmann, Mareike Konzeption und Ausgestaltung eines Praktikumsversuchs zum Energiesystem Windkraftanlage
Betreuer: Dr. Turschner, Dr. Vetter (IPP)

- George, Jan Frederick Szenariobasierter Wirtschaftlichkeitsvergleich der Stromgestehungskosten von Anlagenkonzepten zur Stromgenerierung anhand des Life Cycle Costing für ein Inselnetz in Afrika
Betreuer: Prof. Wulf (WiWi), Dr. Turschner
- Dong, Dan Analyse und Simulation eines Mehrmassenschwingers mit unterschiedlichen Parametersätzen
Betreuer: Dr. Turschner
- Moeske, Anna I. A. Abschätzung von Modul- und Speichergröße eines BHKW bei gegebenem Wärme- und Stromlastgang
Betreuer: Dr. Wehrmann, Dr. Turschner
- Ehlers, Tiara Technisch und wirtschaftlicher Vergleich konventioneller Netzausbaumaßnahmen (Leistungsausbau) mit dem Einsatz regelbarer Ortsnetztransformatoren
Betreuer: Dr. Wehrmann, Dr. Turschner, Dipl.-Ing. Schnieder
- Bünning, Annika Energie- und Medienanalyse der DKTL-Anlagen als Instrument des Energiemanagementsystems zur effizienzsteigernden Anlagenoptimierung
Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Zimmermann (Inst. für Wirtschaftswissenschaft)
- Heinen, Andreas Nutzung elektrischer Heizsysteme in privaten Haushalten in Verbindung mit Einspeisung aus PV-Anlagen
Betreuer: Prof. Beck, Prof. Wenzl, Dipl.-Ing. Schild
- Bohnenberger, Mario Anforderungen an den Kraftwerkspark bei installierter EE-Leistung
Betreuer: Prof. Wenzl, Dipl.-Ing. Schild
- Nordhausen, Marlene Energiekonzept einer Plusenergie-Wohnsiedlung auf Basis regenerativer Wärme- und Stromversorgung
Betreuer: Dr. Wehrmann, Prof. Kühl (Ostfalia Hochschule)

Ivers, Monique	Untersuchung von Generatorkonzepten auf ihre Eignung für den Einsatz in Pumpspeicherkraftwerken zur Erbringung von Systemdienstleistungen Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Beck
Koch, Eike Rafael	Modellierung elektrischer Maschinen mit Permanenterregung Betreuer: Prof. Beck, Dr. Turschner, Dipl.-Ing. Stubbe
Strothe, Alexander	Analyse der Auswirkungen eines geänderten Leistungsfaktors von Windparks auf Blindleistungsbedarf, Spannungshaltung und Verluste eines Hochspannungsnetzes Betreuer: Dr. Wehrmann
Woo, Kyoung Seok	Literaturrecherche zum Thema "USV-Systeme: Unterbrechungsfreie Stromversorgungssysteme" Betreuer: Dr. Turschner
Unhold, Maria	Untersuchung der Spannungsspreizung in Niederspannungsverteilstnetzen anhand des gemessenen Stromes an der Ortsnetzstation als Grundlage für ein strombasiertes Regelverfahren regelbarer Ortsnetztransformatoren (rONT) Betreuer: Dr. Wehrmann, Dipl.-Ing. Schnieder
Brünjes, Jost	Power to Gas - Stand der Technik und Anlagen im Bericht Betreuer: Dr. Turschner, Dipl.-Ing. Oberland
Fischer, Nils Arne	Energieeffizienz und Energieautarkie beim Neubau eines Einfamilienhauses - Rahmenbedingungen und Wirtschaftlichkeit Betreuer: Prof. Wenzl, Dr. Turschner
Strippelmann, Jan-Martin	CAN-Bus Kommunikation am Beispiel einer Siemens S7-300 mit Aktor Betreuer: Dr. Turschner

Petcha, Christien	Entwicklung einer VBA (Visual Basic for Applications) basierten, automatisierten Messdatenauswertung in Excel bei Volkswagen AG in Kassel Betreuer: Dr. Turschner, Dipl.-Ing. (FH) Bahn (VW Kassel)
Ditgens, Peter	Probleme der aktuellen Netzentgeltsystematik und Ansätze zur Lösung Betreuer: Dr. Wehrmann, Dipl.-Wi.-Ing. Koring
Masic, Dino	Nutzung von Zusatzlasten zur Integration erneuerbarer Energiequellen Betreuer: Prof. Wenzl, Dipl.-Ing. Spielmann
Strippelman, Jan-Martin	Methoden zur Überprüfung von Batterien in Telekommunikationsanlagen Betreuer: Prof. Wenzl
Fries, Ann-Kathrin	Auslegung eines Batteriespeichers zur Optimierung der Einspeiseleistung eines Windparks am 110-kV-Netz Betreuer: Dr. Wehrmann, Prof. Wenzl, Herr Grupe (Avacon AG)
Kruppert, Alexander	Variantenentwicklung und -bewertung von Energieversorgungskonzepten für ein Pflegeheim Betreuer: Prof. Kühl, Dr. Wehrmann, Dipl.-Ing. Kleinbrahm (Ingenieurbüro Kleinbrahm)
Kreth, Nils	Analyse einer lastflussabhängigen Stufung von Leistungstransformatoren zur verbesserten Ausnutzung des Spannungsbandes in Mittelspannungsnetzen Betreuer: Dr. Wehrmann, Prof. Beck, Herr Schönrock (EWE Netz)
Stael von Holstein, Jekaterina	Demand Side Management in Small Isolated Grids with Highly Heterogeneous Consumer Loads Betreuer: Dr. Wehrmann, Prof. Beck

Kopiez, Marius Lasse Battery Energy Storage System Rated Power Optimization in
Micro-Grid by Means of Simulated Annealing-Particle
Swarm Optimization
Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Bohn (IEI)

Yacoubi, Mekki Erstellung des Temperaturmodells einer Gleichstrommaschi-
ne und Entwurf einer Regelung
Betreuer: Dr. Turschner

Projektarbeiten

2014

Lin, Guosong Entwurf und Test eines elektronischen Wandlers für einen
Energy-Harvesting
Betreuer: Dr. Turschner, Dipl.-Ing. Bentaleb

Wu, Shukun Analyse von Betriebsdaten von Batterien
Zeng, Xin Betreuer: Prof. Wenzl

Yu, Fan Simulationsbasierte Auslegung von DC/DC Wandler für
Zhou, Tianyi einen Energy-Harvester
Betreuer: Dr Turschner, Dipl.-Ing. Bentaleb

El Hamzaoui, A. Simulation der netzfreundlichen Ladung von Elektrofahr-
Barhatov, O. zeugen
Talla Fotsing, R. Betreuer: Dr. Turschner, Dipl.-Ing. Schwake

Ebel, W. Schnellladung von Lithium-Ionen-Akkumulatoren eines
Mellinghausen, S. Elektrozweirades
Betreuer: Prof. Wenzl, Dipl.-Phys. Heyne

2015

Ding, Xinlong Xu, Zhijie Zhang, Hui Zou, Hansen	Modellbasierte Untersuchungen eines intelligenten Verteilnetzbetriebes mit selbstregelnden Erzeugungsanlagen Betreuer: Dr. Wehrmann
Hajiali, Soroush Hashemifarzad, Ali Salimifard, Mohammad Hadi	LIDAR Technologie Betreuer: Dr. Turschner
Hou, Jiaqi	Entwurf und Simulation eines geregelten PV-Wechselrichtersystems Betreuer: Dr. Turschner
Ni, Yilin	Alternative Raumzeigermodulation für unsymmetrische Lasten Betreuer: Dr. Turschner
Schmuland, Johannes	Einsatz eines Rapid-Prototyping Systems zur Implementierung einer Pulsweiten-Modulation mit zeitsynchroner Strommessung für die Steuerung eines Gleichstromstellers Betreuer: Dr. Turschner, Dipl.-Ing. Schwake
Song, Yinming	Modellbildung und Simulation einer umrichter gespeisten Asynchronmaschine mit verschiedenen Steuerverfahren Betreuer: Dr. Turschner
Baumgärtner, Robert	Erstellung einer Übersicht kraftwerksspezifischer Maschinendaten der Harzwasserwerke GmbH sowie einer Auswertungsmöglichkeit als Grundlage für Berechnungen zur Übernahme der Kraftwerke in das EEG 2014 am Beispiel von Kraftwerk Pattensen Betreuer: Dr. Turschner

Armbrecht, B. Schütte, Tobias	Einsatz von elektrischen Speichern und Anwendung des Power-to-Heat-Konzepts in Niederspannungsnetzen zur Begrenzung der Einspeisung aus Photovoltaikanlagen Betreuer: Prof. Beck, Prof. Wenzl, Dipl.-Ing. Schild, Dipl.-Ing. Schnieder
Seifi, Cinna	Ermittlung von mathematischen Zusammenhängen zwischen Wetterdaten und Einspeiseprofilen von PV-Anlagen Betreuer: Dr. Wehrmann, Dipl.-Ing. Schnieder
Woo, Kyoung Seok	Einsatzoptimierung der LED-Beleuchtung: Planungspraxis mit Hilfe von Modellsimulation anhand eines Projektbeispiels Betreuer: Dr. Turschner
Beushausen, Lennart Gollenstede, Julian	Untersuchungen von Rückwirkungen des hochdynamischen Wechselrichters der Virtuellen Synchronmaschine zur Netzstabilisierung auf den Gleichspannungs-Zwischenkreis Betreuer: Dr. Turschner, Dipl.-Ing. Werther, Dr. Benger
Erichsen, Wiebke Tkalcec, Karlo	Auslegung des Energiesystems energieautarker Mobilfunkstationen Betreuer: Dr. Wehrmann, Dipl.-Ing. Spielmann, Dipl.-Ing. Oberland

Diplom- und Masterarbeiten**2014**

Vormoor, Niels	Bewertung des Abzugsbildes für verlötete Verbinder von Solarzellen Betreuer: Dr. Turschner, Dr. Wehrmann
----------------	---

Guo, Jing	Untersuchung der LIDAR Technologie zum Einsatz in Windkraftanlagen Betreuer: Dr. Turschner, Dr. Wehrmann, Dipl.-Ing. Ell
Krafczyk, Torben	Energieeffizienzen im Spezialtiefbau: Systemkonzeptionierung eines elektrifizierten Drehbohrgerätes Betreuer: Dr. Turschner, Dr. Wehrmann
Heusmann, Fritjof	Zustandsschätzung von elektrischen Niederspannungsnetzen bei unvollständiger Messinfrastruktur mit Hilfe des Knotenlastbeobachters Betreuer: Prof. Bohn (Inst. f. Elektrische Informationstechnik), Dr. Turschner
Geng, Maria	Impedanzspektroskopie an Blei-Säure-Batterien zur Charakterisierung des Batteriezustandes Betreuer: Prof. Wenzl, Dr. Turschner, Dr. Hollas (Volkswagen AG)
Yu, Yi	Überwachung eines Energieversorgungssystems für Mobilfunkstation Betreuer: Prof. Wenzl, Dr. Wehrmann
Grün, Thorsten	Entwicklung eines netzstabilen und kostenoptimalen Hybridkraftwerksreglers für On- und Off-Grid-Systeme Betreuer: Prof. Wenzl, Dr. Wehrmann, Dipl.-Ing. Klotsche (Belectric Solarkraftwerke), Dipl.-Ing. Fallant (Belectric Solarkraftwerke)
Ebel, Wladimir	Bestimmung des transienten Skineffekts für beliebige Stromverläufe am Beispiel elektrochemischer Speicher Betreuer: Prof. Wenzl, Prof. Baake (Leibniz Universität Hannover)
Röth, Claus Jochen	Identifikation elektrischer Maschinen Betreuer: Dr. Turschner, Dr. Wehrmann

Athineos, Leonidas	Implementierung einer Raumzeigermodulation für unsymmetrische Lasten in MATLAB/Simulink Betreuer: Dr. Turschner, Dr. Wehrmann
Martinez Martinez, Miguel Andrés	Development of a Microcontroller Based Circuit to Measure Three-Phase Voltage and Frequency Betreuer: Dr. Turschner, Dr. Wehrmann
Wolff, Marius Alexander	Wirtschaftliche Auswirkungen auf die Produktentwicklung bei der Stadtwerke Hannover AG (enercity) durch den Einsatz von intelligenten Messsystemen unter Berücksichtigung der regulatorischen Rahmenbedingungen Betreuer: Prof. Schenk-Mathes (Inst. f. Wirtschaftswissenschaft), Dr. Wehrmann
Kuhlmann, Felix	Kriterien für die Einrichtung eines Energiemanagementsystems nach der ISO 50001 für ein Unternehmen der Wasserwirtschaft Betreuer: Prof. Beck, Prof. Schenk-Mathes (Inst. f. Wirtschaftswissenschaft)
Huang, Zhao	Wärmebilanz einer Li-Ionen-Batterie für elektrische Fahrzeuge Betreuer: Dr. Wenzl, Prof. Weber (IEVB), Dr. Benger
Zeng, Xin	Algorithmus zur Ladezustandsbestimmung von Bleisäurebatterien mit Hilfe des Sigma-Punkt-Kalman-Filters Betreuer: Dr. Wenzl, Dr. Wehrmann
Wu, Shukun	Zustandsgrößenbestimmung für Bleisäurebatterien, Verifikation und Vergleich verschiedener Verfahren Betreuer: Dr. Wenzl, Dr. Wehrmann
Bryja, Jacob	Vorbereitung, Durchführung und Auswertung eines Prüfstandes zur Erprobung und Analyse eines vollelektrischen, wassergeschmierten Azimut Jet-Antriebs Prototypen Betreuer: Dr. Turschner, Dr. Wehrmann

- Meyer, Jan
Beschleunigte Alterungsuntersuchung und Modellierung der Degradation von Lithium-Ionen Batterien
Betreuer: Prof. Wenzl, Dr. Turschner, Dr. Benger
- Khalatbari, M.
Untersuchung der Effekte einer solarthermisch unterstützten Wärmepumpenanlage auf die Effizienz des Wärmeerzeugungssystems
Betreuer: Prof. Kühl (Ostfalia Hochschule f. angewandte Wissenschaften), Dr. Wehrmann
- Lin, Guosong
Simulation einer geregelten Asynchronmaschine nach dem Verfahren der direkten Selbstregelung
Betreuer: Dr. Turschner, Dr. Wehrmann
- Hu, Jiejia
Implementierung und Simulation eines Vier-Quadranten-Umrichters zum Antrieb einer Asynchronmaschine im Motor- und Generatorbereich
Betreuer: Dr. Turschner, Dr. Bauer (IEI)
- Unhold, Maria
Bewertung von Verfahren der Positionsschätzung von Synchronmaschinen bei hohen Drehzahlen im Hinblick der industriellen Tauglichkeit
Betreuer: Dr. Turschner, Dr. Wehrmann, Dr. Amann (ZF), Dr. Lamsahel (ZF)
- Ludwig, Silke
Einfluss von zukünftigen Netzanschlussregeln für Mittelspannungsnetze und Hochspannungsnetze auf Windenergieanlagen für beispielhafte Windparkprojekte anhand von Kosten-Nutzen-Analysen
- Kurth, Benedikt
Modellgestützte Analyse zukünftiger Energieversorgungsstrukturen in Stadtquartieren
Betreuer: Dr. Wehrmann, Dr. Turschner
- Häberle, Michael
Untersuchung der Stufendynamik auf der Silizium (100)-Oberfläche mit Gallium-Vorbelegung
Betreuer: Prof. Daum (Inst. f. Energieforschung und Physikalische Technologien), Prof. Wenzl

Martin, Maximilian	Technische und wirtschaftliche Bewertung von Photovoltaikanlagen in Kombination mit elektrischen Wärmepumpen als Speicherlösung Betreuer: Prof. Schenk-Mathes (Inst. f. Wirtschaftswissenschaft), Dr. Wehrmann
Hou, Jiaqi	Simulation und Vergleich unterschiedlicher mathematischer Modelle von Photovoltaikanlagen Betreuer: Dr. Turscher, Prof. Beck
Putzke, Sebastian	Automatisierte Vernetzung der bewegten Komponenten einer Windenergieanlage für CFD Betreuer: Prof. Brenner (Inst. f. Mechanik), Dr. Heldt, Dr. Altmikus (Enercon), Dipl.-Ing Sweers (Enercon)
Zou, Hansen	Erarbeitung einer Betriebsstrategie für das Energiesystem einer energieautarken Mobilfunstation Betreuer: Dr. Wehrmann, Prof. Beck, Dipl.-Ing. Oberland, Dipl.-Ing. Schild
Ni, Yilin	Simulation einer Raumzeigermodulation für unsymmetrische Lasten mit Simulink Betreuer: Prof. Beck, Dr. Turschner
Talla Fotsing, Roméo	Entwicklung und Validierung einer direkten Selbstregelung (DTC) für eine Synchronmaschine Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Bohn (IEI)
Oubadji, Zohir	Konzept einer Photovoltaikanlage und eines Wechselrichters Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Wulf (WiWi)
Zeng, Hao	Simulation eines Multi-Level-Umrichters Betreuer: Dr. Turschner, Dr. Wehrmann
Zhang, Hui	Aufbau einer Demonstrationsanlage zur Visualisierung der Funktionsweise einer Ladestation für Elektrofahrzeuge mit regenerativen Erzeugern Betreuer: Prof. Beck, Dr. Turschner

Ding, Xinlong	Entwurf der Leistungsregelung für den gleichberechtigten Parallelbetrieb von spannungsgeregelten, netzbildenden Stromrichtern Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Beck, Dipl.-Ing. Unruh (Fraunhofer IWES)
Xu, Zhijie	Feldorientierte Regelung einer Asynchronmaschine bei Verwendung unterschiedlicher Maschinenmodelle Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Bohn (IEI)
Zhou, Tianyi	Systemuntersuchungen zur Leistungsoptimierung eines SOFC-Stacks mit elektronischem Wandler Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Bohn (IEI)
Sun, Cheng	Vergleich unterschiedlicher Modelle einer Asynchronmaschine in der Simulation Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Bohn (IEI)
Strippelmann, Jan-Martin	Optimierung eines drahtlosen Antriebssystems Betreuer: Dr. Turschner, Dr. Wehrmann, Dipl.-Ing. Dill (Christ Gefriertrocknungsanlage GmbH)
Hendrich, Marius	Analyse und Bewertung einer neuen Windenergieanlagen-Generation der eno energy systems GmbH hinsichtlich technischer, logistischer und wirtschaftlicher Aspekte Betreuer: Dr. Turschner, Dr. Wehrmann
Mackensen, Daniel	Projektierung, Erstellung und Inbetriebnahme von Hard- und Software zur Steuerung und Regelung der Transformatoren des Prozesses "Elektrolytik" Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Bohn
Bomm, Alexander	Untersuchung der Wärmeabstrahlung von Femtosekundenlaser-prozessierten Aluminiumoberflächen Betreuer: Prof. Schade (IEPT), Prof. Beck

- Beushausen, Lennart Untersuchung und Modellierung der Alterung von Lithium-Eisenphosphat-Batterien zur zukünftigen Sicherung der Netzstabilität
Betreuer: Prof. Wenzl, Prof. Beck
- Armbrecht, Björn Technische und wirtschaftliche Auslegung von Anlagenpools zur flexiblen Aufnahme und Abgabe von Energie
Betreuer: Prof. Beck, Dr. Turschner, Dr. Gamrad (Evonik),
Dipl.-Ing. Wandelt (Evonik)

2 Veröffentlichungen, Dissertationen, Habilitationen

2.1 Zeitschriften- und Tagungsaufsätze, Patente / -anmeldungen

Zeitschriften- und Tagungsaufsätze, Bücher

2014

- Dewenter, T. Optimierung des dynamischen Verhaltens netzstützender Anlagen
Werther, B. am Beispiel der Virtuellen Synchronmaschine
Hartmann, A. K. Tagungsband zum 13. Symposium Energieinnovation, Graz/Austria
Beck, H.-P. (12.-14. Februar 2014)
- Chen, Y. Propiedades dinâmicas da máquina síncrona virtual
Hesse, R. EM Janeiro 2014, S. 58 - 65, (2014)
Turschner, D.
Beck, H.-P.
- Becker, A. Netzausbauvarianten in Niederspannungsverteilnetzen
... Regelbare Ortsnetztransformatoren in Konkurrenz zu konventionel-
Schnieder, R. len Netzausbaumaßnahmen
... Band 20, ISBN 978-3-95404-757-4, Cuvillier Verlag Göttingen

- Heins, W.
Ell, N.
Beck, H.-P.
Bohn, C.
- State observation in medium-voltage grids with incomplete measurement infrastructure through online correction of power forecasts
Proceedings of the European Control Conference (ECC), Seite 1306 -1312, Strasbourg, (Juni 2014)
- Koring, K.
Maubach, K.-D.
Beck, H.-P.
- Funktionsorientierte Netzentgelte für die Energiewende
ew Magazin für die Energiewirtschaft, Ausgabe 08, S. 25-27, (2014)
- Schnieder, R.
Wehrmann, E.-A.
Beck, H.-P.
- Spannungsregelung in Niederspannungsverteilnetzen durch regelbare Ortsnetztransformatoren im Mono- und Multisensorbetrieb
Konferenz für Nachhaltige Energieversorgung und Integration von Speichern (NEIS), Hamburg, (18.-19. September 2014)
- Schulte, D.
....
Wenzl, H.
- Stratifiability index - A quantitative assessment of acid stratification in flooded lead acid batteries
Journal of Power Sources, Seite 704-715, Ausgabe 269, (2014)
- Schild, V.
Beck, H.-P.
Wenzl, H.
- Abschätzung des Speicherpotentials in Mittel- und Niederspannungsverteilnetzen
Konferenz für Nachhaltige Energieversorgung und Integration von Speichern (NEIS), Hamburg, (18.-19. September 2014)
- Tkalcec, K.
- Smart Domestic Energy Supply: Hybrid Generating Plants in Prosumer Cells
Cogeneration Units With Photovoltaic Systems In Optimized Conjoint Operation Integrated In The Customer Installation
29th European PV Solar Energy Conference and Exhibition, RAI Convention & Exhibition Centre, Amsterdam, Niederlande, (22.-26. September 2014)

2015

- Ell, N.
Stubbe, M.
Turschner, D.
Beck, H.-P. Wideband estimation of the drive torque of a wind turbine using LiDAR measurements, blade element momentum theory and Kalman filtering
Renewable Energies and Power Quality Journal (REPQJ), Vol. 13, ISSN 2172-038X, (März 2015)
- Stubbe, M.
Ell, N.
Turschner, D.
Beck, H.-P. Multi frequency wideband active damping device for compensation of torsional vibration
Renewable Energies and Power Quality Journal (REPQJ), Vol. 13, ISSN 2172-038X, (März 2015)
- Nakhaie, S.
Beck, H.-P. Ausbau des Übertragungsnetzes vs. Einsatz von Langzeitspeichern
ew Magazin für die Energiewirtschaft, Ausgabe 03, S. 66-71, (März 2015)
- Beck, H.-P.
Wehrmann, E.-A.
Bentaleb, A. Untersuchungen zur Brennwertverfolgung in Gasverteilnetzen mit unvollständiger Messinfrastruktur
DVGW energie wasser-praxis, Ausgabe 04, S. 50 - 53, (April 2015)
- Skau, K.
Bettinger, C.
Schild, V.
Fuchs, C.
Beck, H.-P. Betriebsstrategien für Biogasanlagen - Zielkonflikt zwischen netzdienlichem und wirtschaftlich orientiertem Betrieb
9. Rostocker Bioenergieforum, S. 277 - 289, Rostock, (18. - 19. Juni 2015)
- Bettinger, C.
Spielmann, V. Regenerativer Überschussstrom für Power-to-Heat - Abschätzung der Potentiale von Überschussstrommärkten
Erneuerbare Energie erfolgreich integrieren durch Power to Heat, Cuvilier Verlag, Band 33, S. 158 - 169, (2015)

- Armbrecht, B.
Schütte, T.
Spielmann, V.
- Anwendung von P2H zur Begrenzung der PV-Einspeisung um Netzausbaumaßnahmen im Niederspannungsnetz zu vermeiden
Erneuerbare Energie erfolgreich integrieren durch Power to Heat, Cuvilier Verlag, Band 33, S. 39 - 51, (2015)
- Skau, K.
Fuchs, C.
Spielmann, V.
Beck, H.-P.
Bettinger, C.
- Renewable Energy - Opportunities for Production and use of Electrical Power for Farmers under Conditions of the Renewable Energy Act in Germany
IFMA20, Quebec, Kanada, (12. - 17. Juli 2015)
- Schnieder, R.
Wehrmann, E.-A.
Beck, H.-P.
- Einsatzmöglichkeiten regelbarer Ortsnetztransformatoren zur Spannungshaltung und Netzverlustreduzierung in Niederspannungsverteilnetzen
Konferenz für Nachhaltige Energieversorgung und Integration von Speichern (NEIS), Hamburg, (10.-11. September 2015)
- Spielmann, V.
Bettinger, C.
Skau, K.
Beck, H.-P.
Fuchs, C.
- Auswirkungen der Anreizsysteme für private PV-Anlagenbetreiber auf das lokale Verteilnetz
Konferenz für Nachhaltige Energieversorgung und Integration von Speichern (NEIS), Hamburg, (10.-11. September 2015)
- Spielmann, V.
Bettinger, C.
Skau, K.
Beck, H.-P.
Fuchs, C.
- A highly transparent method of assessing the contribution of incentives to meet various technical challenges in distributed energy systems
International ETG Congress 2015 - Die Energiewende, Fachbericht 147, Bonn, (17. - 18. November 2015)

Patentanmeldungen / Patenterteilung

Hesse, R.	Netzqualität und Versorgungssicherheitsverbesserungsver-
Beck, H.-P.	fahren (VISMA)
Turschner, D.	EU-Patent-Nr.: 2070174
	US-Patent-Nr.: US 8,510,090 B2
	Japan-Patent-Nr.: JP 544 2440 B3

Dissertationen:

2014

Nakhaie, Soroush	Reduzierung des Übertragungsnetzausbaus durch Minderung der Austauschleistungen zwischen den Übertragungs- und verteilnetzen
	Referenten: Prof. Beck, Prof. Hofmann (Leibniz Universität Hannover)

2015

Heyne, Raoul	Lebensdauerprognose von elektrochemischen Systemen unter besonderer Berücksichtigung von Brennstoffzellen
	Referenten: Prof. Beck, Prof. Schade
Speckmann, Markus	Bereitstellung von Regelleistung durch fluktuierende Erzeuger am Beispiel der Windenergie
	Referenten: Prof. Beck, Prof. Hofmann
Schmiesing, Johannes	Verbesserte Integration regenerativer Erzeugungsanlagen in ländliche Mittelspannungsnetze durch regelbare Ortsnetztransformatoren
	Referenten: Prof. Beck, Prof. Hofmann
Dietrich, Simon	Sensorreduzierte, eigensichere Drehzahlermittlung eines Asynchron-Fahrtriebs für Elektrofahrzeuge
	Referenten: Prof. Zirn, Prof. Beck, Prof. Haag

2.2 Vorträge / Seminare

- Sourkouni-Argirusi, A. Schutzschichten für wasserstoffspeichernde Materialien am Beispiel des NaBH₄
Promotionskolleg “Oberflächentechnik und Oberflächenfunktionalisierung”
(29. Januar 2014)
- Schnieder, R. (Vortragender)
Wehrmann, E.-A.
Beck, H.-P. Spannungsregelung in Niederspannungsverteilnetzen durch regelbare Ortsnetztransformatoren im Mono- und Multisensorbetrieb
NEIS 2014 Konferenz, Hamburg, (18.-19. September 2014)
- Schild, V. Abschätzung des Speicherbedarfs in Mittel- und Niederspannungsnetzen
NEIS 2014 Konferenz, Hamburg, (18.-19. September 2014)
- Turschner, D. Die virtuelle Synchronmaschine (VISMA) - ein Beitrag zur Netzstabilisierung
Woche der Energie 2014, Hamburg,
(17.-21. November 2014)
- Tchoupou Lando Ereignisbasiertes Modell für die Lebensdauerprognose von Lithium-Ionen-Batterien
7. E-Motive Expertenforum “Elektrische Fahrzeugantriebe”, BMW Drivin Academy Maisach bei München,
(09. Juni 2015)
- Beck Zur Entwicklung der Technischen Universität Clausthal
Vortrag anlässlich des Besuches der Andreas-Hermes Akademie, (19. Juni 2015)
- Beck Vorstellung der Technischen Universität Clausthal
Vortrag im Rahmen der Vorstands- und Beiratssitzung des VDE Bezirksvereins Braunschweig e. V., (07. Juli 2015)
- Turschner Virtuelle Synchronmaschine
ECPE, Cluster Leistungselektronik, Metzbetrieb bei hohem Anteil an Leistungselektronik, Kolping-Akademie Würzburg,
(08. - 09. Juli 2015)

Schnieder	Einsatzmöglichkeiten regelbarer Ortsnetztransformatoren zur Spannungshaltung und Netzverlustreduzierung in Niederspannungsverteilnetzen Konferenz für Nachhaltige Energieversorgung und Integration von Speichern (NEIS), Hamburg, (10. - 11. September 2015)
Spielmann	Auswirkungen der Anreizsysteme für private PV-Anlagenbetreiber auf das lokale Verteilnetz Konferenz für Nachhaltige Energieversorgung und Integration von Speichern (NEIS), Hamburg, (10. - 11. September 2015)
Turschner	PiVo - Lokal orientierte Strategien, Tanken im Smart Grid PiVo-Konferenz "Dezentrale selbstorganisierende Netzintegration", Berlin, (19. November 2015)

2.3 Geförderte Forschungsvorhaben

Im Berichtszeitraum wurden folgende geförderte Forschungsvorhaben bearbeitet :

Europäische Kommission (Research Fund for Coal and Steel)

Global adaptive model for prediction, characterisation and damping of vibrations in hot strip mills

Kurzbezeichnung: Chatter

Bearbeiter: Dr.-Ing. D. Turschner, Dipl.-Ing. W. Xiong

Hansen Transmission (Belgien)

Windgetriebeprüfstand 20 kW

Bearbeiter: Dr.-Ing. D. Turschner

DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft)

Leistungsstarke Kurzzeit-Energiespeichersysteme

Bearbeiter: Dr. H. Wenzl, Dipl.-Ing. R. Benger

Land Niedersachsen / MWK

GEBO-Werkstoffe (W8)

Bearbeiter: Dipl.-Wi.-Ing. R. Scharff, Dipl.-Ing. H. Darrelmann

DVGW

Fehlerfortpflanzung bei nacheinander geschalteten Netzen, Weiterentwicklung von Messnetzen und metrologische Validierung von Rekonstruktionssystemen für die Gasversorgung

Kurzbezeichnung: MetroGas

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Bentaleb

E.ON Avacon AG

e-Home Energieprojekt 2020

Kurzbezeichnung: e-home 2020

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Schnieder

DFG

Direkte Abwärmeverstromung in thermoelektrischen Energiesystemen, GZ: BE 1496/16-1

Kurzbezeichnung: Thermoelektrik

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Bentaleb

DFG

Alterungsmodelle von Lithium-Ionen Batterien am Beispiel von Elektrofahrzeugen, GZ: BE 1496/17-1

Kurzbezeichnung: Alterungsmodelle von Batterien

Bearbeiter: Prof. Wenzl, Dr.-Ing. Bengler

Nbank/EFRE (Europäischer Fonds für regional Entwicklung)

Schnellladung von Elektrofahrzeugen

Bearbeiter: Dipl.-Phy. Heyne

PSI Aktiengesellschaft für Produkte und Systeme der Informationstechnologie

Weiterentwicklung Knotenlastbeobachter

Bearbeiter: Prof. Beck, Dipl.-Ing. Hager

MWK

Forschungsverbund SmartNord TP 5

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Chen, Dipl.-Ing. Ell, Dipl.-Ing. Werther

IEE

E-Plus Mobilfunk GmbH & Co. KG

Entwicklung und Realisierung Energieautarker Standorte

Kurzbezeichnung: Energieautarke Sendestationen

Bearbeiter: Prof. Wenzl, Dipl.-Ing. Oberland, Dipl.-Ing. Spielmann

BMU

Potentiale elektrochemische Speicher in elektrischen Netzen in Konkurrenz zu anderen Technologien und Systemlösungen (02E2 ESP233)

Kurzbezeichnung: ESPEN

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Spielmann

NFF

Graduiertenkollegs Energiespeicher und Elektromobilität Niedersachsen (VWZN2783)

Kurzbezeichnung: GEENI

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Oberland

BMVBS

Schaufenster 1.2: Tanken im Smart Grid

Bearbeiter: Dipl.-Wi.-Ing. Kaestle, Dipl.-Ing. Schwake

DIN/ DKE, BMWi

Schutzkonzepte für dezentrale Einspeisungen (INS 1238)

Kurzbezeichnung: Schuko

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Ufkes

BMVBS

Hochschuloffensive eMobilität für Fort- und Weiterbildung - MOBIL4e

Kurzbezeichnung MOBIL4e

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Geng, Dipl.-Ing. Tchoupou Lando

MWK

iQ - Intelligente Blindleistungsregelung für Verteilnetze

Kurzbezeichnung: SmartNord Transferprojekt

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Bentaleb

Power Innovations GmbH

Aufbau und Entwicklung einer neuartigen Wechselrichterregelung

Kurzbezeichnung: VISMA-Wechselrichter für Unsymmetrie

Bearbeiter: Dr. Turschner

2.4 Veranstaltungen, Exkursionen, Gastaufenthalte

Veranstaltungen:

29. April 2014

Einweihungsfeier zur Neugestaltung des Institutes

(siehe Anlage 2)

19. Juni 2014

EST'ler-Grillen

28. Juli 2014

Präsentation und Laborbesichtigung über Weiterbildungsmöglichkeiten von Ingenieuren mit praxisorientiertem Studium in Deutschland für 27 Dozenten der Sichuan University

20. April 2015

Institutsversammlung

18. Juni 2015

EST'ler-Grillen

19. Juni 2015

Besuch der Andreas-Hermes Akademie (ca. 22 Personen)

26. Juni 2015

7. Technologietagung mit Ehemaligen des IEE und externen Gästen

Exkursionen:

06. Februar 2014

Besichtigung des Unternehmens Harzenergie in Osterode im Rahmen der Vorlesung
“Elektrische Energieverteilung”

19. Januar 2015

Exkursion zur Firma Johnson Controls Systems & Service im Rahmen der Vorlesung
“Batteriesystemtechnik und Brennstoffzellen”

- Besichtigung des Bereichs Starterbatterie
- Besichtigung eines Teils des Bereichs Lithium-Ionen-Batterie

27. Januar 2015

Zum Abschluss der Vorlesung “Fossile und regenerative Energieressourcen”:

- Besichtigung des Heizkraftwerken Hafen der SWB, Bremen

11. Februar 2015

Besichtigung der Windkraftgeneratoren in Lübeck und Travemünde im Rahmen der Vorlesung
“Sonderprobleme elektrischer Maschinen”

- Serienfertigung PEM + SFIG 0,5-6MW
- Prototypenfertigung und Generatorreparatur

Gastaufenthalte:

Deutsches Komitee der IAESTE:

05.05.2014 - 30.06.2014

Herr Michal Micor, Fachpraktikant

01.09.2014 - 31.10.2014

Herr Aleksandar Toteski, Fachpraktikant

01.06.2015 - 31.07.2015

Herr Nikola Stevic, Fachpraktikant

08.06.2015 - 31.07.2015

Herr Simion Goljovic, Fachpraktikant

22.09.2014 - 26.09.2014

Besuch Prof. Pop und Dr. Tulbure im Rahmen des ERASMUS-Programms

Dr. Tulbure hielt am 24.09.14 einen Vortrag mit dem Thema "Regenerative Energieversorgung in Rumänien"

06.01.2015 - 26.01.2015

Herr Lorenzo Brandt (Betriebspraktikum)

Herr Marvin Turschner (Betriebspraktikum)

3 Forschungsarbeiten

3.1 Ausbau der Institutseinrichtungen

Zur weiteren Komplettierung der Institutseinrichtungen wurden folgende Neuanschaffungen getätigt:

- Tesla-Elektro-Roadster
- Schnelllade-DC-Tankstelle 50 kW mit Batteriecontainer
- Fassadenintegrierte Photovoltaikanlage 10 kW
- Easy-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

3.2 Projektblätter

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

- Dezentrale Energiesysteme
- Leistungsmechatronik / Antriebe
- Energiespeicher

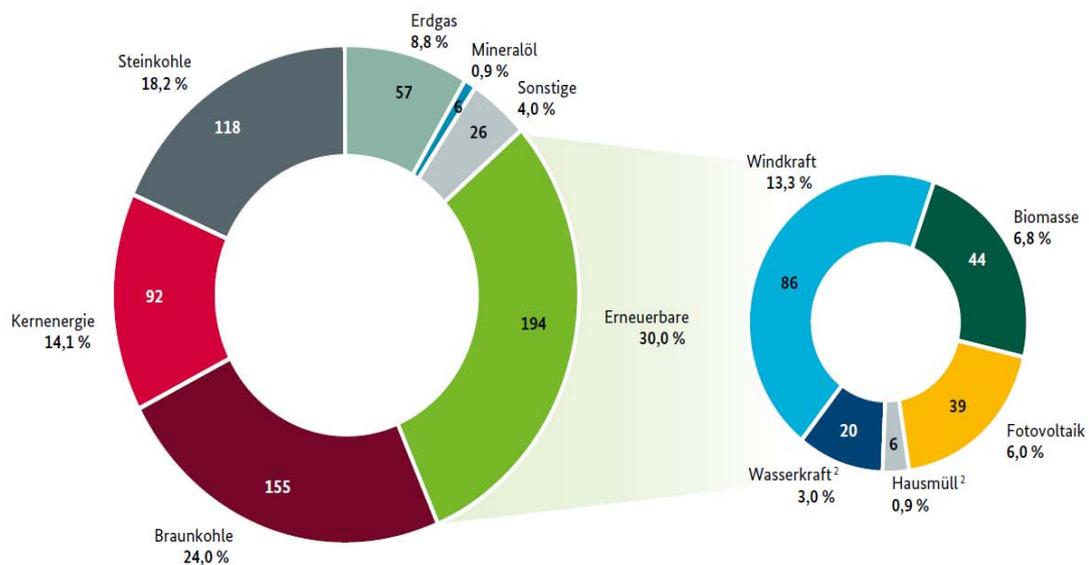
Projektübersicht

Projektleiter: Dr.-Ing. Ernst-August Wehrmann
 Tel.: +49-5323-72-2595
 E-Mail: wehrmann@iee.tu-clausthal.de

Arbeitsgruppe Dezentrale Energiesysteme

Die Stromerzeugung aus regenerativen Quellen ist in der Vergangenheit kontinuierlich gestiegen und stellte erstmals in 2014 mit 26,1 % den größten Anteil dar (2. Platz Braunkohle mit

28. Bruttostromerzeugung in Deutschland 2015¹: insgesamt: 647 TWh



1 Vorläufig
 2 Regenerativer Anteil
 Geothermie aufgrund der geringen Menge nicht dargestellt

Quelle: AG Energiebilanzen, Stand Dezember 2015

Bild 1: Vorläufige Daten zur Bruttostromerzeugung 2015
 Quelle: BmWi, Dez. 2015

25,4 %, Quelle: BmWi). In 2015 stieg der regenerative Anteil auf 30 % (Bild 1).

Damit bleiben weiterhin die Fragestellungen zur Integration der regenerativen Quellen in das Versorgungssystem und speziell in das elektrische Verteilnetz aktuell. Wegen der deutlich gestiegenen Systemrelevanz wird aber auch der Beitrag der durch regenerative Einspeiser zu

erbringenden Systemdienstleistungen immer wichtiger. Ein (extern durchgeführtes) Promotionsvorhaben mit dem dazu passenden Thema “Bereitstellung von Regelleistung durch fluktuierende Erzeuger am Beispiel der Windenergie” konnte von Herrn Dipl.-Ing. Markus Speckmann in 2015 abgeschlossen werden. In diesem Themenkomplex ist das IEE mit seinen etablierten Arbeitsgruppen hervorragend aufgestellt, da hierfür das Zusammenwirken von Netz, Speichern und Leistungselektronik als Gesamtsystem betrachtet werden muss. Die im Berichtszeitraum bearbeiteten Forschungsprojekte der AG Dezentrale Energiesysteme konzentrieren sich daher auf die folgenden Themen:

1. Welche Möglichkeiten und Grenzen ergeben sich für unterschiedliche Maßnahmen zur Spannungshaltung im Verteilnetz mit dem Ziel, die Aufnahmefähigkeit für dezentrale Erzeugungsanlagen zu erhöhen. Für die Gasversorgung wurden für dieses Ziel Methoden zur Handhabung unterschiedliche Gasqualitäten im Netz entwickelt.
2. Die Notwendigkeit zur Lieferung von Systemdienstleistungen durch dezentrale Erzeugungsanlagen ist inzwischen erkannt aber noch wenig etabliert. Dabei geht es neben der Primär- und Sekundärregelleistung z.B. durch dezentrale Speicher zukünftig auch um die Momentanreserve, die bisher (unvermeidbar und daher auch nicht vergütet) durch die Schwungmassen der zentralen Kraftwerke geliefert wurde. Der Bezug induktiver Blindleistung dezentraler Erzeuger zur Spannungshaltung im Verteilnetz muss im Zusammenhang mit dem zunehmenden Blindleistungsbedarf im Übertragungsnetz wegen steigender Transportaufgaben bewertet werden.
3. Auch die Effizienzsteigerung als wichtiges Kernthema der Energiewende wird in mehreren Forschungsprojekten behandelt.
4. Aus dem sich vollziehenden Strukturwandel in der elektrischen Energieversorgung leitet sich auch die Fragestellung ab, wie die Kosten des elektrischen Netzes zukünftig sinnvoll verteilt werden sollten.

Projektübersicht

Aktuelle Projekte:

- **Effiziente Nutzung erneuerbarer Energien durch regionale ressourcenoptimierte intelligente Versorgungs- und Verbrauchsnetze (SMiG)**

Für ausgewählte Modellregionen werden vorhandene Potentiale von Erzeugern, Verbrauchern und Speichern analysiert, in wie weit sie von einem übergeordneten System so geführt werden können, dass sie auf Basis externer Vorgaben unterschiedliche Optimierungszielen folgen. Von Projektpartnern werden ergänzend die Bereitschaft zur Teilnahme der Stromkunden und die wirtschaftlichen Aspekte analysiert.

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Verena Spielmann

- **e-Home Energieprojekt 2020**

Untersuchungsschwerpunkt ist der Einsatz regelbarer Ortsnetztrafos (rONT) zur Steigerung der Integrationsfähigkeit von dezentralen Einspeisern in das Niederspannungsnetz. Dabei geht es neben der Regelstrategie auch um die energetische Effizienz dieser Maßnahme.

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Raimund Schnieder

- **Smart Nord: Systemtheorie für aktive Verteilnetze (Teilprojekt 5)**

Im Rahmen dieses Projektes wurde das am EFZN vorhandene Niederspannungs-Netzlabor wesentlich erweitert zu einem "Labor für aktive Verteilnetze" zur Validierung der theoretischen Forschungsergebnisse. Ausgehend von einem Niederspannungs-Versorgungssystem wird untersucht, wie weit gegenüber dem überlagerten Netz und auch innerhalb eines möglichen Inselnetzes Systemdienstleistungen erbracht werden können. Wesentlich ist hierfür auch die Identifizierung der Trennung vom überlagerten Netz.

Bearbeiter: M. Eng. Florian Pöschke, Dipl.-Ing. Benjamin Werther

- **Entwicklung und Realisierung energieautarker Standorte**

Inzwischen liegen für zwei Standorte des Mobilfunk-Netzbetreibers E-Plus für autark versorgte Sendemasten Messergebnisse vor. Deren Analyse liefert Erkenntnisse zum Beitrag und zur Effizienz der installierten Komponenten (Windkraftanlage, PV-Panel,

Batteriespeicher und Brennstoffzelle). Hierzu wurde ein Simulationsmodell erstellt, mit dem die Optimierung des Systems und der Betriebsstrategie entwickelt wird.

Bearbeiterin und Bearbeiter: Dipl.-Ing. Verena Spielmann, Dipl.-Ing. Alexander Oberland

- **Schutzkonzepte für dezentrale Einspeisung**

Im Rahmen des inzwischen abgeschlossenen Projektes wurde die Tauglichkeit der aktuellen Netzschutzkonzepte im Verteilnetz für die steigende dezentrale Einspeisung untersucht. Dazu wurden sowohl Literaturrecherchen als auch Modellrechnungen sowie Messungen zur Validierung im Labor für aktive Verteilnetze durchgeführt. Es konnte nachgewiesen werden, dass der aktuelle Netzschutz unter bestimmten Bedingungen bei dezentraler Einspeisung versagt. Als weiteres Problem wurde die Möglichkeit der ungewollten Inselnetzbildung identifiziert für deren Erkennung noch geeignete Verfahren gefunden werden müssen.

Bearbeiterin: Dipl.-Ing. Anja Ufkes

- **Direkte Abwärmeverstromung in thermoelektrischen Energiesystemen**

Bisher ungenutzte Abwärme kann in so genannten Thermoelektrischen Generatoren (TEG) in Verbindung mit entsprechenden leistungselektronischen Wandlern direkt in nutzbare elektrische Energie gewandelt werden. Am IEE werden hierzu wirkungsgradoptimierte leistungselektronische Konzepte entwickelt. Ein zweiphasiger Synchronwandler erreicht Wirkungsgrade bis zu 99 %. Bis zu 12 Thermogeneratoren können in dem Versuchsstand mit Mehrkammer-Kalorimeter vermessen werden.

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Abdelhamid Bentaleb

- **Weiterentwicklung und metrologische Validierung von Messnetzen und Rekonstruktionssystemen für die Gasversorgung**

In diesem Projekt wurde der am IEE entwickelte Knotenlastbeobachter zur Berechnung von Gasverteilnetzen mit schwacher Messinfrastruktur für die abrechnungsrelevante Anwendung in Rekonstruktionssystemen ertüchtigt und erprobt. In aufwändigen Feldversuchen im

Projektübersicht

Gasverteilnetz des Projektpartners Avacon AG konnte gezeigt werden, dass die räumliche und zeitliche Verteilung unterschiedlicher Gasqualitäten (Brennwerte) mit der für Abrechnungszwecke erforderlichen Genauigkeit berechnet werden kann. Damit wurde eine Grundlage gelegt, um zukünftig den Einsatz sehr aufwendiger Messtechnik zur Bestimmung der Gasqualität zu reduzieren und die energie- und anlagenintensive Konditionierung von Biogas auf die jeweilige Erdgasqualität im Netz zu vermeiden.

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Abdelhamid Bentaleb

- **Zukunftsorientierte Netzentgeltstrukturen**

“Die Energiewende findet im Verteilnetz statt” ist eine häufig aufgestellte These. Auch wenn damit nicht alle Aspekte der Energiewende erfasst werden, so ist es doch richtig, dass die dezentrale Erzeugung dazu führt, dass Netze in unterschiedlichen Bereichen ausgebaut werden müssen. Dieses ist mit erheblichen Kosten verbunden, die i. W. nach bisher unveränderten Regeln (arbeitspreisbasierend) verteilt werden. Weiterhin führt die zunehmende Eigennutzung der dezentralen Erzeugung, die durch dezentrale Speicher noch gesteigert werden kann, dazu, dass die Kosten auf sinkende Energiemengen verteilt werden. Dies geschieht zu Lasten derer, die sich aus finanziellen und anderen Randbedingungen nicht an der dezentralen Erzeugung beteiligen können. In dem Projekt werden in Kooperation mit dem Industriepartner E-Bridge Consulting Vorschläge entwickelt, wie die Netzentgelte den geänderten Randbedingungen angepasst werden sollten.

Bearbeiter: Dipl.-Wirtsch.-Ing. Karolina Koring

IEE

Projekt: Smart Microgrids
Teilprojekt: Energiesystemtechnik (TP 2)

Problem: Verbundprojekt: Effiziente Nutzung erneuerbarer Energien durch regionale ressourcenoptimierte ‚intelligente‘ Versorgungs- und Verbrauchsnetze (Smart Microgrids): Technische und ökonomische Machbarkeit, Umwelt- und Gesellschaftsverträglichkeit
Teilvorhaben: Energiesystemtechnik (TP 2)



Projektziel: Verbundprojekt: Die im Projekt verfolgten übergeordneten Ziele betreffen die Erschließung regionaler Potenziale erneuerbarer Energien und deren dezentrale Nutzung durch die dynamische Anpassung von Angebot und Nachfrage. Einhergehend soll die Vulnerabilität des Energiesystems insgesamt reduziert und dessen Flexibilität hinsichtlich des Potenzials der Einbindung erneuerbarer Energiequellen erhöht werden. Unter Einbeziehung verschiedener Praxispartner in zwei Modellregionen wird die soziale Akzeptanz der Nutzung erneuerbarer Energien untersucht.

Im Fokus der im Projekt durchgeführten Betrachtungen steht die Beantwortung der Frage, ob und wie Smart Microgrids dazu beitragen können, intelligente Versorgungsstrukturen zu schaffen, die elektrische Energie aus unterschiedlichen Quellen aufnehmen und die Verbraucher bedarfsgerecht versorgen. Dabei wird insbesondere der zeitliche Ausgleich von Angebot und Nachfrage innerhalb des lokalen Energiesystems untersucht.

TP 2 – Energiesystemtechnik:

Ziel dieses Teilprojekts ist die Erarbeitung eines Energiemanagementkonzepts, welches unter Einbeziehung der in den betrachteten Gemeinden vorhandenen Potenziale der Energiebereitstellung aus regenerativen Quellen (Photovoltaik, Wind und Bioenergie) und des Lastmanagements in landwirtschaftlichen und Gewerbebetrieben, eine netzdienliche Austauschleistung mit dem vorlagerten Netz ermöglicht.

Hintergr. des Projekts: Ziel des Projekts ist die Analyse der technisch-ökonomischen Machbarkeit des lokalen zeitlichen Ausgleichs von Energieangebot und -nachfrage. Aus volkswirtschaftlicher Sicht kann durch diesen Ansatz den steigenden Anforderungen an die Netze durch dezentrale und fluktuierend einspeisende Erzeugungsanlagen begegnet werden [1]. Innerhalb des liberalisierten Strommarktes ist der angestrebte lokale Ausgleich unter Berücksichtigung des freien Wettbewerbs zwischen Energieerzeugung, Energiehandel und den Kunden zu betrachten. Da die wirtschaftlichen Ziele der Marktteilnehmer mit dem Ziel des lokalen Ausgleichs innerhalb des Energiesystems in Konkurrenz stehen können, sind regulatorische Eingriffe erforderlich [2].

Lösungsweg: Im Rahmen des Projekts werden die betrachteten Energiesysteme in zwei getrennt durchgeführten Betrachtungen einerseits hinsichtlich der betriebswirtschaftlichen Ziele der

beteiligten Akteure und andererseits hinsichtlich der technischen Zielvorstellung bezüglich des Gesamtsystems untersucht.

Durch die Leuphana Universität Lüneburg wurde im Rahmen des Teilprojekts 3 (Finanzierungskonzepte) dazu zunächst untersucht, welche Anreizsysteme und Geschäftsmodelle hinsichtlich des regionalen zeitlichen Ausgleichs von Angebot und Nachfrage den einzelnen Akteuren derzeit zur Verfügung stehen [3]. Aus den Ergebnissen der Analyse werden entsprechende Geschäftsmodelle und zugehörige Vermarktungsstrategien für die im System vorhandenen Anlagen (PV-, Wind- und Biogasanlagen, sowie steuerbare und nicht-steuerbare Lasten und Speicher) abgeleitet und in einem betriebswirtschaftlichen Modell implementiert. Ergebnis dieser Betrachtungen sind die wirtschaftlich motivierten Fahrpläne der einzelnen Anlagen und die zugehörigen Speicherkapazitäten. Durch die Summation der Fahrpläne der einzelnen Anlagen ergibt sich die Austauschleistung zwischen dem betrachteten System und der Umgebung. Gleichermaßen wird die insgesamt wirtschaftlich motivierte Speicherkapazität bestimmt.

Am Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme wurde im Rahmen des Teilprojekts 2 (Energiesystemtechnik) ein modulares Modell eines Energiemanagementkonzepts erarbeitet, welches auf den verfügbaren Daten (Einspeise- und Lastzeitreihen in 15-Minuten-Intervallen) basiert. Ziel des Managementkonzepts ist der Ausgleich der Energiebilanz für eine vorgegebene Zeitreihe der Austauschleistung mit dem umgebenden System in jedem Simulationsschritt. Als Ziele können beispielsweise die Verringerung von Netzausbaumaßnahmen, Energiebereitstellung zu Hochlastzeiten oder die Bereitstellung von Regelleistung als Zeitreihe der Austauschleistung zwischen dem betrachteten Energiesystem und dem vorgelagerten Netz formuliert werden. Über die entsprechende Vorgabe der Austauschleistung kann das Managementkonzept sowohl für den Netzparallelbetrieb als auch für den Inselnetzbetrieb eingesetzt werden.

Für die zu betrachtenden Beispielgemeinden können verschiedene Typen von Erzeugern und Verbrauchern einbezogen werden, die sich insbesondere hinsichtlich ihrer Steuerbarkeit unterscheiden. Als nicht-steuerbare Anlagen werden erzeugerseitig Photovoltaik- und Windenergieanlagen einbezogen. Verbraucherseitig gehören zu dieser Kategorie alle Anlagen, die über (Standard-)Lastprofile berücksichtigt werden, wie zum Beispiel die Verbrauchergruppe der Haushalte. Als steuerbare Anlagen werden solche Anlagen einbezogen, deren Leistungsabgabe beziehungsweise -aufnahme entweder zeitlich verschoben und/oder bezüglich des Betrags moduliert werden kann. Erzeugerseitig werden in dieser Kategorie Biogas-Blockheizkraftwerke in die Betrachtung einbezogen, während verbraucherseitig Anlagen zum Beispiel in landwirtschaftlichen Betrieben berücksichtigt werden, deren Leistungsaufnahme abhängig vom Füllstand eines zugeordneten Speichers zeitlich verschoben werden kann. Zu jeder Anlage werden die Restriktionen, wie beispielsweise Mindestlauf- und Pausenzeiten, Maximallauf- und Pausenzeiten, Füllstände der zugeordneten Speicher und die minimale Teillast berücksichtigt. Ergebnis

Projekt: Smart Microgrids
 Teilprojekt: Energiesystemtechnik (TP 2)

der durchgeführten technischen Betrachtungen sind die Anlagenfahrpläne, die sich unter Berücksichtigung der vorgegebenen Austauschleistung innerhalb des Gesamtsystems ergeben, sowie die zugehörigen Speicherkapazitäten.

Die resultierenden Austauschleistungen und Speicherkapazitäten werden verglichen, um den Beitrag der einzelnen Anreizsysteme bzw. der daraus abgeleiteten Vermarktungsstrategien zum Erreichen der technischen Ziele zu untersuchen.

Im Rahmen des Teilprojekts 4 (Betriebliche Konzepte) wurden die Biogas-Erzeugungspotenziale, sowie die Potenziale des Lastmanagements im landwirtschaftlichen Bereich durch die Hochschule Neubrandenburg erarbeitet. Landwirtschaftsbetriebe treten in den im Rahmen des Projekts betrachteten ländlichen Regionen sowohl als Energieerzeuger auf und bieten gleichermaßen das Potenzial zur Flexibilisierung eines Teils ihrer Lasten, sodass sie wichtige Akteure zum Ausgleich zwischen lokalem Energiedargebot und lokaler Nachfrage sind.

Vor diesem Hintergrund wird die erarbeitete Methodik am Beispiel eines Energiesystems bestehend aus einem Landwirtschaftsbetrieb mit energieintensiver Ferkelaufzucht, der eine Biogas-Anlage mit angeschlossenem BHKW betreibt, und einer Gemeinde mit 100 Haushalten erläutert (vgl. [13]).

	Anlage	jährliche Energie	Zeitverhalten	Leistungsbereich
Verbraucher	100 Haushalte	353 MWh	H0-SLP	13,5 – 75,6 kW
	Landwirtschaft	620 MWh	Grundlast + periodischer Verbrauch	62,2 – 108,2 kW
	2 Rührwerke	19,7 MWh	3 Stunden täglich	9 kW
	Eigenbedarf BGA	105 MWh	Grundlast	12 kW
Erzeuger	Biogas-BHKW	< 1.314 MWh	flexibel (1.500 m ³ i.N. Speicher)	50 – 100% BHKW-Nennleistung

Tabelle 1: Anlagen im betrachteten Beispielsystem (Datengrundlage: [4], [5], [6], [7])

Als Erzeuger steht im System lediglich das Biogas-BHKW zur Verfügung, welches durch die Nutzung eines Biogasspeichers im Leistungsbereich zwischen 50 und 100 % seiner Nennleistung betrieben werden kann. Verbraucherseitig werden als nicht steuerbare Lasten die Haushalte (H0-SLP) und die Grundlast des Landwirtschaftsbetrieb (Heizung und Lüftung) sowie die periodisch durchgeführte Fütterung berücksichtigt. Als steuerbare Lasten stehen die Rühr-

werke der Biogasanlage und die Mahl- und Mischanlage zur Futteraufbereitung zur Verfügung. Die im System berücksichtigten Anlagen sind in Tabelle 1 charakterisiert. Die Biogasanlage wird mit Schweinegülle aus dem Landwirtschaftsbetrieb und lokal vorhandener Maissilage betrieben.

Zur Versorgung der verschiedenen Verbraucher ergeben sich aus den vorhandenen Anreizsystemen die in Tabelle 2 dargestellten unterschiedlichen Vermarktungsoptionen.

Neben der Versorgung der Kunden direkt aus dem Biogas-BHKW werden ebenfalls der Zukauf und der Verkauf von Energie an der Strombörse berücksichtigt, wenn die dortigen Preise eine kostengünstigere Versorgung der Verbraucher erlauben. Ebenso ist eine Vermarktung von überschüssiger Energie an der Börse vorgesehen, wenn diese gegenüber der lokalen Direktvermarktung wirtschaftlich vorteilhaft ist.

	Anlage	Vermarktungsweg	Erlösmöglichkeit
Verbraucher	Haushalte	DV mit Marktprämie	Haushaltsstrompreis + Marktprämie, Einsparung Stromsteuer wegen räumlicher Nähe
	Landwirtschaft	DV mit Marktprämie	Gewerbestrompreis + Marktprämie, Einsparung Stromsteuer wegen räumlicher Nähe
	Rührwerke	Eigenverbrauch	Einsparung Netzentgelte und zugeordnete Umlagen, red. EEG-Umlage
	Börse	DV mit Marktprämie	Börsenpreis + Marktprämie

Tabelle2: Vermarktungswege der durch das Biogas-BHKW bereitgestellten Energie innerhalb des betrachteten Systems ([7], [8], [9])

Aus der betriebswirtschaftlichen Betrachtung verschiedener BHKW-Größen in Kombination mit einer Biogasanlage, die eine elektrische Dauerleistung von 150 kW ermöglicht, ergeben sich die in Abbildung 1 dargestellten Erlöse, wobei die steigenden Werte bei zunehmender installierter BHKW-Leistung im Wesentlichen durch den steigenden Erlös aus der Markt- und der Flexibilitätsprämie verursacht werden.

Projekt: Smart Microgrids
Teilprojekt: Energiesystemtechnik (TP 2)

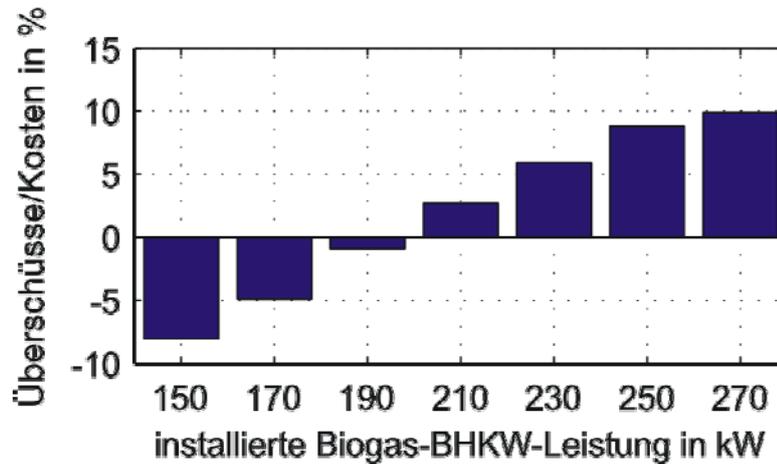


Abbildung 1: Jährliche Erlöse bezogen auf die jährlichen Kosten der Direktvermarktung an lokale Kunden und zu- und Verkauf an der Strombörse

Neben der betriebswirtschaftlichen Betrachtung wird ebenfalls der netzdienliche Lastfolgebetrieb des BHKW zur Bereitstellung einer konstanten Austauschleistung mit dem umgebenden System untersucht. Da ein BHKW mit einer installierten Leistung von 270 kW die höchsten jährlichen Überschüsse ermöglicht, wird für die technische Betrachtung ebenfalls ein BHKW mit dieser installierten Leistung angenommen.

Unter Berücksichtigung der Wirkungsgradeinbußen im Teillastbetrieb des BHKW ergibt sich eine jährlich konstante Ausspeiseleistung von 19,8 kW. Im betriebswirtschaftlich orientierten Betrieb schwankt die Austauschleistung zwischen 129 kW (Ausspeisung) und -18 kW (Energiebezug). Ohne lokale Versorgung der Verbraucher und ohne Lastmanagement der flexiblen Anlagen im Landwirtschaftsbetrieb beträgt die gleichzeitige viertelstündliche Bezugsleistung des angenommenen Systems maximal 166 kW. Somit wird durch beide betrachtete Betriebsweisen potenziell eine Netzentlastung erreicht.

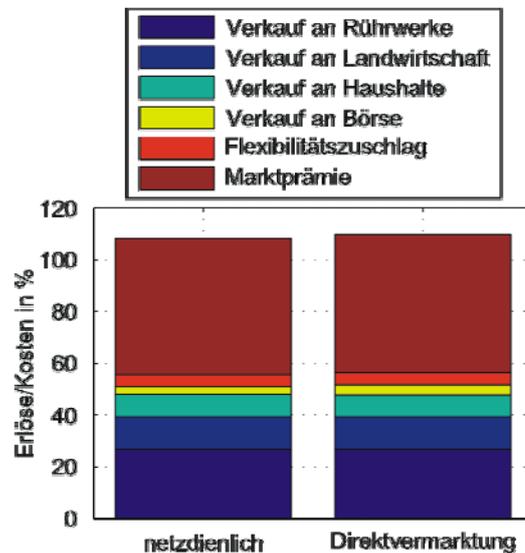


Abbildung 2. Anteile der Erlöse in Bezug auf die Kosten für den netzdienlichen Betrieb und die Direktvermarktung mit einer installierten BHKW-Leistung von 270 kW. Die geringfügig höheren Erlöse im Fall der Direktvermarktung werden durch die gesteigerten Einnahmen durch den Börsenverkauf bedingt.

Abbildung 2 stellt die erwirtschafteten Erlöse in den beiden betrachteten Fällen gegenüber. Für den netzdienlichen Betrieb werden dieselben Vermarktungswege wie für den Fall der Direktvermarktung angenommen. Der Unterschied besteht darin, dass sich der Betrieb des BHKW im netzdienlichen Fall nicht nach den Börsenpreisen richtet und dieser Anteil folglich gegenüber der betriebswirtschaftlich orientierten Direktvermarktung geringer ist. Zum Ausgleich der finanziellen Einbußen des Anlagenbetreibers durch den netzdienlichen Betrieb seiner Anlage im Energiesystem wäre im betrachteten Beispiel eine zusätzliche Vergütung von 0,31 ct/kWh erforderlich, die durch von der konstanten Austauschleistung profitierenden Akteur zu entrichten wäre.

Abbildung 3 zeigt die zeitlichen Verläufe der Anlagenleistungen für eine Woche im Juni. Das Biogas-BHKW (einziger Erzeuger im System) versorgt die Verbraucher und sorgt gleichzeitig für eine konstante Rückspeiseleistung in das überlagerte Netz. Die flexiblen Verbraucher (Mahl- und Mischanlage und beide Rührwerke) werden im Rahmen der angesetzten technischen Restriktionen (Laufzeiten, Pausenzeiten, Speicherfüllstände,...) so betrieben, dass Lastschwankungen möglichst reduziert werden.

Projekt: Smart Microgrids
Teilprojekt: Energiesystemtechnik (TP 2)

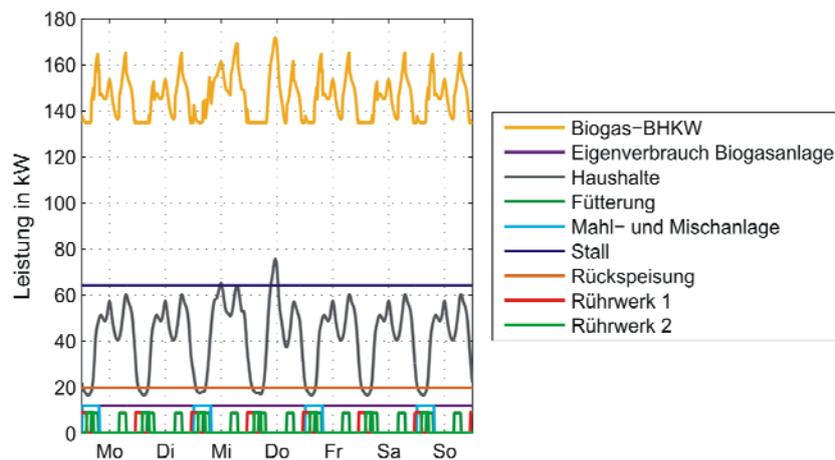


Abbildung 3: Zeitliche Verläufe der Anlagenleistungen in einer Beispielwoche im Juni. Das Biogas-BHKW ist einziger Erzeuger im System, mit einer installierten Leistung von 270 kW und einer minimalen Teillast von 135 kW. Das Biogas-BHKW versorgt die Verbraucher und ermöglicht eine konstante Rückspeisung von ca. 20 kW in das überlagerte Netz.

Die beispielhaft durchgeführte Betrachtung zeigt, dass unter den getroffenen Annahmen ein Biogas-BHKW wirtschaftlich in der lokalen Direktvermarktung im Sinne eines Smart Microgrids betrieben werden kann, wobei die erzielbaren Erlöse mit der installierten BHKW-Leistung zunehmen, da damit Marktprämie (größter Anteil der Erlöse) und Flexibilitätsprämie steigen. Die Spitzen der Austauschleistung werden in der netzdienlichen Anlagenfahrweise und in der Direktvermarktung gegenüber dem Referenzfall (ohne lokale Energiebereitstellung, ohne Lastmanagement) reduziert.

Projektstand: Innerhalb des Berichtszeitraums wurde die entwickelte Methode in der Betrachtung verschiedener Beispielsysteme umgesetzt (vgl. [10], [11], [12], [13] und [14]).

In den beteiligten Modellgemeinden haben Akteurswerkstätten unter Leitung des ecolog Instituts und mit Beteiligung der Praxispartner stattgefunden. Die Ableitung detaillierter Anwendungsfälle und Ziele für die einzelnen Gemeinden sowie die darauf aufbauende Umsetzung der entwickelten Methode und die Anpassung der vorhandenen Modelle an die Anforderungen in den Modellgemeinden stehen derzeit noch aus.

Literatur:

- [1] Energietechnische Gesellschaft im VDE (Hrsg.): VDE-Studie Dezentrale Energieversorgung 2020. Frankfurt am Main, 2007
- [2] Aichele, C.; Doleski, O.: Idee des intelligenten Energiemarktes. In: Smart Market: Vom Smart Grid zum intelligenten Energiemarkt. Wiesbaden: Springer Verlag, 2014
- [3] Bettinger, C.; Holstenkamp, L.: A systematic survey of business models for smart micro-grids under current legal and incentive conditions, ETG-Kongress 2015, 16. und 7. November 2015 in Bonn (Veröffentlichung angenommen)
- [4] FNR (Hrsg.): *Leitfaden Biogas: Von der Gewinnung zu Nutzung*. 6. Aufl. Gülzow-Prüzen: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., 2013
- [5] Eckel, H.; Büscher, W.; Feller, B. ; Fritzsche, S. ; Gaio, C.; Kämper, H. ; Neiber, J.: *Energiebedarf in der Schweine und Hühnerhaltung*. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., 2014
- [6] ASUE (Hrsg.): *BHKW-Kenndaten 2011*. Berlin, 2011
- [7] Grotholt, C.; Liesner, S.: *Die Auswirkungen von bedarfsgerechter Erzeugung auf das BHKW*. Berlin, 2013 (3. VDI-Fachkonferenz bedarfsorientierte Stromerzeugung aus Biogas und Biomethan)
- [8] Loibl, H.: Die Eigenstromnutzung nach dem EEG 2014. In: Zeitschrift für neues Energierecht (2014), Nr. 5, S. 437–440
- [9] Buchmüller, C.: Geschäftsmodelle zur regionalen Direktvermarktung von Strom aus Erneuerbaren Energien. In: Zeitschrift des Instituts für Energie- und Wettbewerbsrecht in der kommunalen Wirtschaft (2014), Nr. 1, S. 5–9
- [10] Skau K., Bettinger C., Schild V., Fuchs C. & Beck H.-P. 2015: Betriebsstrategien für Biogas-anlagen zwischen netzdienlichem und wirtschaftlich orientiertem Betrieb. 9. Rostocker Bioenergieforum. Rostock, Band 52, S.277-289, 18. und 19. Juni 2015
- [11] Skau, K., Fuchs, C., Bettinger, C., Spielmann, V., Beck, H-P. 2015: Renewable Energy – Opportunities for production and use of electrical power for farmers under conditions of the rene-

Projekt: Smart Microgrids
Teilprojekt: Energiesystemtechnik (TP 2)

- wable energy act in Germany, Proceedings of the 19th International Farm Management Association Congress, Quebec, Kanada, Peer Reviewed Papers in Proceedings Volume I, p. 429-435, 12 – 18 Juli 2015.
- [12] Spielmann, V., Bettinger, C., Skau, K., Beck, H.-P., Fuchs, C.: Auswirkungen der Anreizsysteme für private PV-Anlagenbetreiber auf das lokale Verteilnetz. In : SCHULZ, Detlef (Hrsg.): *Tagungsband Nachhaltige Energieversorgung und Integration von Speichern: NEIS 2015*. 1. Aufl. 2015, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2015 , S. 27-33
- [13] Skau, K., Bettinger, C., Spielmann, V., Fuchs, C., Beck, H-P. 2015: Speicherung von PV-Energie und Nutzung in der Milchproduktion - Netzdienlichkeit und Wirtschaftlichkeit, Posterbeitrag zur GeWiSoLa-Tagung 2015, Gießen
- [14] Spielmann, V., Bettinger, C., Skau, K., Beck, H.-P., Fuchs, C.: A highly transparent method of assessing the contribution of incentives applied to technical challenges in decentralised energy systems. In: Power Engineering Society in the VDE (ETG) (Hrsg.): *International ETG Congress 2015: Die Energiewende; blueprints for the new energy age ; proceedings; November 17 - 18, 2015, World Conference Center, Bonn. Berlin [u.a.]: VDE Verlag, 2015 (ETG-Fachberichte, 147, CD-ROM)*

Projektpartner: Ecolog Institut für sozial-ökologische Forschung und Bildung (Projektkoordination)
Energie-Forschungszentrum Niedersachsen
(ausführende Stelle: Institut für elektrische Energietechnik und Energiesysteme, TU Clausthal)
Hochschule Neubrandenburg
Leuphana Universität Lüneburg

Praxispartner:

Stadtwerke Neustrelitz

Landeszentrum für erneuerbare Energien Mecklenburg-Vorpommern

Energie Ressourcen Agentur Goslar

Volkswind Immenrode

Förderung: Bundesministerium für Bildung und Forschung

Projektlaufzeit: 01.06.2013 - 31.05.2016

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Verena Spielmann (Tel: 72-3736)
verena.spielmann@tu-clausthal.de

Projektleiter: Dr.-Ing. E.-A. Wehrmann (Tel: 72-2595)
wehrmann@iee.tu-clausthal.de

Problem: Die elektrischen Energieversorgungsnetze sind traditionell darauf ausgelegt, die von den zentralen Großkraftwerken generierte elektrische Energie zu den Endkunden zu transportieren. Monetäre Anreize durch das Erneuerbare Energien Gesetz (EEG) fördern den Ausbau der Energiewandlung aus Sonne und Wind. Daher kommt es auch im Bereich des Niederspannungsnetzes zu vermehrt dezentralen Einspeisungen. Doch zusätzlich werden neue Lasten, wie zum Beispiel Klimageräte oder Elektroautos, im Niederspannungsnetz integriert. Diese Veränderungen können eine Verletzung des zulässigen Spannungstoleranzbandes hervorrufen und fordern daher einen Ausbau dieser Netzebene. Nach Norm (DIN EN 50 160) wird zwischen Mittelumspannung und Hausanschluss eine Toleranz von $\pm 10\% U_N$ (Nennspannung) gewährt. Dieses kann netzplanerisch vom Verteilnetzbetreiber beliebig auf die Mittel- und Niederspannungsebene aufgeteilt werden. Um Spannungsbandverletzungen zu vermeiden, haben Verteilnetzbetreiber verschiedene Möglichkeiten. Einerseits kann durch Netzverstärkungsmaßnahmen, wie das Verlegen größerer Kabelquerschnitte oder der Austausch von Transformatoren durch leistungsstärkere, die Kurzschlussleistung des Netzes erhöht und folglich die Netzurückwirkungen in Form von kritischen Spannungsänderungen reduziert werden. Eine weitere Möglichkeit ist die Netzintegration eines regelbaren Transformators in die Ortsnetzstationen, der über einen Laststufenschalter die sekundärseitige Spannung (Niederspannung) unterbrechungsfrei einstellen kann und für die Einhaltung des zulässigen Spannungstoleranzbandes sorgt.

Für die Untersuchungen in zwei Ortsnetzen förderte die Avacon AG in den Gemeinden Weyhe und Stuhr insgesamt 30 Haushalte bei der Anschaffung von Photovoltaikanlagen, Klimageräten und dem Leasing von Elektrofahrzeugen. Auch entsprechende Investitionen in die Netzinfrastruktur (Messtechnik, Smart-Meter etc.) wurden getätigt, sowie die Ortsnetzstationen mit regelbaren Transformatoren (rONT) ausgestattet.

Das Projekt ist im Jahr 2013 um drei Jahre verlängert worden, und in diesem Rahmen wurden auch PV-Hausspeichersysteme als neue Technologie mit aufgenommen und im Rahmen des Projektes untersucht.

Ziel: Das Forschungsvorhaben zielt darauf ab, Planungsgrundsätze für die zukünftigen Anforderungen der Niederspannungsnetze zu erarbeiten. Für die notwendigen Untersuchungen stellt die Avacon AG zwei reale Versuchsnetze zur Verfügung.

Das Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme beschäftigt sich im Rahmen des e-home Energieprojektes in erster Linie mit der Auslegung und Netzintegration eines regelbaren Ortsnetztransformators zur Spannungsregelung im Niederspannungsnetz. In Kooperation mit den Projektpartnern wurden die notwendigen technischen Daten eines regelbaren Ortsnetztransformators mit zugehörigem Laststufenschalter bereits ermittelt. Ebenfalls werden ein geeigneter Regelalgorithmus für den Mono- und den Multisensorbetrieb und die entsprechende Reglerparametrierung herausgearbeitet, um zukünftig durch den Einsatz von regelbaren Ortsnetztrans-

formatoren die Einhaltung der Spannungstoleranzen zu gewährleisten und die Anschlusskapazität an das bestehende Niederspannungsnetz ohne weitere Netzausbaumaßnahmen zu erhöhen.

Stand der Technik: Regelbare Ortsnetztransformatoren sind mittlerweile am Markt verfügbar. Im Projekt werden die regelbaren Ortsnetztransformatoren der Maschinenfabrik Reinhausen eingesetzt, welche eine Stufenbreite von 2,5 % der Nennspannung (U_N) und neun Stufen besitzen und folglich einen gesamten Regelbereich von 20 % der Nennspannung abdecken. Überwiegend werden die regelbaren Ortsnetztransformatoren im Monosensorbetrieb betrieben. Der Istwert des Reglers wird dabei direkt an der Niederspannungs-Sammelschiene des Transformators erfasst. Diese Spannung wird durch den Regler im definierten Reglertotband (z.B. $\pm 2 \% U_N$) gehalten. Hierdurch ergeben sich zusätzliche netzplanerische Freiheiten für das Niederspannungsnetz in Bezug auf den Spannungshub bzw. –fall.

Lösungsweg: Durch den Einsatz regelbarer Transformatoren in den Ortsnetzstationen können die Spannungsfluktuationen durch dezentrale Erzeugereinheiten, wie auch durch zusätzliche Lasten, ausgeregelt werden. Folglich wird die Anschlusskapazität von dezentralen Erzeugereinheiten und zusätzlichen Lasten ohne weitere konventionelle Netzausbaumaßnahmen erhöht. Beim Monosensorbetrieb wird die Mittelspannungsfluktuation ausgeregelt, sodass das Niederspannungsnetz netzplanerisch vom Mittelspannungsnetz hinsichtlich des Spannungstoleranzbandes nach DIN EN 50 160 von $\pm 10\% U_N$ entkoppelt ist und dieses abzüglich des Reglertotbandes voll im Niederspannungsnetz zur Verfügung steht.

Beim Multisensorbetrieb können zusätzliche im Netz eingesetzte Spannungsmessstellen berücksichtigt werden, um auch diese Knoten in das zulässige Spannungstoleranzband durch geeignete Stufungen des rONT zu regeln.

Projektstand: In den ersten beiden Projektjahren wurde die notwendige Konfiguration des regelbaren Ortsnetztransformators (rONT) ermittelt. Hierbei ergab sich nach Auswertung von Spannungsmesswerten aus Mittel- und Niederspannungsnetzen, sowie der Fortführung der Überlegung zur Abhängigkeit der Stufenbreite, der Stufenanzahl und der sich ergebenden Freiheiten für den netzplanerischen Spannungshub aus der Orientierungsstudie [1] ein notwendiger Gesamtregelbereich von 21,5% U_N bei elf Stufen und einer Stufenbreite von 2,15% U_N . Des Weiteren wurden verschiedene Regelalgorithmen des Monosensorbetriebes in der Netzrechnungssoftware DIgSILENT Power Factory implementiert und hinsichtlich Flickerstärke, Stufhäufigkeit und Spannungsextrema an den Netzknoten miteinander verglichen. Außerdem wurden die Wechselwirkungen mit der Q(U)-Regelung von Wechselrichtern untersucht, wobei sich keine negativen Rückkopplungen ergaben, sondern der rONT hinsichtlich des Stufverhaltens geringfügig entlastet wurde. [2]

Im dritten Projektjahr wurde die Thematik Multisensorbetrieb untersucht, mit dem Ziel einen geeigneten Regelalgorithmus zu entwickeln und zu erproben, sowie den durch diese Betriebsart zusätzlich vermiedenen konventionellen Netzausbau anhand von Beispielnetzstrukturen zu ermitteln. In den Niederspannungsnetzstrukturen des Projektpartners stellte sich diese Betriebsart jedoch als Einzelfallentscheidung heraus, da bei den durchschnittlichen Leitungslängen und Erhöhung der Durchdringung dezentraler Einspeisung nach einem rONT Einsatz im Monosensorbetrieb eine Leitungsverstärkung aufgrund der thermischen Belastungsgrenzen (Stromtragfähigkeit) durchgeführt werden musste. Der Multisensorbetrieb kann daher bei Niederspannungsnetzstrukturen mit langen Ausläuferleitungen und zeitlich unterschiedlicher Belastung (Last/Erzeugung) eingesetzt werden. [3], [4]

Aufgrund der Erkenntnisse aus dem dritten Projektjahr wurden im vierten Projektjahr weitere alternative Regelungskonzepte untersucht. Hierzu zählt auch der Monosensorbetrieb mit variabler Sollwertvorgabe in Abhängigkeit der gemessenen Solarstrahlung, da die dezentrale Einspeiseleistung durch PV-Anlagen und der damit verbundene Spannungshub im Netz mit der Solarstrahlung korreliert und somit mit im Vergleich zum Multisensorbetrieb wenig Zusatzaufwand das bestehende Netz hinsichtlich der Spannungstoleranzen besser ausgenutzt werden kann. Außerdem ergibt sich die Möglichkeit, die Spannung in lastgeprägten Zeiten an der Ortsnetzstation hochzusetzen, um somit bei überwiegend nichtlinearen Lasten die Netzverluste zu reduzieren. [5]

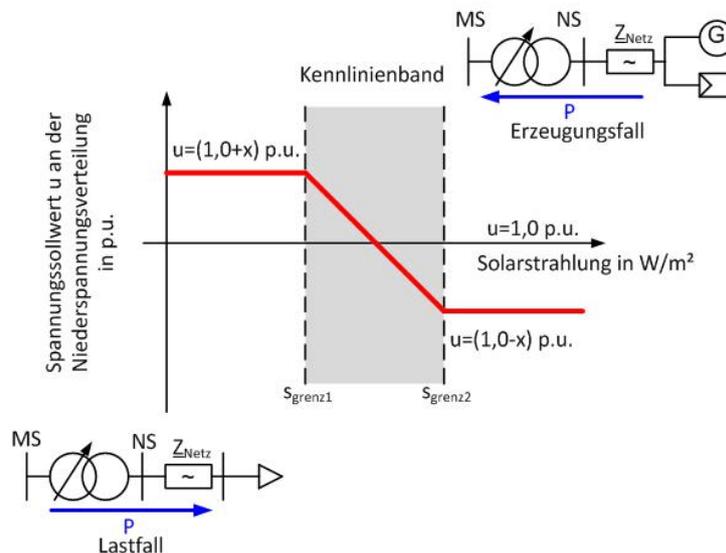


Abbildung 1: Kennlinie zur variablen Sollwertvorgabe in Abhängigkeit der (gemessenen) Solarstrahlung

Das fünfte Projektjahr beinhaltet aus diesem Grund die Untersuchung der zusätzlichen Verluste regelbarer Ortsnetztransformatoren und der Netzverluste in Kooperation mit dem Institut für Hochspannungstechnik und Elektrische Energieanlagen der Leibniz-Universität Hannover. Das Ziel ist, einen Vergleich der Verluste zu ermöglichen, um zukünftig durch eine geeignete Regelung des rONT die gesamten Verluste des Gesamtsystems (rONT und Niederspannungsnetz) zu reduzieren.

Weiterhin ist geplant, die Regelung des rONT, mit dem ursprünglich am IEE für das Mittelspannungsnetz entwickelten Knotenlastbeobachter (KLB), zu erweitern, um auch nicht messtechnisch erfasste Netzknoten im Regelalgorithmus berücksichtigen zu können.

- Publikationen:**
- [1] Werther, B.; Becker, A.; Wehrmann, E.-A.; zum Hingst, J.; Beck, H.-P.; Orientierungsstudie regelbare Ortsnetztransformatoren; Band 6 der EFZN Schriftenreihe, Cuvillier-Verlag Göttingen
 - [2] Schnieder, R.; Wehrmann, E.-A.; Beck, H.-P.; Untersuchung verschiedener Regelungskonzepte für regelbare Ortsnetztransformatoren zur Spannungshaltung in Niederspannungsverteilsnetzen; Konferenz für Nachhaltige Energieversorgung und Integration von Speichern (NEIS), Hamburg, (12.-13. September 2013)
 - [3] Becker, A.; Lühn, T.; Mohrmann, M.; Schlömer, G.; Schmidtman,

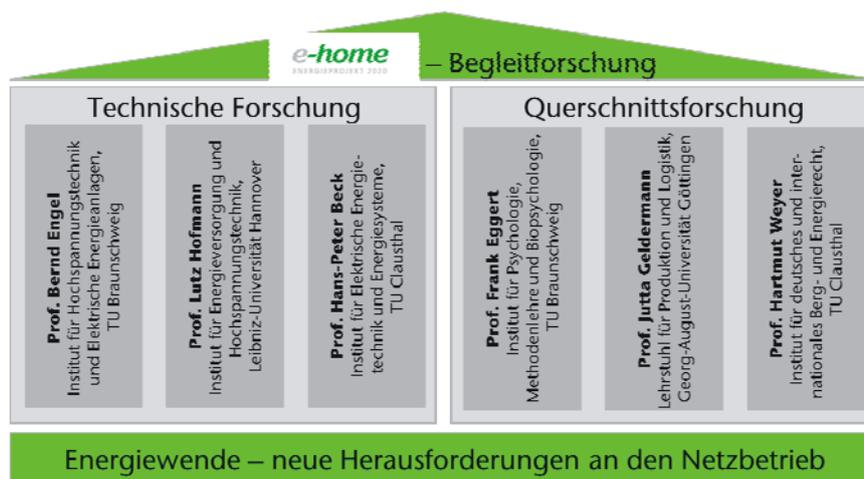
Projekt: e-Home Energieprojekt 2020

G.; Schneider, D.; Schnieder, R. unter Beteiligung von Hofmann, L.; Beck, H.-P.; Geldermann, J.; Weyer, H.;
 Netzausbauvarianten in Niederspannungsverteilnetzen – Regelbare Ortsnetztransformatoren in Konkurrenz zu konventionellen Netzausbaumaßnahmen; Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrum Niedersachsen, Cuvillier Verlag Göttingen, ISBN 978-3-95404-757-4, 2014

- [4] Schnieder, R.; Wehrmann, E.-A.; Beck, H.-P.; Spannungsregelung in Niederspannungsverteilnetzen durch regelbare Ortsnetztransformatoren im Mono- und Multisensorbetrieb
 Konferenz für Nachhaltige Energieversorgung und Integration von Speichern (NEIS), Hamburg, (18.-19. September 2014)
- [5] Schnieder, R.; Wehrmann, E.-A.; Beck, H.-P.; Einsatzmöglichkeiten regelbarer Ortsnetztransformatoren zur Spannungshaltung und Netzverlustreduzierung in Niederspannungsverteilnetzen
 Konferenz für Nachhaltige Energieversorgung und Integration von Speichern (NEIS), Hamburg, (10.-11. September 2015)

Projektpartner am EFZN:

Transdisziplinärer Forschungsansatz des Energieforschungszentrum Niedersachsen (EFZN):



in freundlicher Zusammenarbeit mit der Avacon AG, Helmstedt.

Projekthomepage: www.ehomeprojekt.de

Projektlaufzeit: 01.11.2010 - 30.06.2016

Gefördert durch:



Bearbeiter: Dipl.-Ing. Raimund Schnieder (Tel: 72-3597)
raimund.schnieder@tu-clausthal.de

Projektleiter: Dr.-Ing. E.-A. Wehrmann (Tel: 72-2595)
wehrmann@iee.tu-clausthal.de

Projekt: Smart Nord TP 5 “Systemtheorie für aktive Verteilnetze”

Zielsetzung des Forschungsverbundes: „Smart Nord – Intelligente Netze Norddeutschland“ ist ein vom Niedersächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kultur (MWK) geförderter, interdisziplinärer Forschungsverbund aus sechs Teilprojekten, die sich im Kontext des Niedersächsischen Energiekonzepts bewegen.

Ziel des TP 5: Der stabile Netzbetrieb, im Sinne von Frequenz und Spannungsstabilität, soll auch zukünftig, trotz erhöhter dezentraler Erzeugung bei gleichzeitigem Wegfall konventioneller Kraftwerksleistung, gewährleistet werden. Wenn die dafür notwendigen Systemdienstleistungen durch dezentrale Anlagen erbracht werden sollen, hat dies zur Folge, dass diese Systemdienstleistungen aus dem Verteilnetz zu erbringen sind. Damit sind die Erzeugungseinheiten, mit ihrer volatilen Einspeisung so zu regeln, dass eine stabilisierende Wirkung für das Gesamtsystem erreicht wird. Bezogen auf ein Verteilnetz, das diese Anforderungen erfüllt, liegt es nahe, sich die Frage zu stellen, ob ein solches Netz dann auch autonom (z.B. bei Ausfall des überlagerten Netzes) geführt werden kann.

Aus diesen Überlegungen ergibt sich die Forschungsfrage des Projektes.

- Wie kann der stabile Netzbetrieb aktiver Verteilnetze (MicroGrids) netzparallel und autonom sichergestellt werden?

Diese beiden Forschungsfragen wurden neben dem Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme von verschiedenen Projektpartnern bearbeitet (siehe Abschnitt Projektpartner).

Erzielte Ergebnisse: Das Teilprojekt 5 des Forschungsverbundes wurde von fünf Instituten auf drei Arbeitspakete aufgeteilt bearbeitet. Es wurden entsprechend eine Vielzahl von Ergebnissen erzielt. In diesem Teil des Jahresberichts werden exemplarisch zwei Resultate vorgestellt. Zusätzlich finden Sie in diesem Jahresbericht den Beitrag „Inselnetzerkennung im Rahmen des Smart Nord Projektes“ auch diese Ergebnisse wurden im Rahmen des Teilprojektes 5 erarbeitet. Eine vollständige Übersicht über die erzielten Ergebnisse des Projektes können dem allgemein zugänglichen Abschlussbericht entnommen werden. Dieser ist über die Internetseite des Forschungsverbundes www.smartnord.de verfügbar.

Eine Anforderung, die sich das Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme und seine Projektpartner gestellt haben, war, dass die theoretischen Ergebnisse durch Laborversuche validiert werden sollten. Dazu wurde die bestehende Infrastruktur des „Labors für aktive Verteilnetze“ im Energie-Forschungszentrum Niedersachsen wie folgt erweitert:

- Aufbau von acht Netzersatzelementen mit denen typische Leitungskonfigurationen des Verteilnetzes nachgebildet werden können; diese sind frei verschaltbar, so dass beliebige Netztopologien möglich sind.
-

- Aufbau einer Messinfrastruktur, die alle drei Phasen jeder Spannung und jedes Stromes im Versuchsnetz erfasst.
- Ergänzung des Netzes um zusätzliche Erzeugungsanlagen.

Ein Überblick über die durchgeführten Erweiterungen ist in Abbildung 1 zu sehen. Dort sind die ursprünglich vorhandenen und neuen Komponenten in einer Beispielanordnung dargestellt.

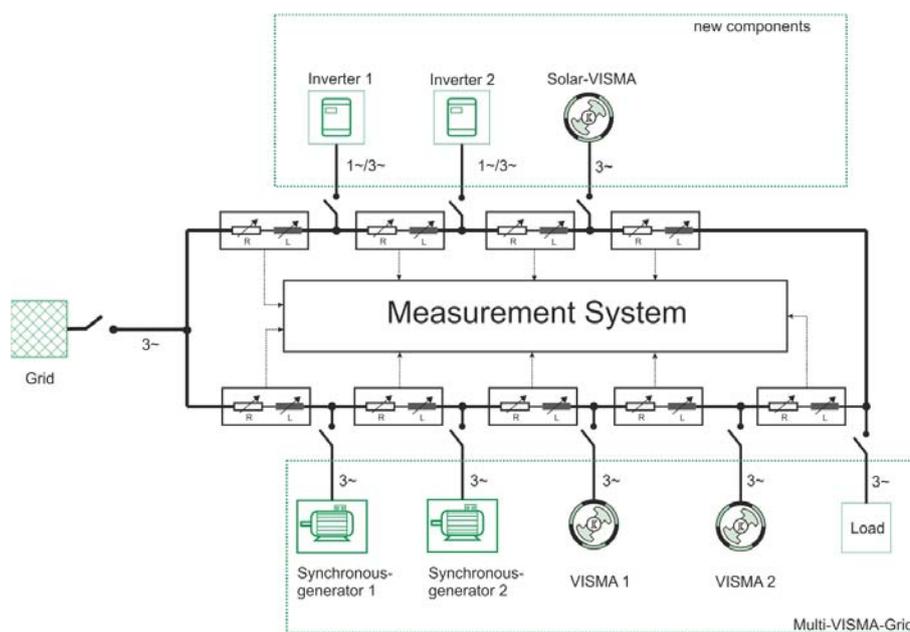


Abbildung 1: Beispielanordnung des Labors für aktive Verteilnetze mit den neu hinzugekommenen Komponenten

Die Dimensionierung der Netzersatzelemente wurde so gewählt, dass der die Spannungsabfälle den realen Gegebenheiten (Spannungsmaßstab 1:1) eines Niederspannungsnetzes entsprechen. Die Ströme durch die die Spannungsabfälle verursacht werden, sind um den Faktor 10 kleiner skaliert als in einem realen Netz (Strommaßstab 1:10). Damit ist der Leistungsmaßstab 1:10. Hintergrund für dieses Vorgehen ist das so im Laborbetrieb auch Grenzbereiche erreicht werden können und die Effekte des nicht idealen Aufbaus (Übergangswiderstände etc.) reduziert werden konnten. Abbildung 2 zeigt den Aufbau der Ersatzelemente, und deren Verhalten im Betrieb.

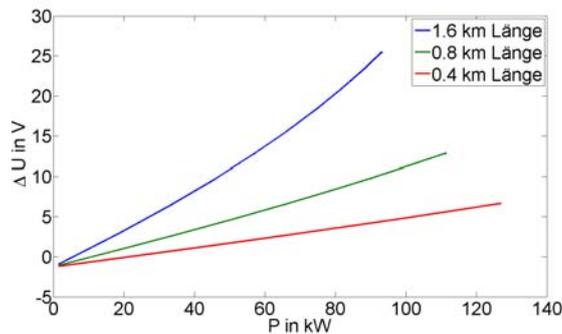
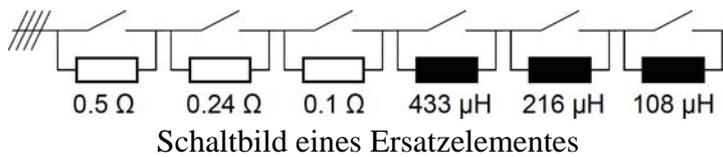


Abbildung 2: Rechts: Schaltschrank der acht netzersatzelemente

Links: Schaltbild eines Ersatzelementes (oben)

Messung an einer Leitungsnachbildung (unten), Spannungsmaßstab: 1:1, Leistungsmaßstab: 1:10)

Die besondere Herausforderung eines Micro-Grids, liegt darin, dass sowohl der Netzparallelbetrieb (on-grid) als auch der Inselnetzbetrieb (off-grid) beherrscht werden muss. Im Falle eines Wechsels vom on-grid in den off-grid Betrieb ist neben der notwendigen Stabilität auch die Möglichkeit einer stationär genauen Frequenzvorgabe ein wichtiges Kriterium. Dabei ist aus Effizienzgründen darauf zu achten, dass bei mehreren dezentralen Anlagen die Last entsprechend der Leistungsfähigkeit aufgeteilt wird. Für solche Zwecke ist ein Lastverteiler mit einer Kommunikationseinrichtung notwendig. Dieser muss so robust sein, dass auch im Falle eines Kommunikationsausfalls die Sollwerte stationär genau eingehalten werden. Im Rahmen dieses Projektes wurde ein solcher dezentraler Lastverteiler erprobt. Die Funktion wird an dem in Abbildung 3 zu sehenden Beispielnetz illustriert

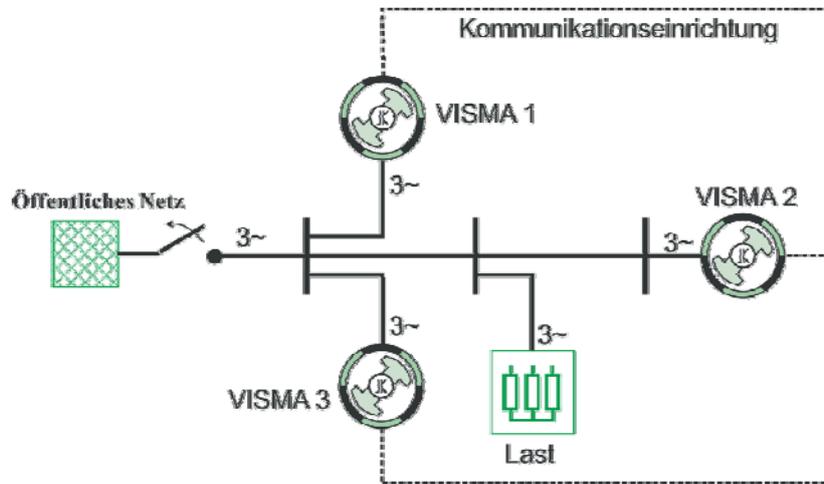


Abbildung 3: Versuchsanordnung für die Verteilte Frequenzregelung

Das oben dargestellte Netz besteht aus einer Last die von drei Virtuellen Synchronmaschinen (VISMA) versorgt wird. Jede der einzelnen VISMA-Systeme ist mit einem in Abbildung 4 gezeigten Frequenzregler ausgestattet. Dieser besitzt einen I-Anteil, der für stationäre Genauigkeit sorgt, auch wenn die Kommunikation mit den anderen Anlagen ausfällt, und einem P-Anteil der die Lastaufteilung bestimmt. Dieser ist von einer funktionierenden Kommunikationseinrichtung abhängig.

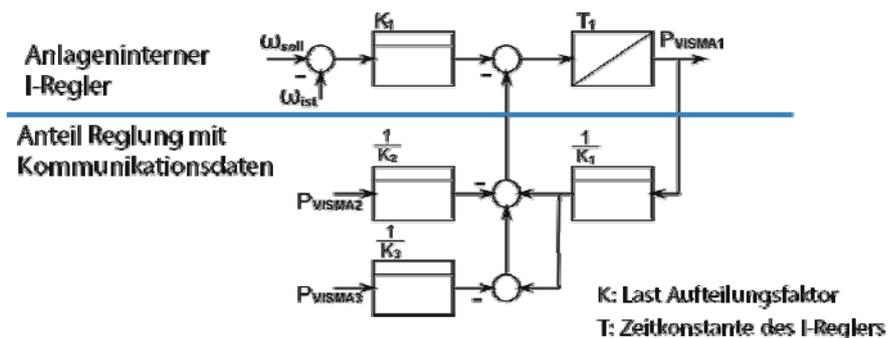


Abbildung 4: Implementierte Frequenzregelung der VISMA 1

Wenn der Schalter aus Abbildung 3 geöffnet wird ($t=2$ s) und die dezentrale Frequenzregelung zu wirken beginnt, übernehmen die einzelnen Anlagen abhängig von ihrer Reaktionsgeschwindigkeit einen Teil der Leistung (siehe Abbildung 5). Die daraus resultierende Leistungsaufteilung ist zunächst zufällig. Im rechten Teil Abbildung 5 ist die Frequenz dargestellt. Es ist zu erkennen, dass diese innerhalb weniger Sekunden ihren Sollwert erreicht und dieser gehalten wird, während die Lastaufteilung in einem kontinuierlichen Prozess über einen längeren Zeitraum erfolgt.

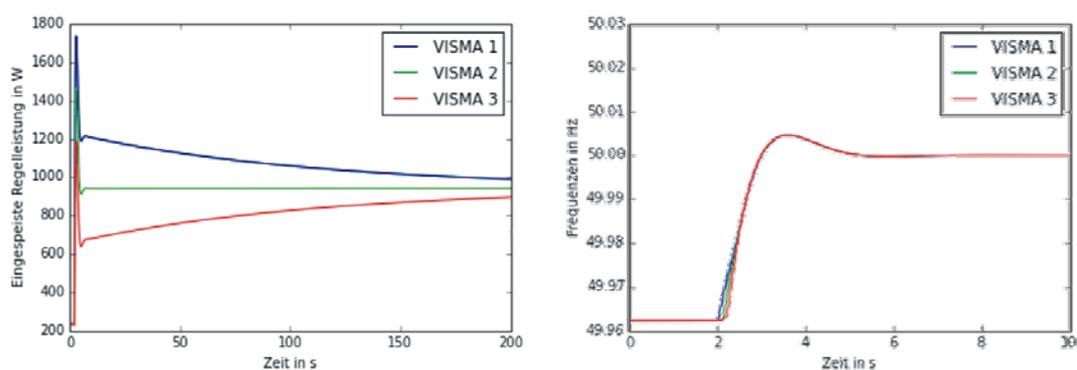


Abbildung 5: Dezentrale Lastaufteilung bei Inselnetzbildung (off grid Betrieb)
Einspeiseleistung der VISMA-Systeme (links)
Frequenz der VISMA-Systeme (rechts)

In verschiedenen Untersuchungen konnte die Robustheit dieses Regelungskonzeptes nachgewiesen werden.

Förderung: Das Niedersächsische Ministerium für Wissenschaft und Kultur

Projektpartner: TU-Clausthal:
- Institut für elektrische Informationstechnik (IEI)
Universität Oldenburg:
- Institut für Turbulenz, Windenergie und Stochastik(TWIST)
- Institut für Energie- und Halbleiterforschung (IEH)
- Institut für computerorientierte theoretische Physik (ISTP)

Homepage des

Forschungsverbundes: <http://www.smartnord.de>

Bearbeiter: Mehrnaz Anvari (TWIST)
Yong Chen (IEE)
Timo Dewenter (ISTP)
Wiebke Heins (IEI)
Gerald Lohmann (IEH)
Christoph Norrenbrock (ISTP)
Florian Pöschke (IEE)
Katrín Schmietendorf (TWIST)
Benjamin Werther (IEE)

Projektleiter des TP: Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Beck
info@iee.tu-clausthal.de

Problem: Bei der Errichtung von Mobilfunkbasisstationen an entlegenen Standorten mit großer Entfernung zum öffentlichen Energieversorgungsnetz, entstehen typischerweise hohe Kosten für den Netzanschluss. Eine Alternative zum Betrieb dieser Stationen am öffentlichen Netz stellt die im Wesentlichen auf regenerativen Energiequellen basierende energieautarke Versorgung dar.

Im Rahmen des Projekts werden durch die Firma E-Plus mehrere energieautarke Mobilfunkstandorte aufgebaut. Die Energieversorgung wird primär durch eine am Mobilfunkmast montierte horizontallaufende Kleinwindenergieanlage und durch eine zweiachsig nachgeführte Photovoltaikanlage sichergestellt. Eine Hauptkomponente des Systems stellt ein Energiespeicher (Bleibatterie) dar, der den Ausgleich zwischen der gelieferten Energie der Windenergie- und der Photovoltaikanlage und dem Energiebedarf des Mobilfunksystems herstellt. Als Back-Up-System werden zwei parallel arbeitende PEM-Brennstoffzellen eingesetzt, die Energie aus in Flaschenbündeln angeliefertem Wasserstoff bereitstellen, sobald der Energiespeicher einen minimalen Ladezustand unterschreitet.

Ziel: Ziel des Projektes ist die Analyse der Betriebsmittelauslastung und der Betriebsstrategien innerhalb der energieautarken Anlagen. Die resultierenden Ergebnisse werden für die Erarbeitung von Auslegungs- und Betriebsstrategien derartiger Systeme genutzt.

Weiterhin wird die Möglichkeit der Einbindung eines Elektrolyseurs zur Erhöhung der Gesamtauslastung der Anlagen untersucht. Der Einsatz des Elektrolyseurs könnte insgesamt einen autarken Betrieb ermöglichen, da Wasserstoff aus überschüssig vorhandener Energie vor Ort hergestellt werden würde und dadurch den angelieferten Wasserstoff ersetzt.

Lösungsweg: An den Mobilfunkstandorten werden die energietechnischen Messwerte intern erfasst und dem IEE durch den Anlagenbetreiber zur Verfügung gestellt. Erfasst und bereitgestellt werden die Leistungen der einzelnen Systemkomponenten sowie die Umgebungsbedingungen, wie die Temperatur, die Globalstrahlung und die Windgeschwindigkeit.

Die Analyse dieser Daten liefert Aussagen über den Betrieb des Systems am gewählten Standort und die Eignung des Standortes selbst. Für die beiden Standorte in Versmold-Loxten und Büren deutet die bisherige Datenauswertung drauf hin, dass die dortigen Standortbedingungen für den Betrieb der Windenergieanlage wenig geeignet sind. Weiterhin ist der geringe Beitrag der Windenergieanlage zum Gesamtenergiebedarf des Systems teilweise auch durch häufige Ausfälle der Anlage, bedingt durch technische Probleme, zu erklären.

Erarbeitung von Auslegungsstrategien: Es wurde ein kennlinienbasiertes Modell (Aufbau vgl. Abbildung 1) für einen energieautarken Mobilfunkstandort erarbeitet, welches sich sowohl für die Untersuchung bestehender Standorte eignet, als auch für die Abschätzung geeigneter Anlagenkomponenten (Leistungsklasse beziehungsweise Kapazität) an möglichen weiteren Standorten, wobei die dort vorherrschenden Umgebungsbedingungen (Windgeschwindigkeit,

Temperatur und Globalstrahlung) als Eingangsgrößen verwendet werden.

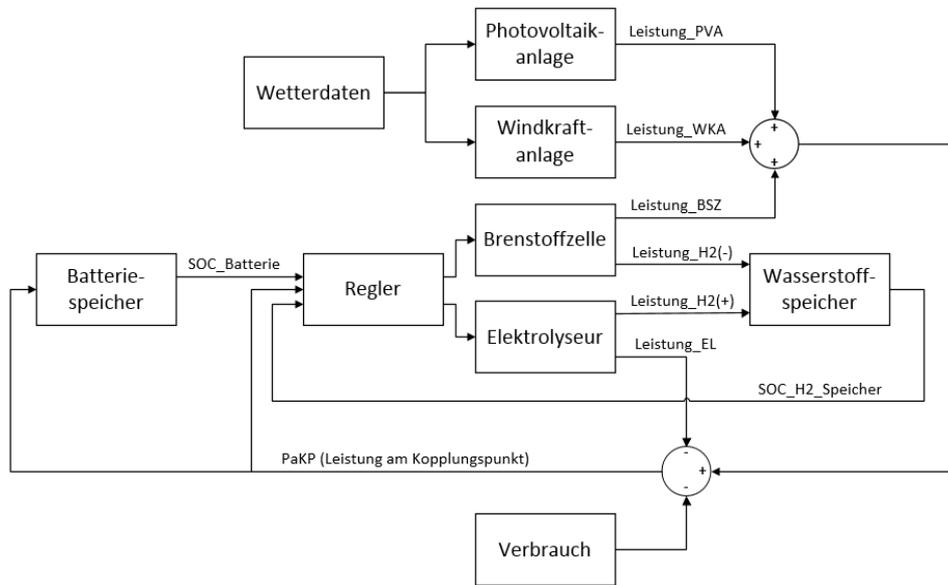


Abbildung 1: Aufbau des kennlinienbasierten Modells zu Auslegung von energieautarken Mobilfunkbasisstationen (Projektarbeit Tkalcec, Erichsen, IEE 2015)

Abbildung 2 zeigt die Leistungsverläufe für eine Systemauslegung mit etwa gleicher installierter Leistung von Photovoltaik und Windenergieanlage. Der Elektrolyseur wird zur Speicherung überschüssiger Energie in Form von Wasserstoff in der Übergangszeit betrieben.

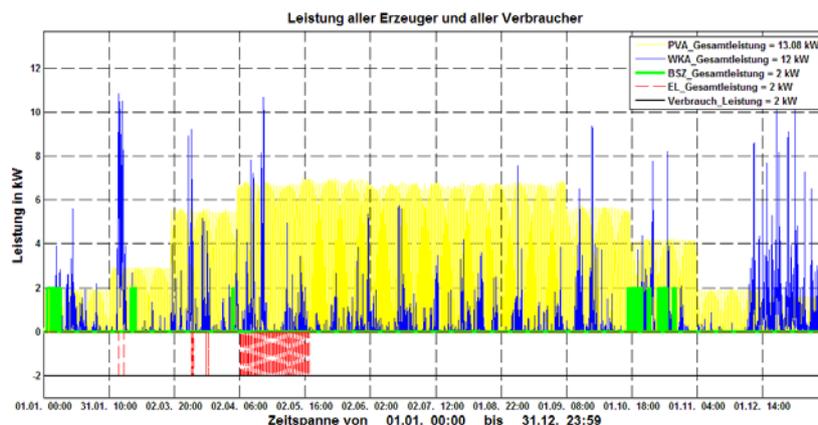


Abbildung 2: Zeitverläufe der Leistung der verschiedenen Systemkomponenten für eine beispielhafte Auslegung mit Einsatz eines Elektrolyseurs (Projektarbeit Tkalcec Erichsen, IEE 2015)

Bewertung von Betriebsstrategien: Es wurde ein energiemengenbasiertes Modell erarbeitet, welches für die Bewertung der verwendeten und die Erarbeitung neuer Betriebsstrategien geeignet ist. Derzeit wird ein weiteres kennlinienbasiertes Modell für diesen Zweck anhand realer Betriebsdaten der Standorte verifiziert.

In Tabelle 1 sind die Kennzahlen verschiedener Betriebsstrategien aufgeführt, die sich im Wesentlichen durch den Betriebsbereich der Batterie und die zugeordneten Schaltkriterien der Brennstoffzelle unterscheiden.

Tabelle 1: Kennzahlen verschiedener betrachteter Betriebsstrategien

Strategie	Start SoC Batterie	Anschaltkriterium Brennstoffzelle	Abschaltkriterium Brennstoffzelle	Leistung Brennstoffzelle
Betrieb A 1	50 %	40 % SoC Batterie	Mindestlaufzeit 30 min und Batterie SoC 53 %	2.300 W
Betrieb A 2	50 %	40 % SoC Batterie	Mindestlaufzeit 60 min und Batterie SoC 53 %	2.300 W
Betrieb A 3	50 %	40 % SoC Batterie	Mindestlaufzeit 20 min und Batterie SoC 53 %	2.300 W
Betrieb A 4	50 %	40 % SoC Batterie	Batterie SoC 80 %	2.300 W
Betrieb A 5	50 %	40 % SoC Batterie	Mindestlaufzeit 30 min und Batterie SoC 53 %	3.200 W (bester Wirkungsgrad)
Betrieb A 6	50 %	30 % SoC Batterie	Mindestlaufzeit 30 min und Batterie SoC 60 %	2.300 W

Abbildung 3 zeigt den Vergleich des Brennstoffzellenbetriebs in den verschiedenen, in Tabelle 1 aufgeführten, Betriebsstrategien. Vorteile ergeben sich für Strategien, in denen die Batterie über einen größeren SOC-Bereich betrieben wird. Dadurch werden der Wasserstoffverbrauch, die Betriebszeit und die Startvorgänge der Brennstoffzelle deutlich reduziert. Gleichzeitig wird die Batterie nur unwesentlich stärker belastet und ungenutzte Überschüsse innerhalb des Systems deutlich verringert.

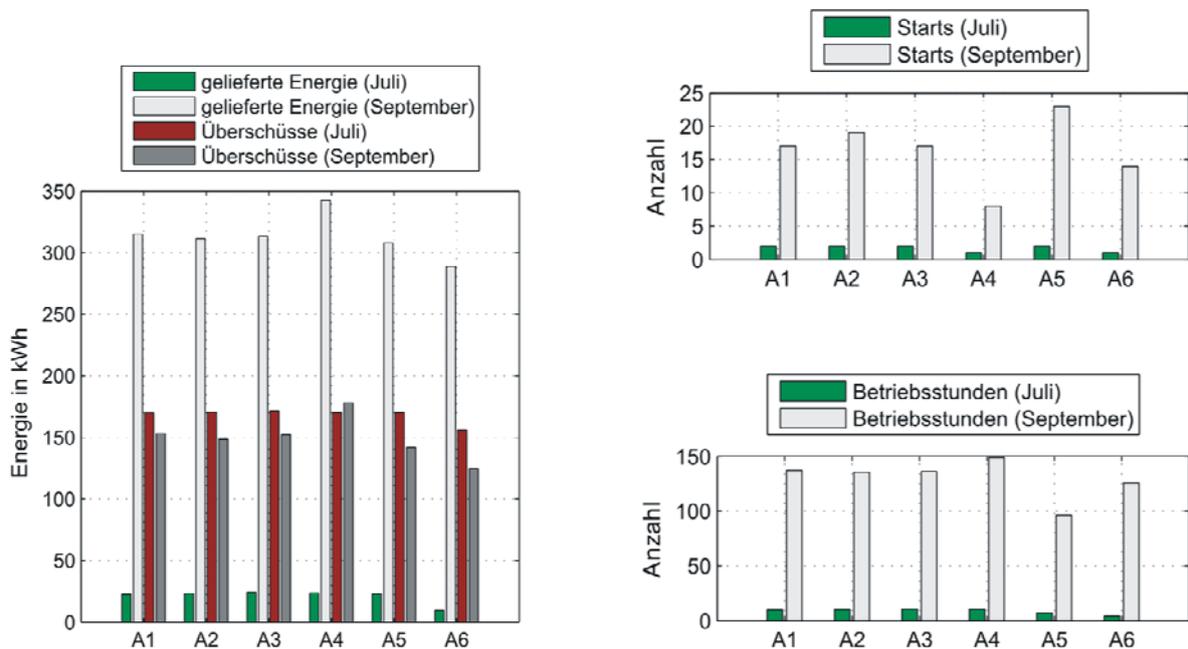


Abbildung 3: Auswertung des Brennstoffzellenbetriebs in den verschiedenen, in Tabelle 1 vorgestellten Betriebsstrategien, für die Monate Juli und September 2014 am Standort Büren. Links: gelieferte Energiemengen und ungenutzte Erzeugungsüberschüsse. Rechts oben: Anzahl der Startvorgänge der Brennstoffzelle. Rechts unten: Betriebsstunden der Brennstoffzelle.

Projektstand: An den Standorten Vermold-Loxten (Ende 2011) und Büren (Anfang 2013) sind bereits zwei autarke Mobilfunkstationen realisiert und im Mobilfunknetz der Firma E-Plus betrieben. Im Jahr 2015 wurde in Waldfeucht ein weiterer Standort durch die Firma Hoppecke in Betrieb genommen. Bisher liegen für diesen Standort noch keine Messdaten seitens der Firma E-Plus vor.

Am Standort Vermold-Loxten wurde im Sommer 2013 das bis dahin nicht zuverlässig funktionstüchtige Messsystem ausgetauscht, sodass erst ab Oktober 2013 Messdaten für diesen Standort vorliegen. Für den Standort Büren liegen seit Mai 2013 kontinuierlich Messdaten vor. Für beide Standorte sind die Messdaten allerdings (noch) nicht konsistent und können deshalb nur bedingt für die Validierung der Modelle herangezogen werden. Aus diesem Grund wurden die Auslegungsstrategien mit öffentlich zugänglichen Wetterdaten erprobt.

Projektpartner: Das Projekt wird in Kooperation mit der Firma E-Plus Mobilfunk GmbH durchgeführt, die die energieautarken Mobilfunkstandorte errichtet und betreibt.

Projekt: Energieautarke Mobilfunkbasisstationen

Projektlaufzeit: 01.01.2010 - 30.06.2016

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Alexander Oberland
alexander.oberland@tu-clausthal.de (Tel:72-2938)

Dipl.-Ing. Verena Spielmann
verena.spielmann@tu-clausthal.de (Tel:72-3736)

Projektleiter: Dr.-Ing. E.-A. Wehrmann (Tel: 72-2595)
wehrmann@iee.tu-clausthal.de

IEE

Problem: Durch die verstärkte Durchdringung von Energieversorgungsnetzen mit dezentralen Einspeisungen mussten die Netzanschlussbedingungen angepasst werden. Früher sollten sich die Einspeiser vom Verteilnetz trennen, sobald nennenswerte Störungen auftraten (z. B. 50,2 Hz-Problematik). Dieses Verhalten ist aufgrund der Systemrelevanz von dezentralen Erzeugungsanlagen (DEA) mittlerweile nicht mehr sinnvoll. Robustere Netzanschlussbedingungen, also der Weiterbetrieb der DEA, sorgen per P(f)- und Q(U)-Regelungen für ein frequenz- und spannungsstützendes Verhalten der DEA.

Dies führt dazu, dass nicht nur das Verbundnetz, sondern auch kleinere isolierte Teilnetze einen ausgeglichenen Blind- und Wirkleistungshaushalt aufweisen können. Sofern genügend Erzeugungskapazität vorhanden ist, können diese Subnetze zum Beispiel nach einer Schutzauslösung als Insel (auch unbeabsichtigt) weiterlaufen. Vorhandene Erzeugungsüberschüsse werden abgeregelt und die Insel kann sich in einem stabilen Zustand fangen, d.h. es kann sich ein veränderter Arbeitspunkt bzgl. Netzfrequenz und Netzspannung einstellen, der sich aber noch im zulässigen Bereich bewegt.

Ein Problem liegt darin, dass bei einer automatischen Wiedereinschaltung (AWE) die Möglichkeit besteht, dass ein Leistungsschalter eine bestehende Insel unsynchron auf das Netz zuschaltet, was Schäden am Netz und an Kundenanlagen verursachen kann. Sofern das Inselnetz nach einer Trennung vom überlagerten Netz weiterläuft, besteht außerdem das Problem, dass während dieser Zeit des Inselnetzbetriebes die Kurzschlussleistung des übergeordneten Netzes fehlt. Unter Umständen kann dadurch die Schutzwirkung der Überstromerkennung im Inselbetrieb ausbleiben. Diese Probleme begründen die Unterscheidung gewollter und ungewollter Inselnetze.

Ziel: Es wird generell angestrebt, nach Methoden zu suchen, die einen robusten Netzanschluss von Anlagen am Verteilnetz im Hinblick auf eine ungewollte Inselnetzbildung gewährleisten. Die Energiewende könnte durch technische Restriktionen bzgl. der zahlreichen technischen Nebenbedingungen eines sicheren Netzbetriebs gefährdet werden, wenn sich nicht auch die Schutztechnik in Bezug auf dezentrale Einspeisungen weiterentwickelt.

Stand der Technik: Die Schutztechnik in den Verteilnetzen verlässt sich meist auf die bewährte Technik des Distanzschutzes. Geschickt gewählte Zeit-Staffelungen sorgen für eine Selektivität, d.h. es wird nur jener Netzbereich abgeschaltet, der dem Fehler am nächsten ist. Aufwändigere Schutzvarianten, wie ein Differentialschutz, sind aufgrund der höheren Kosten in den unteren Spannungsebenen unüblich. Der anerkannte Stand der Technik wird in der europäischen Norm EN 50522 (Erdung von Starkstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1kV) und für NS-Installationen in der VDE 0100-100 / HD 60364 (Errichten von Niederspannungsanlagen) beschrieben.

Bei Vorliegen eines Kurz- oder Erdschlusses wird bei Freileitungen zuerst versucht, über eine

Kurzunterbrechung (KU) einen ggf. vorhandenen Lichtbogen zu löschen, um dann im Anschluss mit einer automatischen Wiedereinschaltung die Versorgung wieder herzustellen. Erst wenn nach dieser Zuschaltung ein weiterhin bestehender Netzfehler festgestellt wird, z.B. durch einen Erdschluss über Fremdkörper an der Leitung, bleibt der Leistungsschalter bis zur Behebung des Schadens offen.

Lösungsweg: Einen wesentlichen Teil der Bearbeitung machte die ausführliche Literaturrecherche aus: Die Energiewende fördert die verstärkte Nutzung regenerativer Energiequellen (Sonne und Wind) und wirkungsgradoptimierter (BHKW-)Erzeugungsanlagen. Dies führt zu vermehrt dezentralen Erzeugungsstrukturen. Die Erzeugungsanlagen haben im Vergleich zu konventionellen Kraftwerken nur geringe Leistungen, weshalb sie fast ausschließlich ins Nieder- bzw. Mittelspannungsnetz einspeisen. Die fluktuierende Stromerzeugung wirkt sich daher verstärkt auf den Verteilnetzbetrieb aus, in dem daher folgende Punkte neu beachtet werden müssen: Zwischeneinspeisungen, bidirektionaler Leistungsfluss, gestiegene Strombelastung der Betriebsmittel, Inselnetzbildung, Gegenspannungen bei Schalthandlungen des Netzschutzes und unterschiedliche Kurzschlussverhalten der Erzeugungstechnologien.

In experimentellen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass ein durchdachtes Schutzsystem notwendig ist, um selektiv Fehler zu klären. Dazu wurden im Verteilnetzlabor des EFZN typische Schaltungen nachgestellt, wie sie in einem dezentral gespeisten Verteilnetz vorkommen. Netzersatzelemente stellten die Leitungen dar, die dezentrale Einspeisung erfolgt über einen Umrichter, eine Verbraucherlast sollte weiter versorgt werden können, obwohl ein Kurzschluss ausgelöst wurde. Durch eine geschickte Wahl der Schutzelemente konnte erreicht werden, dass nur der fehlerbehaftete Abschnitt abgetrennt wurde und somit der Verbraucher weiter versorgt wurde. In einem weiteren Versuch wurde der Effekt der Leistungsverdrängung durch eine DEA untersucht. Den schematischen Aufbau zeigt die folgende Abbildung, ebenso sind die Stromverläufe an den markierten Messstellen dargestellt. Im Versuch wird die Verbraucherleistung schrittweise erhöht, bis sie ihre Nennleistung bei doppelter Einspeiseleistung der DEA erreicht. Dies beeinflusst den Bezug, bzw. die Einspeisung an der Koppelungsstelle mit dem überlagerten Netz. Ohne Last wird der gesamte Strom der DEA ins Netz eingespeist, bei etwa halber Nennlast versorgt die DEA den Verbraucher vollständig und bei voller Last muss zusätzlich Leistung aus dem überlagerten Netz bezogen werden. Diese Form der Leistungsverdrängung führt unter bestimmten Umständen dazu, dass die typischerweise hinter der Netzeinspeisung platzierte Schutzeinrichtung ihre Schutzaufgabe nicht mehr sicher erfüllen kann. Der Leitungsabschnitt zwischen DEA und Last kann somit überlastet werden, ohne dass der Schutz auslöst, der an der Verbindung zur Netzeinspeisung installiert ist. Sind DEA im Netz integriert, ist u. U. ein klassisches Schutzkonzept nicht funktionsfähig.

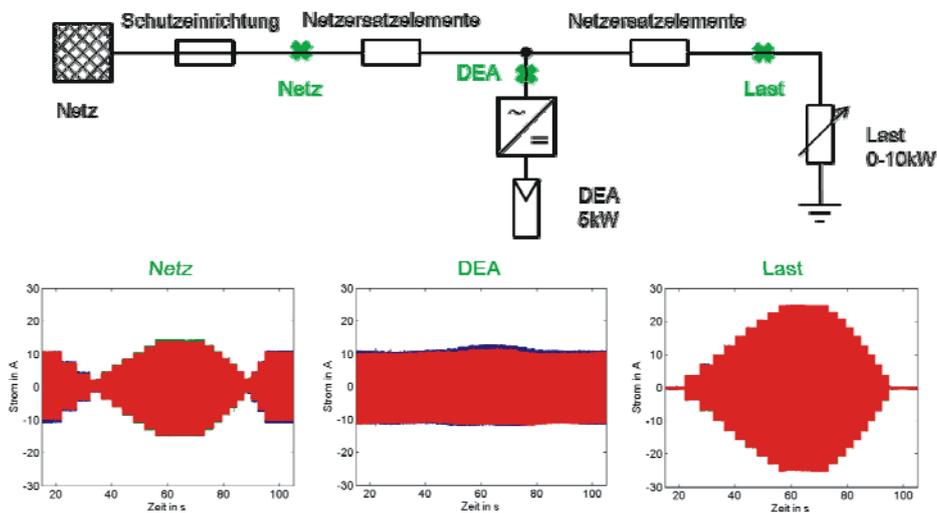


Abbildung 1: Versuch zur Leistungsverdrängung: Aufbau und Zeitverlauf des Stroms an drei Messpunkten (im Strommaßstab 1:10 aufgrund der Leitungsparameter bzw. Netzersetzelemente)

Als zukünftige Netzschutzeinrichtung sind beispielsweise Distanzschutzeinrichtungen mit koordinierter Reichweiten- und Zeitstaffelung denkbar. Mit Hilfe von Pendelerkennungen können fehlerhafte Auslösungen aufgrund von Ausgleichsvorgängen vermieden werden. Außerdem ist es sinnvoll, die Schutzcharakteristiken an die neuen Netzstrukturen anzupassen. Zukünftig können die Netzschutzparameter und Funktionen basierend auf einer zyklischen Online-Überwachung der Systemparameter automatisch angepasst werden, also fast simultan zu den sich ändernden Einspeise- und Verbrauchsverhältnissen im Netz. Als Grundlage hierfür werden Koordination und Kommunikation der Schutzeinrichtungen untereinander und die Zustandserfassung der notwendigen Netzparameter erforderlich.

Heute müssen auch DEA Systemdienstleistungen wie Spannungs- und Frequenzhaltung erbringen. Dies hat zur Folge dass sich nach einer Netztrennung ungewollte Inselnetze ausbilden können, deren Spannung jedoch nicht mit der des Verbundnetzes synchron ist. Um eine unsynchrone Wiederschaltung und die damit verbundene Möglichkeit von Schäden am Netz und den Verbrauchern zu verhindern, muss die Insel erkannt und für Spannungsfreiheit gesorgt werden. Im Falle einer gewollten oder tolerierten Inselnetzbildung (Resilienz im aktiven Verteilnetz) muss vor einer Wieder-Zuschaltung auf das vorgelagerte Netz ein Synchronisierungsvorgang stattfinden.

Projektstand: Nachdem alle Arbeitspakete bearbeitet wurden, konnte der Abschlussbericht erstellt und das Projekt im März 2015 zum Abschluss gebracht werden.

Projektpartner:	Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informations- technik (DKE)	
Bearbeiter:	Dipl.-Ing. Anja Ufkes anja.ufkes@tu-clausthal.de	(Tel:72-2594)
Projektleiter:	Dr.-Ing. E.-A. Wehrmann wehrmann@iee.tu-clausthal.de	(Tel: 72-2595)

Projekt: Direkte Abwärmeverstromung in thermoelektrischen Energiesystemen (Thermoelektrik)

Problem: Prozessbedingte Abwärme in verschiedenen energieintensiven Prozessen, wie in der Stahl- und Glasherstellung sowie in Großbäckereien bleibt häufig ungenutzt und geht an die Umgebung verloren. Mit Thermoelektrischen Generatoren (TEG) lässt sich Wärme direkt in elektrische Energie umwandeln. Thermoelektrische Abwärmenutzung könnte den Primärenergieverbrauch senken, und damit signifikant zum Klimaschutz beitragen.

Ziel: In diesem Projekt soll der Gesamtwirkungsgrad der thermoelektrischen Abwärmenutzung mit verfügbaren Komponenten unter realistischen Bedingungen ermittelt und verbessert werden. Hierzu soll ein Mehrkammer-Kalorimeter aufgebaut werden, um den thermischen Wirkungsgrad der Wandlung zu messen. Die Verbesserung des elektrischen Wirkungsgrads soll durch einen angepassten Umrichter mit Maximum Power Point Tracking (MPPT) erreicht werden. Im Rahmen des Projektes soll exemplarisch eine Schaltung entwickelt werden, die die Leistung von TEG, betrieben bei unterschiedlichen Temperaturdifferenzen, in eine maximale elektrische Ausgangsleistung umwandelt. Außerdem wird das langfristige Ziel verfolgt, thermoelektrische Hochtemperatur-Generatoren zu entwickeln.

Stand der Technik: Die am häufigsten verwendeten Materialien für TEG sind die Bismutellurid-Verbindungen. Fast alle kommerziell verfügbaren TEG sind aus diesen Halbleitern aufgebaut. Der erreichte ZT-Wert (Effektivitätszahl) liegt bei ca.1 zwischen Raumtemperatur und 100 °C. Ein wesentlicher Aspekt thermoelektrischer Energiewandlung ist die Tatsache, dass der Wirkungsgrad nicht nur mit den Eigenschaften des Halbleiters selbst, sondern vor allem mit dem thermodynamischen Carnot-Wirkungsgrad skaliert. Dieser Zusammenhang wird oft unzureichend diskutiert. Die verwendete Aufbautechnik beruht bisher auf konventioneller Lot-Technik und begrenzt daher den nutzbaren Temperaturbereich. Temperaturwechselbelastungen führen häufig zum Ausfall, beispielsweise durch Adhäsionsbruch der Lot-Metallisierung am Halbleiter.

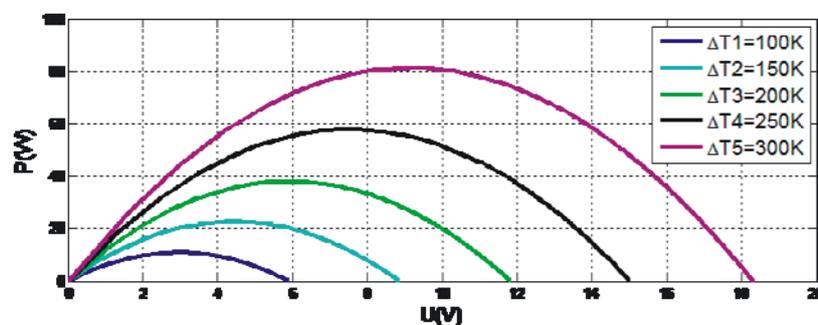


Abbildung 1: berechnete Leistungskennlinie eines kommerziellen Bismutellurid-Thermogenerators bei unterschiedlichen Temperaturdifferenzen

Da die Ausgangsspannung der Thermogeneratoren mit der Temperaturdifferenz schwankt, ist es notwendig, eine Übertragerschaltung zur Leistungsanpassung zwischen Thermogeneratornetzwerk und Verbraucher einzusetzen (die simulierte Leistungskennlinie eines Thermogenerators ist in Abbildung 1 dargestellt). Ein wichtiger Designfaktor der TEG-Schaltung ist die Anordnung der thermoelektrischen Module. Da für Leistungsanwendungen mehrere Module verwendet werden müssen, können diese in Serie, parallel oder gemischt in seriellen oder parallelen Ketten angeordnet werden.

Für das Schaltungsdesign und die Modulanordnung lassen sich aus anderen Bereichen der elektrischen Energietechnik vorhandene Erfahrungen nutzen. So sind Erfahrungen aus dem Bereich der Photovoltaik und der Brennstoffzelle von Nutzen, weil dabei ebenfalls zahlreiche Zellen in Gruppenschaltung zur Leistungsanpassung erforderlich sind. Die Verschaltung vieler thermoelektrischer Module hat aber den Nachteil dass die wirksame Temperaturdifferenz nicht an allen Modulen gleich ist, was zu unterschiedlicher Leistung und innerem Widerstand und damit zur Fehlanpassung führt. Hierzu soll ein sogenannter „distributed MPPT“ erforscht werden.

Die Effizienz von elektronischen Spannungswandlern konnte in den letzten Jahren durch Miniaturisierung und Bauelementintegration immer weiter gesteigert werden. Darüber hinaus trug die Reduktion des Durchlasswiderstandes von Leistungshalbleitern zur Verbesserung bei. Weitere Verbesserungen z.B. durch aktive Kompensation von Schaltverlusten sind zu erforschen.

Lösungsweg: Für die Entwicklung der Hochtemperaturgeneratoren wird eine neue Verbindungstechnik erprobt. Es handelt sich dabei um ein Versintern einer nanoporösen Silber-Zwischenschicht bei relativ niedrigen Temperaturen von ca. 250°C und Drücken bis zu 30 MPa. Es ergibt sich eine kompaktierte Silber-Schicht zwischen 2 Verbundpartnern, die hervorragende elektrische, thermische und mechanische Eigenschaften aufweist und mittlerweile auch als Lot-Ersatz in der Produktion von Leistungselektronik-Bauelementen angewandt wird. Da der Schmelzpunkt von Silber bei über 900°C liegt, kann die Verbindung auch oberhalb der Prozess-temperatur von 250°C eingesetzt werden.

Für die Energiekonditionierung wird ein effizienter Wandler (Tief-/Hochsetzsteller) entwickelt. Es werden verschiedene Maßnahmen zur Verbesserung des Wirkungsgrads (z.B. durch aktive Kompensation von Schaltverlusten mit Resonanzwandlern, Auslegung und Dimensionierung von Bauelementen, mehrphasige Schaltung) untersucht. Für eine maximale Energieausbeute wird auch ein maximaler dynamischer MPPT-Wirkungsgrad angestrebt und dafür ein stabiler Regelungsalgorithmus des Wandlers entworfen und erprobt.

Um verschiedene Versuchsreihen durchzuführen, ist es nötig, eine genau kontrollierte Temperaturdifferenz an die Module anzulegen. Dafür wird ein Mehrkammerkalorimeter mit Wärmequelle, Modulnetzwerk, Wärmesenke und entsprechender Messtechnik aufgebaut. Damit ist es

Projekt: Direkte Abwärmeverstromung in thermoelektrischen Energiesystemen (Thermoelektrik)

möglich, den Wärmefluss in den Thermogenerator, die Temperaturdifferenz und die aus dem System abfließende Wärmemenge zu messen. So lässt sich der Gesamtwirkungsgrad der (Ab-)Wärmeverstromung bestimmen.

Projektstand: Für die Versuchsdurchführungen wurde ein Mehrkammerkalorimeter aufgebaut, mit dem unterschiedliche Temperaturdifferenzen eingestellt werden können und die zu- und abfließende Wärmemenge genau gemessen werden können. Der Aufbau einer Kammer ist in Abbildung 2 schematisch dargestellt.

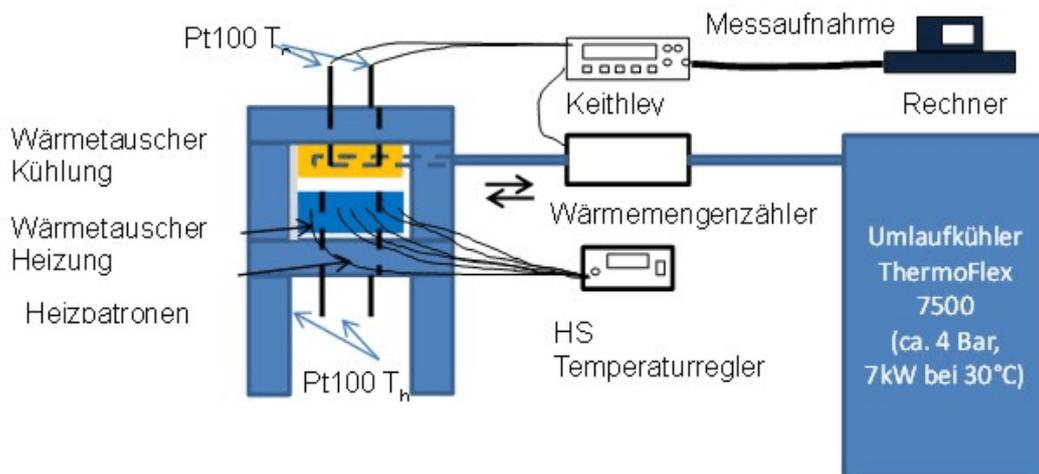


Abbildung 2: Schematischer Aufbau einer Kammer des Kalorimeters

Für die Energiekonditionierung wurde ein DC/DC Wandler in verschiedenen Topologien zum Vergleich und Optimierung realisiert. Abbildung 3 zeigt die Platinen von drei entwickelten Prototypen.

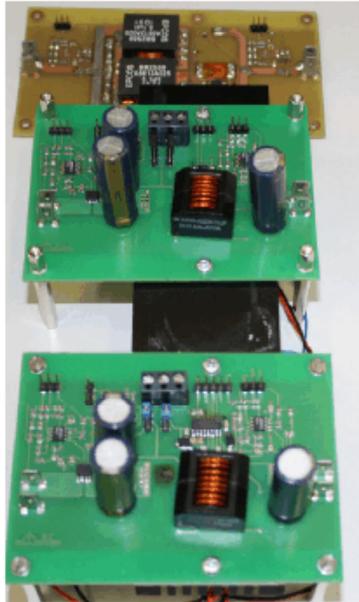


Abbildung 3: (oben) zweiphasiger Hochsetzsteller als Synchronwandler, (Mitte) Tief-/Hochsetzsteller als B2-Vollbrückenwandler, (unten) Tief-/Hochsetzsteller als Vollbrücke mit Schottky-Dioden anstatt des Synchronschalters

Der zweiphasige Synchronwandler hat sich für eine Nennleistung von 90 W pro Thermogeneratorkonzept bei unterschiedlichen Betriebstemperaturen ($\Delta T = T_h - T_c = 0,50 \text{ K} \dots 200 \text{ K}$) als das energieeffizienteste Schaltungskonzept ergeben. Abbildung 4 zeigt den gemessenen Wirkungsgrad der entwickelten Prototypen bei unterschiedlichen Eingangsleistungen.

Projekt: Direkte Abwärmeverstromung in thermoelektrischen Energiesystemen (Thermoelektrik)

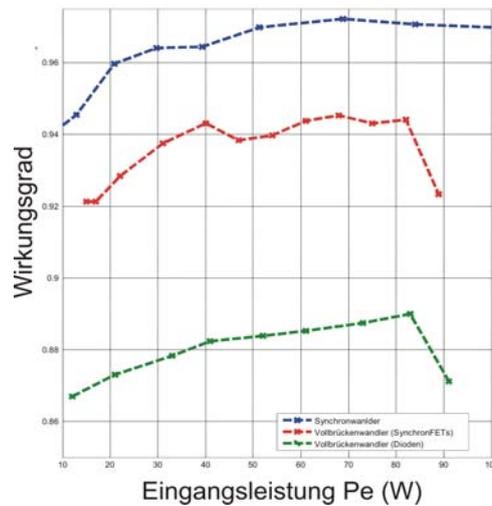


Abbildung 4: gemessener Wirkungsgrad der entwickelten Wandler bei unterschiedlichen Eingangsleistung

Durch den zweiphasigen Aufbau ergibt sich eine deutliche Verringerung der Strombelastung der Bauelemente wodurch ein großer Anteil der Leitverluste reduziert wird. Durch das gezielte Abschalten einer Phase ist auch der erreichte Teillastwirkungsgrad über 94 % deutlich besser. Für die Regelung wurden unterschiedliche MPP-Tracking Verfahren entwickelt und implementiert. Die Einstellung des Arbeitspunktes kann über eine modellbasierte Berechnung aus der gemessenen Temperaturdifferenz oder über die Verfolgung des Leistungsgradienten über die Zeit erfolgen. Die Schrittweite mit der sich das Tastverhältnis des Wandlers ändert, kann auch variabel eingestellt werden um eine bessere Dynamik bei einem Lastwechsel zu erhalten. Abbildung 5 zeigt den gemessenen dynamische MPPT-Wirkungsgrad bei zwei erprobten MPPT-Verfahren.

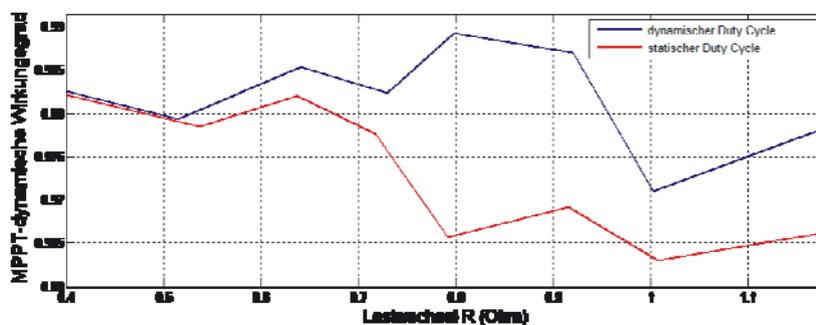


Abbildung 5: Dynamischer MPPT-Wirkungsgrad des Wandlers bei einem Lastwechsel

Das in dem Mehrkammerkalorimeter aufgebaute Netzwerk aus 12 Thermogeneratoren wurde am Eingang des entwickelten Wandlers (mit MPPT-Regelung) angeschlossen. Durch das optimierte MPPT-Regelverfahren und ein innovatives Schaltkonzept aus dem zentralen DC/DC-Wandler und ergänzend gesteuerten Ladungspumpen an einzelnen Strängen des Thermogeneratorkonzepts konnte in einem heterogenen Temperaturfeld ein MPPT-Wirkungsgrad von 98 % bis 99 % erreicht werden.

Für eine weitere Verbesserung des elektrischen Wirkungsgrades ($\eta_{\text{elek}} = \eta_{\text{DC/DC}} \eta_{\text{MPPT}}$) wurde die simulationsgestützte Analyse einer aktiven Kompensation von Schaltverlusten an den Leistungsschalter des DC/DC Wandlers untersucht. Abbildung 6 zeigt eine Beispielschaltung des Resonanzwandlers als Tiefsetzsteller.

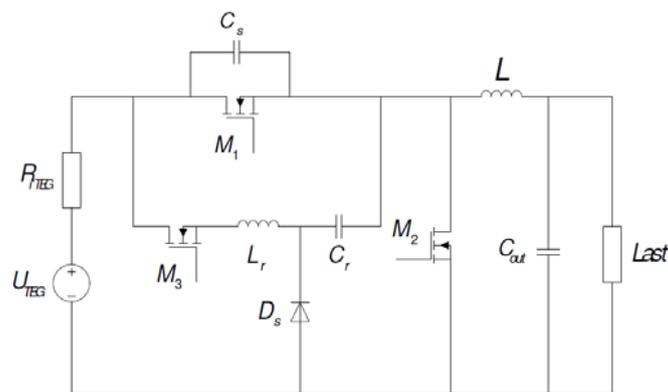


Abbildung 6: Tiefsetzsteller mit aktiver Kompensation der Schaltverluste durch einen Resonanzkreis und einen Hilfshalter

Mit Hilfe einer genauen modellbasierten Ansteuerung eines Hilfsschalters S1 und einem Resonanzkreis, bestehend aus der Spule L_r und dem Kondensator C_r , lässt sich der MOSFET M1 spannungsfrei ein- und ausschalten. Durch eine genaue Ansteuerung erfolgt das Schalten des MOSFETs genau zu dem Zeitpunkt zu dem durch die Eigenschwingung des Resonanzkreises eine Spannung von Null am MOSFET erzwungen wird (ZVS: Spannungsloses Schalten). Die Strombegrenzung an der Spule L_r ermöglicht, dass der Hilfsschalter S1 auch schaltverlustfrei betätigt wird (ZCS: Stromloses Schalten). Die im Kondensator C_r gespeicherte Energie wird nutzbringend über die Schottky Diode D_s an die Last zurückgespeist. Die Analyse zeigt, dass durch diesen Ansatz eine Erhöhung des Wirkungsgrades des Wandlers um mindestens 1 % möglich ist.

Projektpartner: Das Projekt wird in Kooperation mit dem Institut für Halbleitertechnik (TU Braunschweig) durchgeführt.

Projekt: Direkte Abwärmeverstromung in thermoelektrischen Energiesystemen (Thermoelektrik)

Fördernde Stelle: Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)

Laufzeit d. Vorhabens: 01.09.2011 - 28.02.2016

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Abdelhamid Bentaleb
abdelhamid.bentaleb@tu-clausthal.de (Tel:72-2593)

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Beck
info@iee.tu-clausthal.de

IEE

Projekt: Weiterentwicklung und metrologische Validierung von Messnetzen und Rekonstruktionssystemen für die Gasversorgung (MetroGas)

Problem: In diesem Projekt wird die Problematik der prozessbegleitenden Gasnetzsimulation speziell unter dem Gesichtspunkt der Belange regionaler Gasverteilungsnetze betrachtet.

Eine instationäre Gasnetzsimulation durch Zustandsbeobachtung für Gasnetze soll unter der Prämisse eines geringstmöglichen Messaufwandes erfolgen und gleichzeitig eine zuverlässige Abbildung des Strömungszustands liefern. Hierzu ist die Integration des am IEE entwickelten Knotenlastbeobachters (KLB) in das dynamische Modell erforderlich. Möglichkeiten und Grenzen des Ersatzes von Messungen durch Beobachtung sind aufzuzeigen.

Mit dem Ziel eine Handlungsanweisung für Rekonstruktionssysteme für Gasverteilnetze für Abrechnungszwecke zu entwerfen werden mehrere Untersuchungen zur Formulierung eines für die Wiedergabe der Dynamik regionaler Verteilnetze angemessenen Prozessmodells mit Zustandsbeobachter durchgeführt. Ein wichtiger Aspekt für die Genauigkeit der Rekonstruktion ist die Lage der Messstellen zur Stützung des KLB. Mit Hilfe von empirischen Untersuchungen und Analysen der Systemmatrizen (Strukturmaße) werden die für das dynamische Verhalten maßgeblichen Steuer- bzw. Messgrößen ermittelt.

Ziel: Entwicklung von Verfahren und Werkzeugen zur Bestimmung von Abrechnungsbrennwerten und anderen Gasbeschaffenheitskenngrößen in regionalen Gasverteilnetzen mit unvollständiger Messinfrastruktur. Die Entwicklung und grundsätzliche Validierung der Verfahren soll an verschiedenen Netztopologien erfolgen. Die Qualität bzw. Zuverlässigkeit der Brennwertverfolgung ist durch den Vergleich mit Referenzmessungen zu überprüfen. Die Validierung in Gasverteilnetzen mit dezentralen Einspeisungen insbesondere von Biogas würde langfristig einen Verzicht auf die kostenintensive Konditionierung in den Biogasanlagen ermöglichen.

Stand der Technik: Der Stand der Technik bei dem Einsatz von Gasbeschaffenheitsverfolgungssystemen für Abrechnungszwecke ist in den einschlägigen technischen Regeln nach dem Eichgesetz niedergelegt. Danach müssen alle in das betrachtete Gasnetz eingespeisten und ausgespeisten Mengen und die Gasbeschaffenheit der eingespeisten Gase gemessen werden. Zur Sicherstellung der Richtigkeit ist weiterhin mindestens eine Referenzmessung (Druck) an einer ausgewählten Stelle des Netzes gefordert. Aus diesen Randbedingungen folgt, dass das Gasnetz vollständig mit entsprechender Mengen- und Qualitätsmesstechnik ausgerüstet werden muss. Diese Messinfrastruktur ist allerdings in Gasverteilungsnetzen, die in der Regel stark vermascht sind und viele Ausspeisungen in nachgelagerte Ortsnetze haben, nicht vorhanden. Ein Ausbau einer vollständigen Messinfrastruktur, um die herkömmliche Gasnetzsimulationssotware einsetzen zu können (GANESI; SIMONE) ist sehr kostenintensiv und daher in der Praxis nicht umsetzbar. Ein viel versprechender Ansatz ist das Konzept der Knotenlastbeobachtung. Dem Beobachtungsproblem liegt die Überlegung zu Grunde, dass man den aktuellen Gasnetzzustand (Drücke und Rohrflüsse) auf Basis der verfügbaren Messinformation und auf der Grundlage eines Prozessmodells möglichst exakt bestimmt und damit eine genaue Gasbeschaffenheits-

bzw. Brennwertrekonstruktion in Gasverteilnetzen ermöglicht.

Lösungsweg: Will man Gasqualitäten verfolgen, ist eine möglichst genaue Schätzung des Fließzustandes im Netz erforderlich. Hierfür wurden mehrere Untersuchungen zur Formulierung eines für die Wiedergabe der Dynamik regionaler Gasverteilnetze angemessenen Prozessmodells mit KLB durchgeführt. Verschiedene Entwurfsverfahren und Auslegungsmethoden des Beobachters wurden erprobt. Die Idee besteht darin, ausgehend von der Summe der gemessenen Ausspeisemengen und dem Netzvolumen eine Fehlmenge zu berechnen, die anschließend über einen optimalen und regelungstechnisch stabilen Korrekturalgorithmus auf die ungemessenen Ausspeisungen verteilt wird. Die Verteilung der berechneten Fehlmenge erfolgt hier dynamisch über einen Ansatz mit Standardlastprofilen (SLP). Durch die Verwendung der SLP fließen Informationen über die Kundenstruktur und die täglichen bzw. jahreszeitlichen Abnahmeveränderungen in den Entwurf mit ein. In einem zweiten Iterationsschritt werden die Verteilungsfaktoren bei Berücksichtigung des aktuellen Netzzustands korrigiert. Das Vorzeichen der Druckdifferenz $P_{\text{mess}} - P_{\text{sim}}$ in einem festgelegten Druckgebiet bestimmt die Korrekturrichtung (wird weniger oder mehr ausgespeist) an jeder ungemessenen Ausspeisung, die diesem Druckgebiet zugeordnet ist. Bei der Bildung der Druckgebiete, erfolgt die Zuordnung der Ausspeisungen zu der Druckmessstelle anhand des Abstands zwischen den Netzknoten. Nach Identifizierung vorhandener Druckmessstellen (geeicht bzw. mit möglichst geringer Messunsicherheit) werden die ungemessenen Ausspeisungen mit dem kleinsten Abstand zur Druckmessstelle in einem Druckgebiet zusammengefasst. Je größer und komplexer (Vermaschungen, Abzweigungen) das Netz ist, desto größer ist die Anzahl der nötigen Druckmessstellen bzw. der zu bildenden Druckgebiete. Dies gilt besonders, wenn durch die Betriebsweise des Netzes große Druckschwankungen vorliegen.

Zur Optimierung der Messinfrastruktur wird eine systemtheoretische Analyse (mit Hilfe von Strukturmaßen) durchgeführt. Im Zusammenspiel mit empirischen Untersuchungen (Ausspeisemenge, Kundenstruktur und Nachbildbarkeit von Knotenabnahmen durch SLPs) können Anhaltspunkte für eine empfehlenswerte Messinfrastruktur formuliert werden. Bei der Auslegung der Messinfrastruktur soll auch eine Sensitivitätsanalyse berücksichtigt werden. Aus einem linearen Ersatzmodell werden Sensitivitätskoeffizienten ermittelt. Diese entsprechen dem Verhältnis zwischen der Änderung des Ergebnisses und Änderung der Eingangsgröße (Modellierung der Messfehler). Die Auswertung dieser Koeffizienten ermöglicht auch die Aussage über die Wichtigkeit einer Messstelle bzw. eines SLP für die Zustandsrekonstruktion.

Projektstand: Das oben erwähnte Rekonstruktionsverfahren wurde im PSI-Untersuchungssystem implementiert. Der interaktive Korrekturalgorithmus der ungemessenen Ausspeisemengen wurde über eine FORTRAN-Schnittstelle in dem Rechenkern der PSI-Software eingebettet.

Projekt: Weiterentwicklung und metrologische Validierung von Messnetzen und Rekonstruktionssystemen für die Gasversorgung (MetroGas)

Zur Validierung des Gasbeschafftheitsverfolgungssystems mit dem Knotenlastbeobachter, wird die Brennwertrekonstruktion in einem großen und komplexen 16 bar-Gasverteilnetz der Avacon in der Region Gardelegen erprobt. Die Netztopologie ist in Abbildung 1 dargestellt. Das vermaschte Netz setzt sich aus 468 Rohrleitungen und 462 Knoten, mit 12 Einspeisungen und 213 Ausspeisungen (davon 40 gemessen), zusammen.

Das Untersuchungsnetz besitzt folgende Eigenschaften:

- Unvollständige Messinfrastruktur
- Maschen (äußerer und innerer Ring)
- Heterogene Kundenstruktur (Ein- und Mehrfamilienhäuser, Industriekunden unterschiedlicher Art)
- Dezentrale Biogaseinspeisung

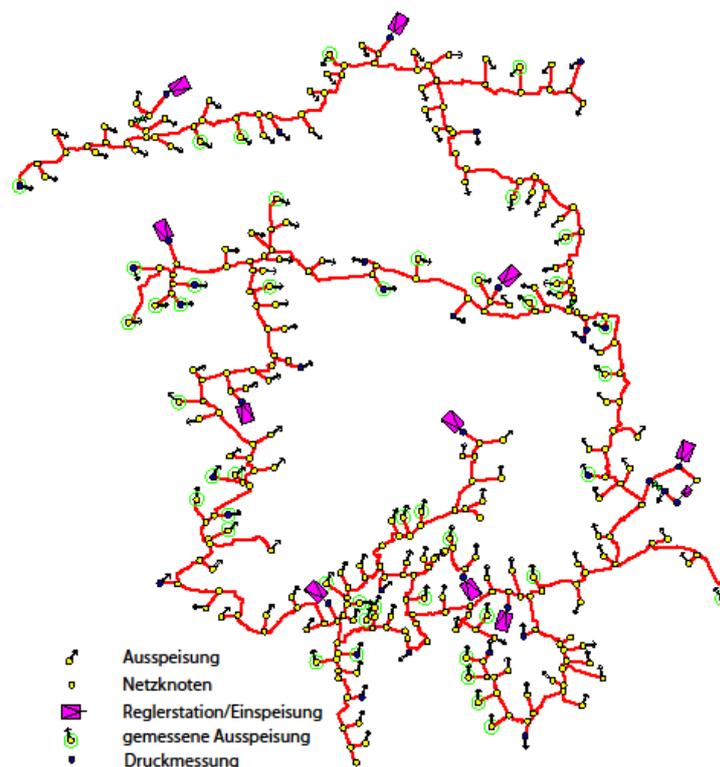


Abbildung 1: Netztopologie des Untersuchungsnetzes der Avacon in der Region Gardelegen

Mit den genannten Eigenschaften ist eine Übertragbarkeit der Validierung auf andere Netztopologien gewährleistet. Für die Validierung der Brennwertrekonstruktion werden die Messdaten

eines festinstallierten Prozess-Gaschromatographen (PGC) bei einem Industrie-kunden (Auspeisung GT49) ausgewertet und zusätzlich eine Referenzmessstelle mit Hilfe eines mobilen PGC (Auspeisung TN05) verwendet.

Gemäß der technischen Regel „G685“ zur Gasabrechnung, ist der Netzbetreiber aufgefordert zu prüfen, ob eine Einspeisung von Biogas in die Gasnetze auch ohne Einsatz von Flüssiggas (LPG) möglich ist. Für die Einhaltung des 2 %-Kriteriums müssten die einspeisenden Biogasanlagen mit einer LPG-Konditionierungsanlage nachgerüstet werden. Diese Kosten und die laufenden Kosten für die Beschaffung können eingespart werden, wenn eine genaue Brennwertrekonstruktion zum Einsatz kommt. Vor diesem Hintergrund wurde ein Feldversuch im Untersuchungsnetz in Gardelegen durchgeführt. Bei dem Versuch wird die Konditionierung einer Biogaseinspeisung auf einen Brennwert von $10,8 \text{ kWh/m}^3$ für zwei unterschiedliche Zeiträume abgestellt. Durch das Abschalten der LPG-Konditionierung trifft an einigen Auspeisungen Mischgas ein. Die Ermittlung des Brennwertes dieses Mischgases auf Basis einer Zustandsrekonstruktion mit dem Knotenlastbeobachter wird erprobt. An der Auspeisung mit dem mobilen PGC, wird während des Feldversuchs künstlich eine Pendelzone erzeugt.

Abbildung 2 zeigt das Rekonstruktionsergebnis im Vergleich zu den Messungen an den zwei Auspeisungen TN05 und GT49.

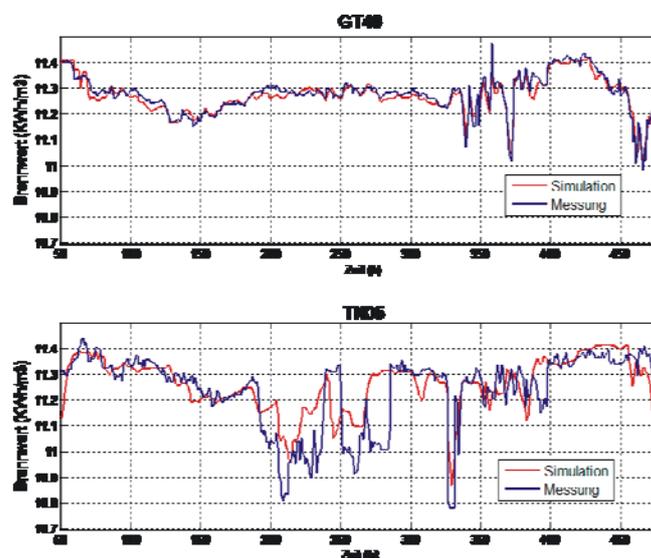


Abbildung 2: Zeitverläufe der rekonstruierten und gemessenen Brennwerte an den Auspeisungen GT 49 und TN 05

Projekt: Weiterentwicklung und metrologische Validierung von Messnetzen und Rekonstruktionssystemen für die Gasversorgung (MetroGas)

Der Ausspeiseknoten GT49 (Industriekunde) ist von dem Mischgas nicht erreicht worden. Der Verlauf des Brennwertes konnte genau nachgebildet werden. Die Flanken (bzw. die Laufzeiten) wurden sehr gut getroffen. Die Ausspeisung TN05 (Referenzmessstelle mit einem mobilen PGC) wurde mit dem Mischgas mit einer Laufzeitverzögerung von 17 Stunden erreicht. Der Brennwert konnte insgesamt gut nachgebildet werden. Die Spitzen und die Täler konnten während der Abstellphase der LPG-Konditionierung allerdings nicht exakt getroffen werden. Die Auswertung der Simulationsgüte für den betrachteten Zeitraum ist in Tabelle 1 dargestellt.

Knoten	GT49 (Industriekunde)	TN05(mobiler PGC)
Absolute Abweichung (KWh/m3) (Stundenwerte)	0,045	0,109
Relative Abweichung (%) (Stundenwerte)	0,4	0,96
Absolute Abweichung (KWh/m3) (Tagesmittelwerte)	0,037	0,097
Relative Abweichung (%) (Tagesmittelwerte)	0,32	0,85

Tabelle1: Mittlere absolute und relative Abweichung zwischen Simulation und Messung des brennwertes an den Ausspeisungen GT 49 und TN 05

Die Forschungsergebnisse zeigen die Robustheit der Brennwertverfolgung mit Hilfe des Knotenlastbeobachters für das große und vermaschte Verteilnetz (mit unvollständiger Messinfrastruktur) in Gardelegen. Die relative Abweichung bei Betrachtung der Stundenwerte liegt unter der Eichfehlergrenze von 1 %. Bei Betrachtung der Tagesmittelwerte beträgt die relative Abweichung 0,85 % am Ausspeisknoten TN05. Bei dieser Auswertung wurde auch die Einschwingphase des Beobachters in die Rechnung einbezogen.

Projektpartner:

- Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB): Kompetenz im gesetzlichen Messwesen und bei der Bestimmung von Messunsicherheiten
- PSI AG: Unterstützung der Forschungsarbeiten u. A. durch geeignete Simulationsprodukte. Zusätzliche Beratung im Forschungsumfeld, insbesondere zur operationellen Anwendung der Simulations- und Rekonstruktionsverfahren

- Avacon AG, Erdgas Südwest GmbH und andere Netzbetreiber:
stellen Netz- und Messdaten für die Untersuchung zur Verfügung

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Abdelhamid Bentaleb (Tel: 72-2593)
abdelhamid.bentaleb@tu-clausthal.de

Projektleiter: Dr.-Ing. E.-A. Wehrmann (Tel: 72-2595)
wehrmann@iee.tu-clausthal.de

Problem: Die Veränderungen der Energiewende hinsichtlich der Netznutzung stellen die aktuellen Ansätze der Kalkulation der Netzentgelte derzeit zunehmend in Frage.

Eine zentrale zukünftige Herausforderung stellt die dezentrale Einspeisung auf den unteren Spannungsebenen dar. Die dezentrale Erzeugung verändert den ursprünglich unterstellten von oben nach unten gerichteten Wirkleistungsfluss dahin gehend, dass sich zunehmend ebenfalls sowohl horizontale Leistungsflüsse als auch Rückspeisung in höhere Spannungsebenen einstellen. Im heutigen Kostenwälzungsmodell wird jedoch nur ein hierarchischer Wirkleistungsfluss berücksichtigt und somit keine Leistungsumkehr abgebildet. Dies führt insbesondere auf den niedrigen Spannungsebenen aufgrund des vermehrten Netzausbaubedarfs zu erhöhten Netzentgelten.

Weiterhin resultiert ebenfalls aus der fehlenden Abstimmung von Erzeugung und Netz ein Anpassungsbedarf des Netzentgeltsystems. Denn die Standorte von überwiegend dezentralen Erzeugungsanlagen werden primär nach kraftwerksspezifischen Kriterien und weniger nach dem allgemeinen Systemnutzen optimiert. Diese Erzeugungsanlagen verursachen einen erhöhten Netzausbau, der wiederum höhere Netzentgelte hervorruft. Da die höheren Netzkosten insbesondere dem Ausbau der Erneuerbare-Energien-Anlagen zu zuordnen sind, ergeben sich hieraus vor allem regional stark unterschiedlich hohe Netzentgelte.

Schließlich wirkt sich auch das veränderte Nutzerverhalten auf die Netzentgelte aus. In einem arbeitspreisbasierten Netzentgeltsystem, wie dem heutigen, werden durch sinkende Netzentnahmen aufgrund von Eigenerzeugung und Energieeffizienz die Netzkosten auf eine geringere Energiemenge umgelegt. Folglich steigen die Netzentgelte der übrigen Netznutzer.

Lösungsweg: Im Zuge des Projektes wurden zunächst die Differenzierungsmerkmale von Netzentgeltsystemen evaluiert. Aus diesen Differenzierungsmerkmalen, den sogenannten Designelementen denen wiederum verschiedene Ausprägungen zugeordnet werden können, lassen sich schließlich mehrere Hundert mögliche Netzentgeltsysteme aufstellen. Die Designelemente und ihre Ausprägungen werden wie folgt differenziert:

- Wirkleistungsfluss am Zählpunkt (z.B. Allokation der Kosten auf Verbraucher und Erzeuger)
- vertikale Preisdifferenzierung (z.B. Tarife je Netzebene)
- horizontale Preisdifferenzierung (z.B. bundeseinheitliche Entgelte)
- Preiselemente und Bezugswerte (z.B. bereitgestellte Leistung oder in Anspruch genommene Leistung/Energie)
- Preisbildungsmechanismus (z.B. nach der Gleichzeitigkeitsfunktion)

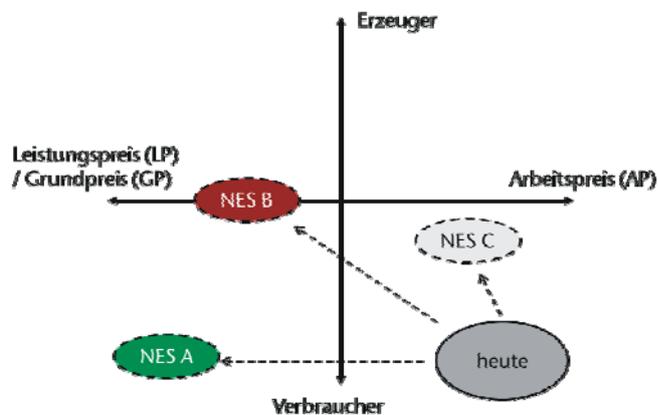


Abbildung 1: Zukünftige Entwicklungspfade der Netzentgeltsysteme (NES)

Den zukünftigen Herausforderungen kann somit über die Wahl der Designelemente Rechnung getragen werden. Den starken Differenzen regionaler Netzentgelte könnte z.B. durch ein bundeseinheitliches Netzentgelt entgegen gewirkt werden.

Zur Abwendung der steigenden Entgelte durch die geringere Netzentnahme wird derzeit häufig ein Preissystem mit einer stärkeren Leistungspreis-komponente gefordert (vgl. Abb. 1 „NES A“).

Um für die fehlende Abstimmung von Erzeugung und Netz entsprechende Anreize zu setzen, könnten beispielsweise zukünftig Erzeuger an den Netzentgelten beteiligt werden. In einigen europäischen Ländern wird bereits ein Teil der Netzkosten auf die Erzeuger allokiert (vgl. Abb. 1 „NES B“ und „NES C“).

Projektstand: Ausgewählte Netzentgeltsysteme wurden im Rahmen dieses Projektes anhand eines Referenznetzes und verschiedener Kosten- und Nutzerszenarien untersucht. Die Wirkungen einzelner Designelemente konnten so hinsichtlich verschiedener Bewertungskriterien wie z.B. Verursachergerechtigkeit und Umsetzbarkeit quantitativ und qualitativ evaluiert und bewertet werden.

Industriepartner: E-Bridge Consulting GmbH

Bearbeiter: Dipl.-Wirtsch.-Ing. Karolina Koring
 karolina.koring@efzn.de (Tel:05321/3816-8101)

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. Klaus-Dieter Maubach

Projektübersicht

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

Arbeitsgruppe 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:

1. Bereitstellung verschiedener Systemdienstleistungen für die Stabilisierung elektrischer Netze mit Hilfe moderner leistungselektronischer Komponenten (Prinzip Virtuelle Synchronmaschine - VISMA)
 2. Multifrequente Schwingungsdämpfung in industriellen Anlagen mit einem am Institut entwickelten, mitrotierenden Tilgerring.
 3. Monitoring von Netzzuständen (Inselnetz- und Netzparallelbetrieb) und Netzzustandsgrößen
 4. Verminderung der mechanischen Beanspruchung des Antriebsstranges von Windkraftanlagen
- **Aktive Schwingungsdämpfung in verzweigten Antriebssystemen**
 - Aufbau und Erprobung eines rotierenden Dämpfersystems zur Beurteilung der technischen Realisierbarkeit zur multifrequenten Dämpfung von Torsionsschwingungen in verzweigten Antriebssystemen
 - Keine Abstützung der Dämpfermaschine am Fundament, Abstützung erfolgt über die eigene Massenträgheit
 - Theoretische Untersuchungen zum möglichen Frequenzbereich der zu dämpfenden Schwingung
-

- Konstruktion einer Dämpfermaschine nahe an einer späteren technischen Realisierung am bestehenden verzweigten Schwingungsprüfstandes

 - **Schaufenster Elektromobilität: Tanken im Smart Grid**
 - Erprobung innovativer Ladegeräte und Ladealgorithmen für Elektrofahrzeuge zur Bereitstellung von standortabhängigen dezentralen Systemdienstleistungen
 - Einsatz des Fahrzeugspeichers als Momentanreserve und zur Primärregelung
 - Erfassung des aktuellen Zustandes des lokalen Netzbereiches durch das Fahrzeug im netzgekoppelten Zustand
 - Erstellung einer *Power Quality Map*
 - Prosumerzellenoptimierung mit dem Fahrzeugspeicher

 - **Zustandschätzer 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

 - **Aktive Schwingungsdämpfung in Antriebssträngen mit Planetengetrieben am Beispiel der Windkraft**
 - Entwicklung einer zusätzlichen Regelung um Schwingungen aktiv zu dämpfen
 - Verwendung eines Beobachters zur Ermittlung des Drehmomentes an der Hauptwelle der Windkraftanlage
 - Aufbau eines Prüfstandes zur Überprüfung und Validierung des Konzeptes
 - Auswertung des Belastungskollektivs zur Beurteilung des additiven Reglers

 - **Inselnetzerkennung im Rahmen des Smart Nord Projektes**
 - Test bestehender Inselnetzerkennungsverfahren in einem realen Aufbau
 - Entwicklung eines neuartigen Verfahrens, welches durch statistische Parameter Rückschlüsse auf den Netzzustand zulässt.
 - Erprobung des Verfahrens mit unterschiedlichen Verbraucher- und Erzeugereinheiten am Netz
-

unsymmetrische Stromsollwertvorgabe für den Aktor bewirkt die Synchronisation und erlaubt eine sensorlose Regelung ohne Lagegeber. In Verbindung mit einem optimalen Stromregler wird eine hochdynamische Einprägung des drehmomentbildenden Stroms auch bei hohen Frequenzen realisiert. Dem Maschinenregler überlagert wird ein Dämpfungsregler, der in der Lage ist selbst bei frequenzabhängigen Verzögerungen in Signal- und Leistungspfaden simultan mehrere Schwingungsfrequenzen aktiv zu bedämpfen. Durch eine dynamische Nachführung der Reglerverstärkung wird einerseits der stabile Betrieb des Dämpferantriebs sichergestellt und andererseits stets mit dem maximal verfügbaren Drehmoment aktiv gedämpft. So können Schwingungen zügig aus dem System entfernt werden.

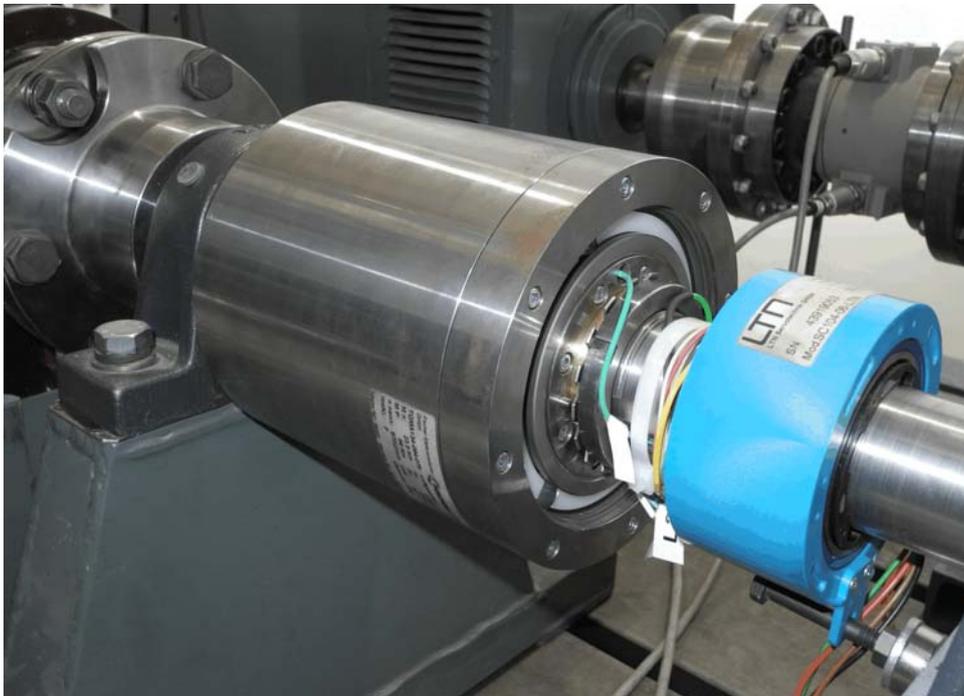


Abbildung 2: Aktor zur aktiven Schwingungsdämpfung. Die Maschine rotiert vollständig mit der Antriebswelle und benötigt keine Drehmomentabstützung

Ergebnisse: An einem Versuchsstand wurde das Dämpferkonzept prototypisch umgesetzt und getestet. Selbst erregte Schwingungen konnten im Experiment vollständig getilgt werden, Schwingungen mit fortwährender Anregung konnten signifikant reduziert werden. Zur Untersuchung werden neben den Zeitverläufen auch die Spektren analysiert. Abbildung 3 zeigt exemplarisch einen Dämpfungsvorgang. In allen Versuchen konnten sowohl Anregungsfrequenzen

Projekt: Aktive Schwingungsdämpfung in verzweigten Antriebssystemen

als auch Harmonische sowie Intermodulationsprodukte in ihren Amplituden deutlich verringert werden. Die Wirksamkeit des Dämpfungsreglers zur aktiven Dämpfung mehrerer Schwingungsfrequenzen wurde im Versuch erfolgreich demonstriert.

Im Projekt wurde dem Anwender alles an die Hand gegeben, was er zur Auslegung eines Dämpfersystems benötigt. Neben Auslegungsvorschriften für die mechanischen Eigenschaften werden Reglerparameter allgemein berechnet und daraus einfach anwendbare Rechenvorschriften formuliert. Das Projekt ist abgeschlossen.

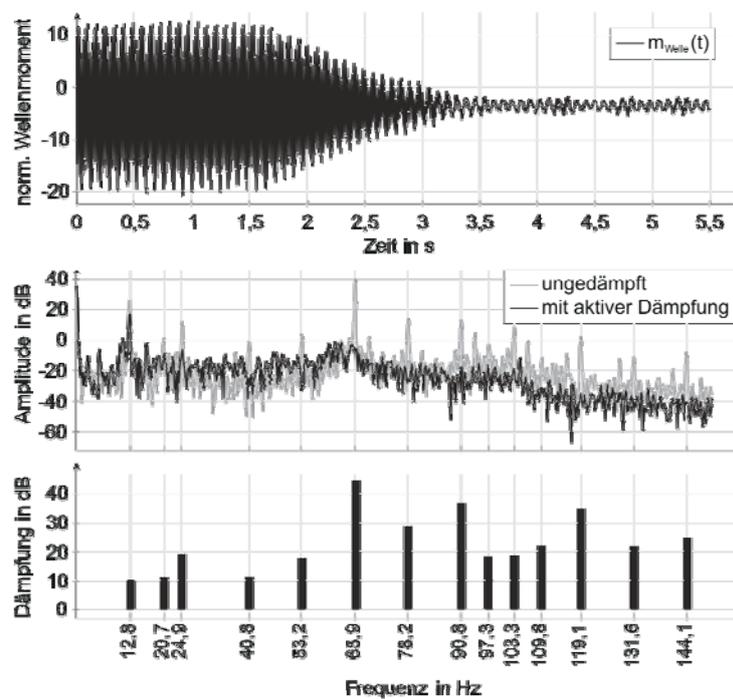


Abbildung 3: Aktiver Dämpfungsvorgang bei multifrequenter Schwingungsanregung.
 Oben: Zeitbereich.
 Mitte: Spektren mit und ohne Dämpfung.
 Unten: Dämpfungswerte der Frequenzanteile

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Markus Stubbe

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

IEE

Problem: Vor dem Hintergrund abnehmender Kraftwerksleistung aufgrund des Atomausstiegs und der Abschaltung alter Kohlekraftwerke und des zögerlichen Zubaus neuer Großkraftwerke wird das Energieversorgungssystem vor große Herausforderungen gestellt. Zudem ist eine Flexibilisierung des Versorgungssystems wegen der immer steiler verlaufenden Residuallastgradienten notwendig. Darüber hinaus stellt sich die Frage, wie in Zukunft Momentanreserve sowie Primär- und Sekundärregelleistung erbracht werden sollen, die bislang von Großkraftwerken bereitgestellt wurden.

Ziel: Ziel des Projektes ist die Entwicklung und Erprobung innovativer Ladegeräte und Ladealgorithmen für Elektrofahrzeuge, um damit einen Beitrag zur dynamischen Systemstabilität elektrischer Netze liefern zu können.

Lösungsweg: Im Kern der Arbeiten stehen Untersuchungen zur Einbindung automobiler Energiespeicher in die elektrische Energieversorgung zur Erbringung von dezentralen, standortabhängigen Systemdienstleistungen.

Des Weiteren wird die Nutzung der Fahrzeugspeicher zum Ausgleich von Erzeugung und Verbrauch in den Bilanzgrenzen der Kundenanlage – der sogenannten „Prosumerzelle“ – betrachtet. Hierzu ist eine kommunikative Verbindung des Hauptzählers am Hausanschluss mit dem Fahrzeug und ggf. mit den Erzeugern, wie Photovoltaik-Anlage (PV) oder Blockheizkraftwerk (BHKW), und weiteren steuerbaren Verbrauchern erforderlich.

Andere derzeit laufende und angestrebte Projekte nutzen die Speicher von Elektrofahrzeugen als reine Energiespeicher. In diesem Projekt wird die Nutzung der Fahrzeugbatterien als „Leistungsspeicher“ für die Bereitstellung von Momentanreserve, zur Primärregelung und weitergehende Systemdienstleistungen untersucht.

Aufgrund unterschiedlicher Topologien und lokaler Lastzustände ist für die Parametrisierung der dynamischen Reaktion der Laderegler auf Netzereignisse eine standortbezogene Optimierung der Parameter von Vorteil.

Als mobile Einheiten können Elektrofahrzeug während der netzgekoppelten Phase (Plugged-In) den aktuellen Zustand des lokalen Netzbereiches diagnostizieren und für Netzbetreiber wertvolle Daten erheben. Die erhobenen Daten werden in aggregierter Form als „Power Quality Map“ zur Verfügung gestellt. Im Kontext der Entwicklung hin zum „Smarter Grid“ kann auf diese Weise das Sensornetz für eine Netzüberwachung dichter geknüpft werden, um somit eine weiterhin hohe Versorgungsqualität zu gewährleisten.

Im Rahmen dieses Projektes werden die beschriebenen drei Funktionalitäten Systemdienstleistungen, Prosumerzellenoptimierung und Power Quality Map untersucht bzw. entwickelt, anhand von Laboraufbauten erprobt und in marktverfügbare Elektrofahrzeuge integriert.

Projektstand: Das Projekt ist in Bearbeitung und wurde um ein halbes Jahr, bis 30.06.2016, verlängert.

Projektergebnisse: Netzdienliches Ladeverfahren: Zur Analyse möglicher Szenarien und zur Auslegung eines intelligenten Lademanagements wird ein vereinfachtes Netzmodell (Abbildung 1) genutzt. Mit Hilfe des Modells können verschiedene Last- und Erzeugungssituationen in einem Niederspannungsnetzausläufer dynamisch simuliert werden. Auf Basis der Simulationsergebnisse können die Auswirkungen des Ladens von Elektrofahrzeugen an verschiedenen Punkten im Netz genauer untersucht werden.

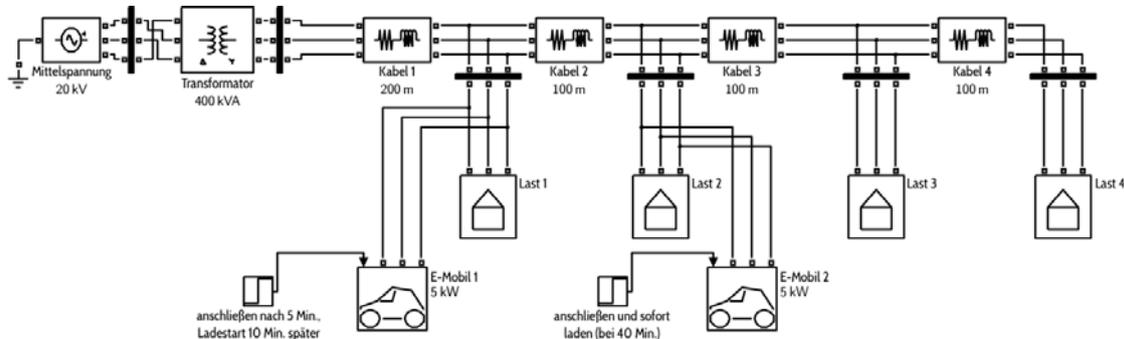


Abbildung 1: Einfaches Netzmodell zur Untersuchung verschiedener Szenarien in Bezug auf Last- und Erzeugungssituationen sowie Anschluss und Ladeverhalten von Elektrofahrzeugen in Matlab/Simulink

Eine Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse für das Laden von zwei Elektrofahrzeugen entsprechend der Anordnung in Abbildung 1 ist in Abbildung 2 dargestellt. Für die erste Simulation (links) wurde von einer Ladung mit konstanter Leistung (Nennleistung) ausgegangen. Bei der zweiten Simulation (rechts) wurde für beide Fahrzeuge das neue, netzdienliche Ladeverfahren angenommen. Beim Vergleich der Spannungsverläufe ist zu erkennen, dass die Spannungseinbrüche mit dem netzdienlichen Ladeverfahren reduziert werden können.

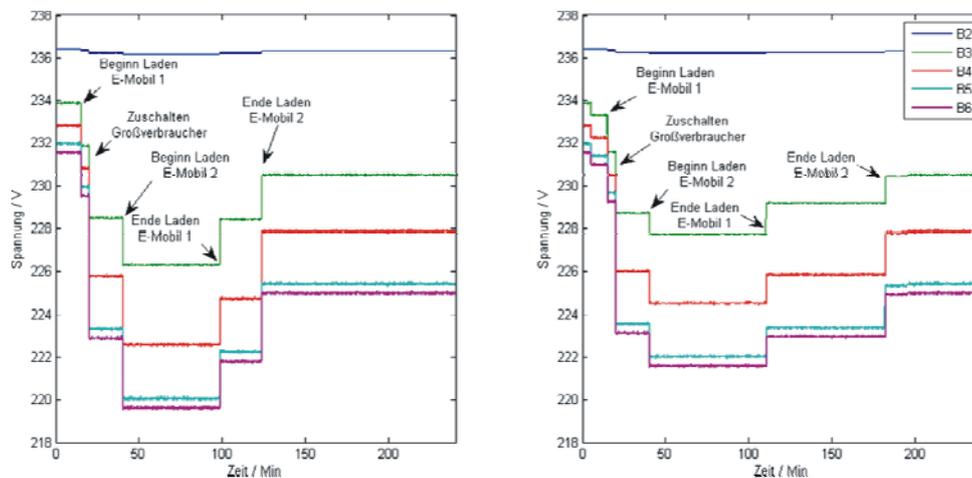
Projekt: Tanken im Smart Grid


Abbildung 2: Vergleich der Simulationsergebnisse des Ladeverhaltens ohne (links) und mit (rechts) netzdienlichem Ladeverfahren entsprechend Abbildung 1

Die Simulationsergebnisse (Abbildung 2) zeigen, dass sich die Spannungseinbrüche durch das netzdienliche Ladeverfahren reduzieren lassen. Dies geschieht auf Kosten der Ladedauer, was Abbildung 3 verdeutlicht. Wie sich feststellen lässt, steigt die Ladedauer für Fahrzeuge, die weiter hinten am Strang angeschlossen sind, deutlich stärker an als für Fahrzeuge, die weiter vorne angeschlossen sind. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass im einfachsten Fall beim netzdienlichen Laden auf eine feste Nennspannung (z.B. 230 V) geregelt wird. Das bedeutet, dass bei einer Abweichung von dieser Nennspannung die Ladeleistung angepasst wird, z. B. wird mit höherer Leistung, d.h. beschleunigt, geladen, wenn die lokal gemessene Spannung über dem Nennwert liegt. Da die Netzspannung aufgrund des Spannungsabfalls über der Netzleitung grundsätzlich ortsabhängig, d.h. lokal unterschiedlich ist, wird es bei Regelung auf eine feste Nennspannung immer zu örtlichen Ungleichbehandlungen von Fahrzeugen kommen, die sich mit dem netzdienlichen Ladeverfahren an der Netzstabilisierung beteiligen.

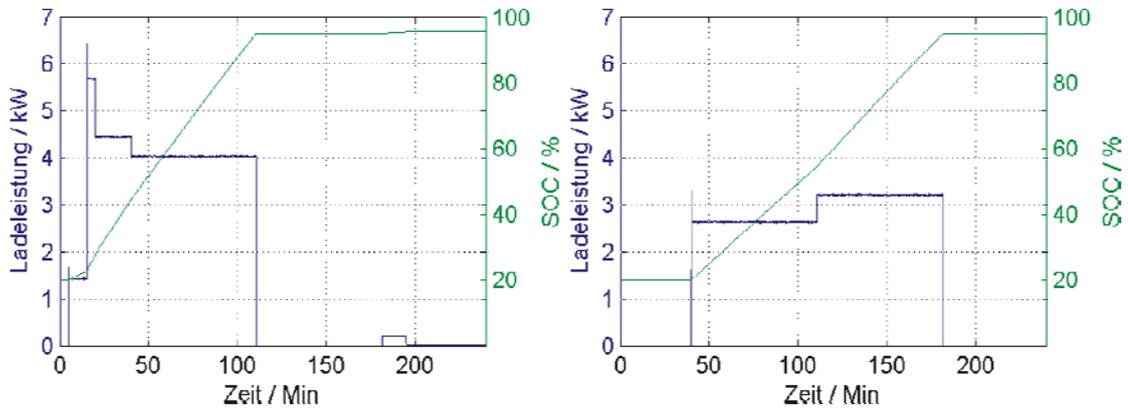


Abbildung 3: Vergleich der Simulationsergebnisse des Ladeverhaltens von Fahrzeug 1 (links) und Fahrzeug 2 (rechts) mit netzdienlichem Ladeverfahren entsprechend Abbildung 1

Um zu verhindern, dass Fahrzeuge, die weiter hinten an einem Netzausläufer laden, grundsätzlich durch eine länger Ladedauer benachteiligt werden, ist es sinnvoll, lokale Nennspannungen für das Ladeverfahren/die Regelung zu definieren. Dies kann über die Power-Quality Map, die ebenfalls im Projekt entwickelt wird, geschehen.

Die Regelung des Ladegeräts richtet sich nach dem Blockschaltbild in Abbildung 4. Die Ladeleistung wird abhängig von den Abweichungen von Frequenz und Spannung bezogen auf die vorgegebenen Nennwerte (f_0^* , U_0^*) gegenüber der Nennleistung P_0^* erhöht oder reduziert. Weiterhin besteht die Möglichkeit die Nennleistung über ΔP_0^* für einen Lastausgleich in der Prosumerzelle anzupassen.

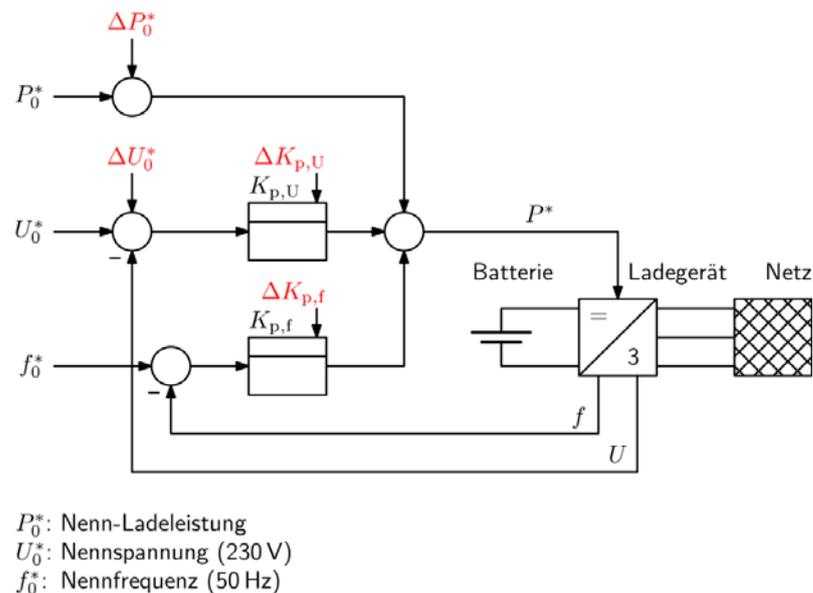


Abbildung 4: Reglerstruktur des netzdienlichen Ladeverfahrens

Die rot markierten Parameter in Abbildung 4 können im Betrieb über die Power-Quality Map nachgeführt werden. Besteht keine Verbindung zur Power-Quality Map arbeitet das Ladegerät eigenständig mit dem fest vorgegebenen Parametersatz. So ist bleibt das dynamische Verhalten des Ladegeräts und die Reaktionsfähigkeit auf lokale Netzereignisse auch ohne Online-Verbindung erhalten.

Messwerterfassung und Datenübertragung: Die Anforderungen an die Power-Quality Map zur Speicherung und Visualisierung des orts aufgelösten Netzzustandes sowie zur Parameteroptimierung des Ladeverfahrens wurden spezifiziert.

Für die Kommunikation mit der Power-Quality Map und zur Datenübertragung zwischen den einzelnen Geräten wurden mit den Projektpartnern die einzelnen Kommunikationswege und die zugehörigen Übertragungsprotokolle spezifiziert.

Für die ortsfeste, genaue Messung der ortsunabhängigen Netzfrequenz im Verbundnetz sowie für die stationäre Messung des lokalen Netzzustandes und des Lastflusses in den Haushalten bzw. den Prosumerzellen wurde eine Messboxen entwickelt. Abbildung 5 zeigt eine solche Messbox und einen zugehörigen Messschrieb einer Messung des Netzzustandes.

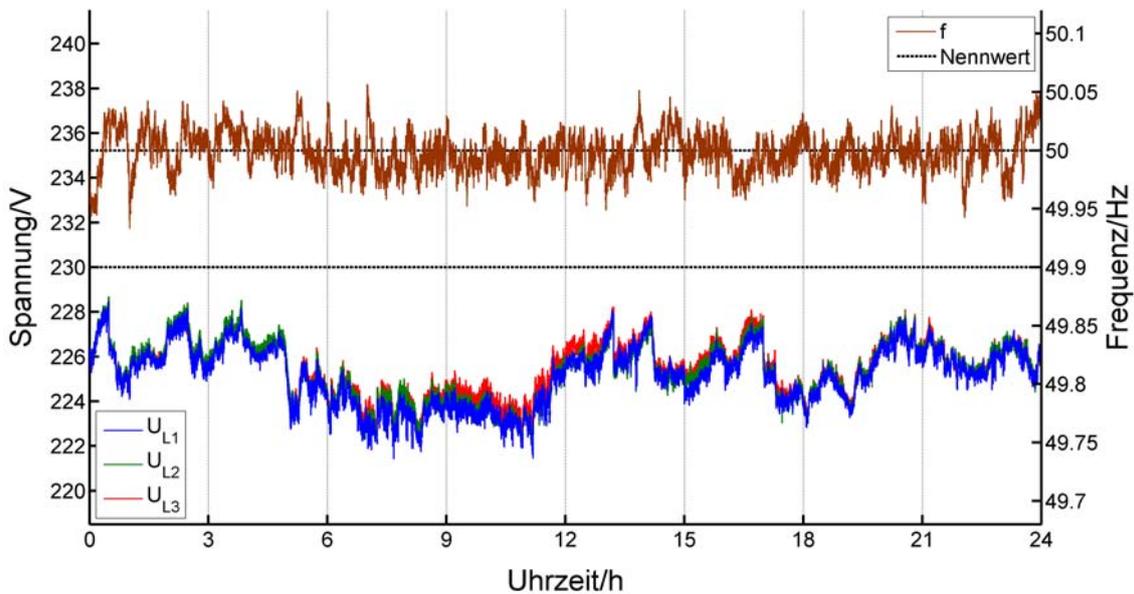
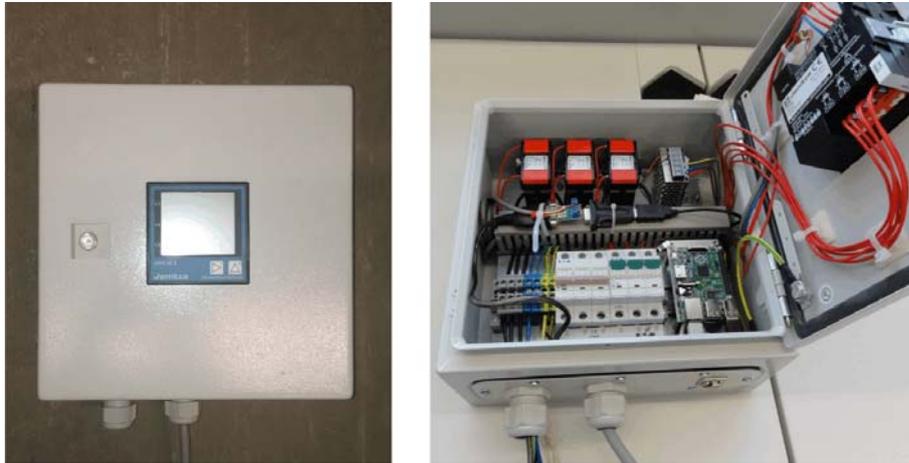


Abbildung 5: (oben) Entwickelte Messbox zur stationären Überwachung des Netzzustandes und Lastflussmessung in der Prosumerzelle mit Anbindung an die Power-Quality Map;
(unten) Mit einer Messbox aufgenommener Netzzustand und Lastfluss

Entwicklung und Untersuchung der Ladetechnik: Im Rahmen des Projekts werden drei technische Entwicklungslinien verfolgt:

- Für das hochschuleigene Versuchsfahrzeug wird ein rückspeisefähiges Ladegerät nach dem Prinzip der Virtuellen Synchronmaschine (VISMA) entwickelt und aufgebaut.
- Zusammen mit der FINE Mobile GmbH als Lieferant marktverfügbarer Elektrofahrzeuge

Projekt: Tanken im Smart Grid

werden zwei Fahrzeuge mit entsprechend modifizierter Ladetechnik zur lastabhängigen Ladeleistungsmodulation aufgebaut.

- Die RegenerativKraftwerke Harz (RKWH) erweitern ihre auf Elektroantrieb umgerüstete Audi A2 um ein dreiphasiges Schnellladegerät, das ebenfalls das netzdienliche Laden unterstützen soll.

Abbildung 6 zeigt das Schema des Ladegeräts, der für das hochschuleigene Versuchsfahrzeug – ein auf Elektroantrieb umgerüsteter Smart-Roadster – entwickelt wird. Der Ladeumrichter setzt sich aus einem batterieseitigen, bidirektionalen Gleichspannungswandler, für die Anpassung der Batteriespannung von 100 V auf die Zwischenkreisspannung von 700 V, und einem netzseitigen Puls-Wechsel-/Gleichrichter in Brückenschaltung zusammen.

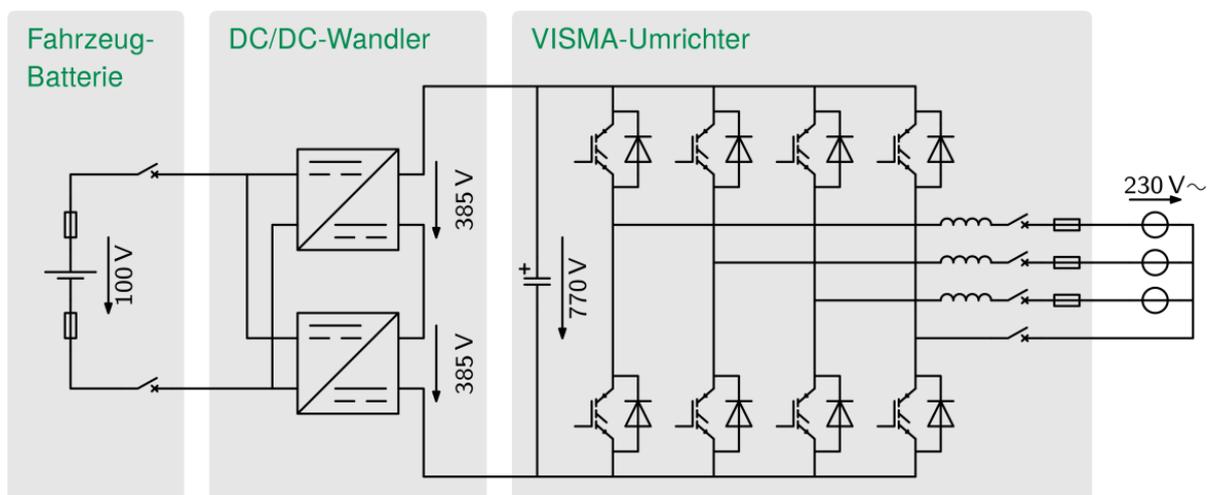


Abbildung 6: Schema VISMA-Ladegerät für den hochschuleigenen Smart Roadster

Die zugehörige Laderegulation ist so konzeptioniert, dass sie netzstützend agiert, ohne auf eine Kommunikation mit einem zentralen Managementsystem angewiesen zu sein. Dazu werden die Netzparameter Frequenz und Spannung ausgewertet und es wird entsprechend der Primärregelung eines Kraftwerks mit einer angepassten Ladeleistung darauf reagiert. Durch eine zusätzliche, nicht zwingend erforderliche Kommunikationsverbindung zur Power-Quality-Map können die Regelparameter standort- und netzparameterabhängig nachgeführt und damit das Ladeverhalten weiter optimiert werden.

Fördernde Stelle:	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)	
Projektpartner:	Technische Universität Clausthal - Energie-Forschungszentrum Niedersachsen (EFZN) - Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme (IEE) - Institut für Elektrische Informationstechnik (IEI) - Institut für Informatik (IfI) Bornemann AG (BAG) Bundesverband Solare Mobilität e. V. (BSM) Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V. (FfE) RegenerativKraftwerke Harz GmbH u. Co. KG (RKWH)	
Bearbeiter:	Dipl.-Ing. Benjamin Schwake benjamin.schwake@tu-clausthal.de	(Tel: 72-2929)
Projektleiter:	Dr.-Ing. Dirk Turschner turschner@iee.tu-clausthal.de	(Tel: 72-2592)

Problem: Während Biogas- und Windenergieanlagen vor allem an das elektrische Mittelspannungsnetz angeschlossen sind, speisen Photovoltaik- und Kleinstwindkraftanlagen häufig direkt, bei unsymmetrischer Betriebsführung, in das elektrische Niederspannungsnetz ein. Das Niederspannungs- bzw. Verteilnetz ist daher nicht länger, wie in der früheren Energiestruktur, ein passiver Verbraucher, sondern wird, in Abhängigkeit von den Wetterbedingungen, die jedoch nur bis zu einer gewissen Genauigkeitsschranke prognostizierbar sind, zu einem aktiven Erzeuger.

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt liegen für die Höchst- und Hochspannungsebene redundante Datensätze zum Netzzustand vor, während in den Niederspannungsnetzen lediglich für wenige Einspeisestellen Echtzeitmessungen zur Knotenspannung und zur eingespeisten Leistung vorliegen, die für eine Überwachung des Systems verwendet werden könnten. Als weitere Herausforderungen zur Erstellung einer detaillierten Analyse der Leistungsflüsse auf der Verteilnetzebene erweisen sich die sehr kurzen Leitungen, die einen hohen Leistungsfaktor aufweisen und über die eine unsymmetrische, weit verzweigte und stark schwankende Belastung auftritt.

Ziel: Entwicklung von Verfahren und Werkzeugen zur Berechnung des nicht beobachtbaren Niederspannungsnetzes mit unsymmetrischen Verbrauchern. Ziel ist es das Verfahren an unterschiedlichen Netztopologien zu erproben.

Lösungsweg: Dem Beobachter liegt die Überlegung zu Grunde, dass man die Zustände des Netzes mit Hilfe von Prognosen und Messungen und einem entsprechenden mathematischen Modell möglichst exakt bestimmt. In einem ersten Schritt wird das mathematische Modell des Niederspannungsnetzes beschrieben. Zur Weiterentwicklung des Beobachters wird eine möglichst genaue Prognose aufgestellt, um so die nicht beobachtbaren Systemzustände zu überwachen. Zur Verbesserung der Zustandsschätzung ein dynamisches Modell zur Vergrößerung der Redundanz eingeführt. Zusätzlich wird ein Kalman Filter parametrisiert, um die Zustände zu beobachten. Das Prinzip des Beobachters zeigt die unten stehende Abbildung.

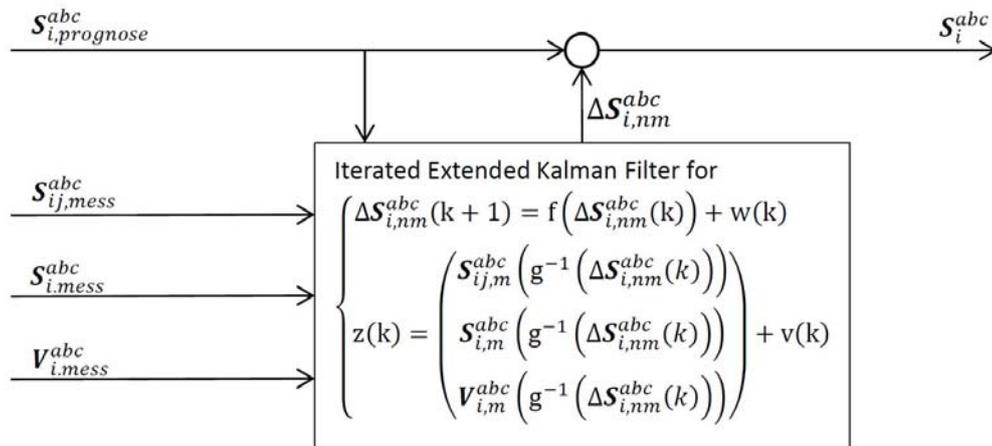


Abbildung: Grundsätzliche Struktur des Knotenlastbeobachters (Nodal Load Observer NLO)

Projektstand: Das Projekt ist in Bearbeitung

Projektpartner:

- 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
- Turkiye Bilimsel ve Teknolojik Arastirma Kurumu (TUBITAK), Turkey
- Universität Strathclyde, United Kindom
- Technische Universiteit Eindhoven(TU-E), Netherlands
- Technische Universiteit Delft (TU Delft), Netherlands

Bearbeiter: Guosong Lin, M. Eng. (Tel: 72-3720)
guosong.lin@tu-clausthal.de

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

Projekt: Aktive Schwingungsdämpfung in Antriebsträngen mit Planetengetrieben am Beispiel der Windkraft

Problem: Windkraftanlagen müssen durch ein hohes Maß an Zuverlässigkeit und damit Betriebssicherheit gekennzeichnet sein. Fehler am Antriebsstrang der Anlagen sind immer noch ein häufiger Ausfallgrund.

Die im Betrieb auftretenden Lasten und damit die örtlichen Beanspruchungen an den Bauteilen bestehen, neben dem statischen bzw. quasistatischen Anteil, aus einem hohen dynamischen Anteil durch die Windlast sowie Böen und bestimmte Sonderereignisse.

Ziel: In diesem Vorhaben soll eine zusätzliche Regelung entwickelt werden, um Schwingungen an solchen Antriebssträngen aktiv zu dämpfen. Exemplarisch wird das Beispiel einer Windkraftanlage betrachtet. Der Regler wird so ausgelegt, dass er an verschiedenen gängigen Generatorkonzepten mit feldorientierter Regelung (Synchronmaschine, Asynchronmaschine mit Vollumrichter und doppeltgespeist) anwendbar ist.

Deutlich bessere Ergebnisse sind zu erwarten, wenn die Wellenmomente des Antriebsstrangs bekannt sind, da diese sehr dynamische auf Lastwechsel reagieren. Bei Antriebssträngen mit einem Getriebe mit großer Übersetzung, wie dies in Windkraftanlagen üblich ist, ist es aufwändig, das sehr hohe Moment an der langsam drehenden Welle zuverlässig zu messen. Aus diesem Grund soll in diesem Vorhaben mit einer dynamischen Beobachtung des Drehmoments gearbeitet werden.

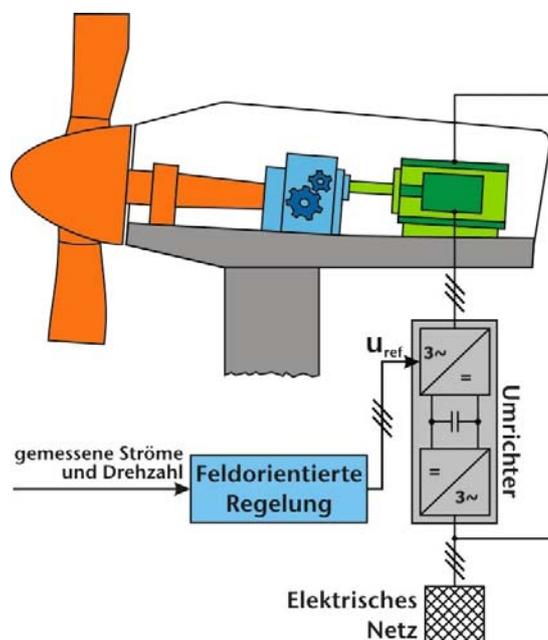


Abbildung 1: Grundsätzlicher Aufbau einer Windkraftanlage mit doppelter gespeister Asynchronmaschine und Getriebe

Stand der Technik: Die aktive Dämpfung von Antriebsschwingungen ist am Institut für Elektrische Energietechnik (IEE) seit langem ein Forschungsthema. Bei Antriebssträngen, die eine elektrische Drehfeldmaschine beinhalten, ist es prinzipiell möglich über die feldorientierte Regelung der Maschine eine Dämpfung zu erreichen. Hierbei kann ein Dämpfungseffekt entweder durch Anpassen des bestehenden Regelungskonzepts oder mittels eines zusätzlichen Reglers erreicht werden.

Bei einer Windkraftanlage kann die Schwingungsdämpfung zum einen über die Regelung zur Einstellung des Pitch-Winkels, also durch eine Verstellung des Rotorblatts, oder über die feldorientierte Regelung des Generators erfolgen. Heutzutage wird zur aktiven Schwingungsdämpfung in Windkraftanlagen häufig eine Drehzahl-Vorsteuerung eingesetzt, welche die gemessene Generatordrehzahl rückkoppelt. Auf diese Weise sind bereits gute Ergebnisse im Bereich der Schwingungsdämpfung möglich. Dieses Verfahren dient in diesem Vorhaben als Referenz.

Bei Antriebssträngen, die ein Getriebe mit großer Übersetzung beinhalten, ist es im Besonderen kompliziert die hohen Drehmomente der Antriebswellen zuverlässig zu messen. Es gibt Drehmomentmesswellen, die solche großen Momente messen können, jedoch sind dies aufwändige und teure Sonderanfertigungen und bei rauhem Klima störanfällig.

Lösungsweg: Der Entwurf von Regler und Beobachtung wird zunächst exemplarisch in einer Simulation durchgeführt, die Generator, mechanischen Komponenten und die Regelung beinhaltet. Hierzu wird die Software Matlab/Simulink verwendet.

Anschließend sollen die Ergebnisse an einem Versuchsstand validiert werden, der den Antriebsstrang einer Windkraftanlage mit doppelt gespeistem Asynchrongenerator und allen wichtigen mechanischen und elektrischen Bauelemente einer solchen Anlage in kleinerem Maßstab nachbildet. Eine solche Anlage ist schematisch in Abbildung 1 dargestellt, der Versuchsstand selbst in Abbildung 2. Ein High-Torque Motor dient zur Nachbildung der Windlast.

Projekt: Aktive Schwingungsdämpfung in Antriebssträngen mit Planetengetrieben am Beispiel der Windkraft

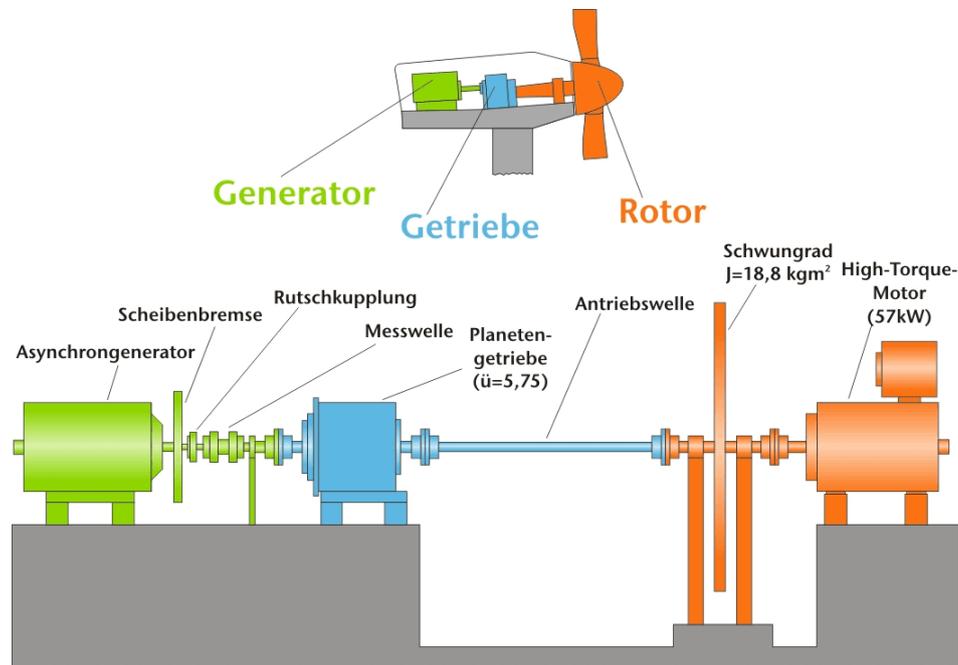


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Versuchstands zur Nachbildung des Antriebsstrangs einer Windkraftanlage am IEE

Projektstand: Das für den Regler- und Beobachtungsentwurf benötigte Modell wurde in Matlab/Simulink implementiert und getestet.

Die verfahren zur Beobachtung und zur aktiven Schwingungsdämpfung wurden an dem Modell in Simulationen getestet und zeigen gute Ergebnisse. Hierzu wurde die "Regelung zur Erhöhung der Lebensdauer des Antriebsstrangs" (RELA) entwickelt, die einen korrigierenden Drehzahl-Sollwert für die Drehzahlregelung ermittelt, der dem ursprünglichen Sollwert überlagert wird und so die Torsionsschwingungen im Antriebsstrang reduziert. Der Regler basiert auf der Idee, dass durch Ausregeln der Drehbeschleunigung die Belastung durch Schwingungen reduziert werden kann.

Die Ergebnisse zeigen, dass auf diese Weise eine aktive Dämpfung von Schwingungen im Antriebsstrang sehr gut möglich ist. In Abbildung 3 ist das Differenzmoment der Getriebewellen über der Zeit dargestellt. Diese Differenz belastet das Getriebe und sämtliche Antriebs-elemente. Der blaue Verlauf zeigt das Verhalten ohne, der rote das mit RELA-Regelung. Darunter sind die mit einer Rainflow-Zählung ermittelten Lastkollektive in beiden Fällen dargestellt. Die reduzierte Schwingungsbelastung am Antriebsstrang ist deutlich erkennbar.

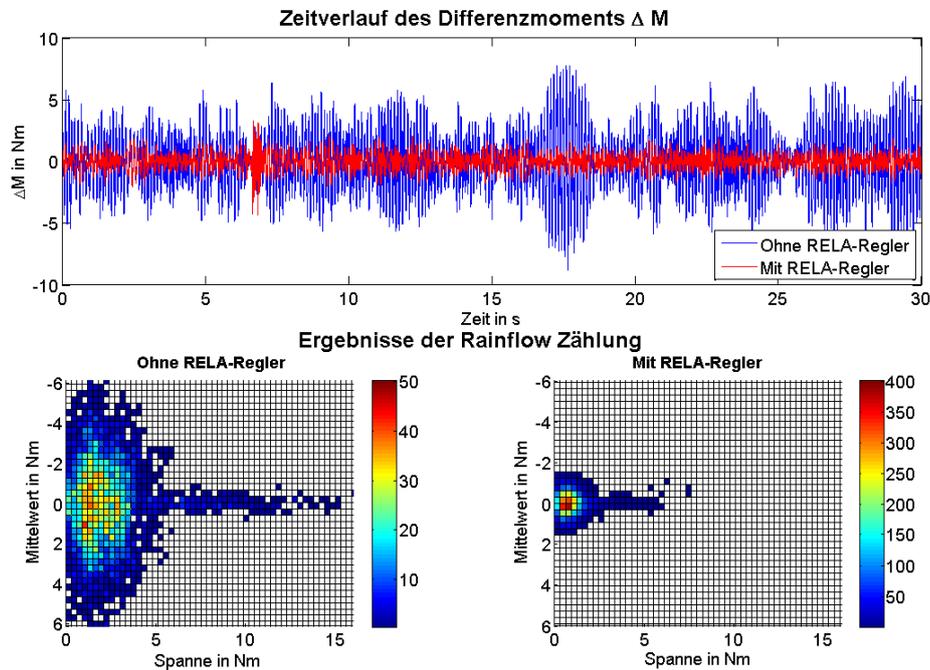


Abbildung 3: Oben: Zeitverlauf des Differenzmoment der Getriebewellen, dass das Getriebe belastet, ohne (blau) und mit (rot) der “Regelung zur Erhöhung der Lebensdauer des Antriebsstrangs” (RELA).
 Unten: Ergebnisse der Rainflow Zählung des Differenzmoments mit und ohne RELA-Regler. Farblich dargestellt sind die Anzahl der Schwingungen mit dem jeweiligen Wert.

Der Umbau des Versuchsstands wurde abgeschlossen, zurzeit erfolgt die Inbetriebnahme. In einem nächsten Schritt werden dann die entwickelten Konzepte am Versuchsstand implementiert und dort getestet.

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Nikola Ell

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

Problem: Der anhaltende Anstieg dezentraler Erzeugungsanlage in Verteilnetzen führt zu neuen Herausforderungen in Bezug auf Sicherheitskonzepte. Schutzkonzepte, sowohl für Lebewesen als auch für Betriebsmittel, müssen aus diesem Grund aus einer anderen Perspektive erneut überdacht werden. Dieses Umdenken muss aus dem Fakt heraus geschehen, dass sich der Leistungsfluss nicht wie in der Vergangenheit streng vom überlagerten Netz zum Verteilnetz sondern auch in die andere Richtung darstellt, vgl. Abbildung 1. Das Netz wird von großen Kraftwerken gebildet, welche ebenfalls für die Stabilität durch den Einsatz von Momentanreserve, Primär- und Sekundärregelung sorgen. Die sich ändernde Leistungserzeugung hin zu dezentralen, verhältnismäßig kleinen Kraftwerken auf der Verteilnetzebene führt dazu, dass diese DER (engl. *decentralized energy resources*) ebenfalls Funktionalitäten für die Stabilität des globalen Netzes übernehmen müssen. Aus diesem Grund steigt die Wahrscheinlichkeit der Ausbildung stabiler Inselnetze bei Ausfall des überlagerten Netzes.

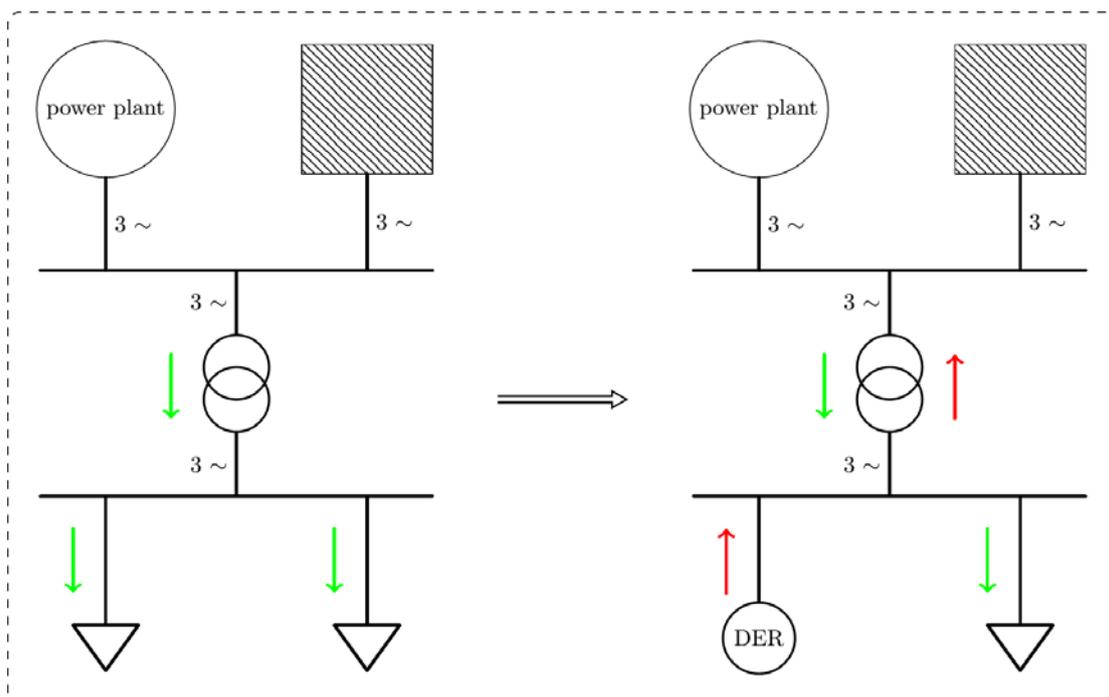


Abbildung 1: Änderung Leistungsfluss

Die geschilderten Gegebenheiten bieten neben der Gefahr einer ungewollten Inselnetzbildung ebenfalls die Möglichkeit die Verfügbarkeit - besonders in Verbindung mit einem Energiespeicher - eines MicroGrids zu erhöhen. Die Regelung der aktiven Komponenten und der Speichersysteme im MicroGrid müssen auf die neue Betriebssituation angepasst werden.

In beiden Fällen ist eine sichere und schnelle Erkennung der Verinselung unabdingbar für die entsprechende Reaktion des MicroGrids auf die sich neu ausgebildeten Gegebenheiten. In der Literatur werden unterschiedliche Inselnetzerkennungsverfahren genannt, welche in aktive und passive Verfahren unterschieden werden [1]. Da im Rahmen dieses Projektes ein Verfahren basierend auf der Tauschcharakteristik des Frequenzsignals vorgestellt wird und passive Verfahren keine Auswirkungen auf die Qualität der Netzspannung haben, werden in diesem Bericht nur passive Verfahren betrachtet.

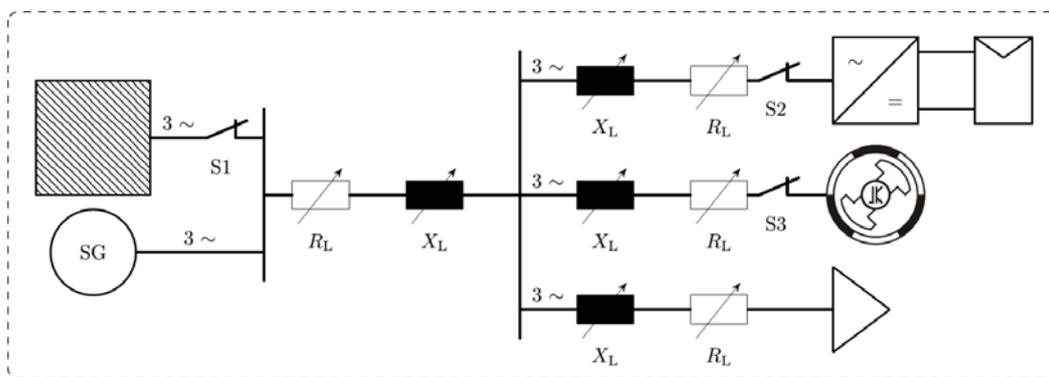


Abbildung 2: Struktur zu Inselnetzerkennungsversuchen

Ziel: Ziel des Projektes ist es, bestehende Inselnetzerkennungsverfahren in einem realen Aufbau zu testen und Schwachstellen zu erkennen. Des Weiteren wurde im Projekt ein Verfahren präsentiert, welches durch statistische Parameter Rückschlüsse auf den Netzzustand zulässt.

Stand der Technik: Aktive Komponenten in einem MicroGrid überwachen immer die Frequenz und die Spannung an ihrem Anschlusspunkt. Die dabei akzeptablen Grenzen sind in [2] definiert. Die Frequenz muss sich im Bereich von $f = 50 \text{ Hz} + 4 \% / - 6 \%$ während der gesamten Zeit befinden. Der Effektivwert der Spannung darf im 10-Minuten Mittelwert den Bereich von $U = U_N + 10 \% / -15 \%$ nicht verlassen. Somit würde eine Verletzung dieser Grenzwerte (insbesondere der Frequenz) automatisch eine Verinselung implizieren - oder zumindest ein Problem innerhalb des MicroGrids-, mit einer automatischen Abschaltung oder Veränderung der Regelungsstrategie als Resultat. Insbesondere stellt die Frequenz einen sehr starren Parameter dar, da dieser global über die Netzebenen hinweg existiert. Die Spannung hängt von dem Ort innerhalb des MicroGrids sowie der aufgenommenen/abgegebenen Leistung der jeweiligen Komponente ab. Da aktive Komponenten innerhalb des MicroGrids netzdienliche und stabilisierende Konfigurationen enthalten können, kann eine Verinselung unter Umständen nur

schwer detektierbar sein.

Abbildung 2 zeigt die Struktur des Netzes, welche für Inselnetzerkennungsversuche verwendet wurde. Die aktiven Komponenten des Netzes werden durch die VISMA (über S3 mit dem Netz verbunden), einem mit einer Batterie verbundenem Umrichter (S2) und einer Synchronmaschine, welche sich auf einer Sammelschiene mit dem Netzanschluss befindet, gebildet. Ein Öffnen des Schalters S1 führt zu der Verinselung des gezeigten MicroGrids. Je nach Parametrierung der Einzelkomponenten kann ein stabiler Betrieb – in Bezug auf Frequenz-/Spannungsqualität erreicht werden.

Die Synchronmaschine wird durch eine Asynchronmaschine angetrieben, welche durch einen Frequenzumrichter angesteuert wird. Der Umrichter kann so parametrierung werden, dass eine frequenz-abhängige Ansteuerung (die Proportionalverstärkung k_p und die Integrationszeitkonstante T_i) der Asynchronmaschine erreicht werden kann. Das dynamische Verhalten der VISMA kann maßgeblich durch die Parameter k_d , T_d , und J beeinflusst werden. Der Umrichter, welcher den Speicher nutzt, wurde so programmiert, dass eine Statik integriert wurde, welche über k_f parametrierung werden kann.

Abbildung 3 zeigt eine Messung der Verinselung des MicroGrids. Ströme und Spannungen wurden an drei verschiedenen Punkten innerhalb des Netzes gemessen. Die schwarze Kennlinie zeigt die Messung an der Last, die grüne Kennlinie zeigt den Messpunkt am Umrichter und die blaue Kennlinie die Messung auf der Sammelschiene von Netz/Synchronmaschine. Wie in der Abbildung zu erkennen ist, findet keine Verletzung der Frequenz-/Spannungsgrenzen, trotz der Verinselung bei einer Zeit von $t \approx 7$ s, statt. Der Umrichter beginnt als Resultat der Frequenzänderung Leistung einzuspeisen, was einen stabilisierenden Effekt auf das Netz hat. Wie in dieser Messung zu sehen ist, stellen somit die Frequenz und die Spannung kein hinreichendes Maß für die Erkennung einer Verinselung dar. Die Messungen erlauben die Bildung anderer Indikatoren, welche eine Erkennung des Inselnetzes unter Umständen ermöglichen. Abbildung 3 zeigt ebenfalls die Größen Distortion, welche alle Frequenzen mit einer Amplitude von über 2 V berücksichtigt (um die Rauschterme auszuschließen), die Ableitung der Spannung $\frac{dU_{eff}}{dt}$ und die Ableitung der Leistung $\frac{dP}{dt}$. Die Spannung wird als Vektor mit einer Frequenz, Phase und Amplitude betrachtet und entsprechend nach diesen Größen ausgewertet. Die Verinselung führt zu einer Veränderung dieses Vektors, was zu einer Veränderung der Amplitude, der Frequenz, der Winkelbeschleunigung (Ableitung der Frequenz $\frac{df}{dt}$) und der Phase führt. Die Verinselung erfolgt nur an einem Zeitpunkt und ist schwer aufgrund dieser Größen von einer Laständerung zu unterscheiden. Dahingegen zeigt die Distortion eine permanente Veränderung der Größe beim Inselbetrieb.

Parameter	Quantity
kP	3
Ti	0,5 s
Kf	1000 W/Hz
load	3400 W

Tabelle 1: Verwendete Parameter für stabilen Inselbetrieb

Tabelle 1 zeigt die für den stabilen Inselbetrieb verwendeten Parameter. Der Schalter S3 war während dieser Messung geöffnet, jedoch konnte in anderen Experimenten ebenfalls gezeigt werden, dass ein stabiler Inselnetzbetrieb ebenfalls durch den Einsatz einer VISMA erreicht werden konnte.

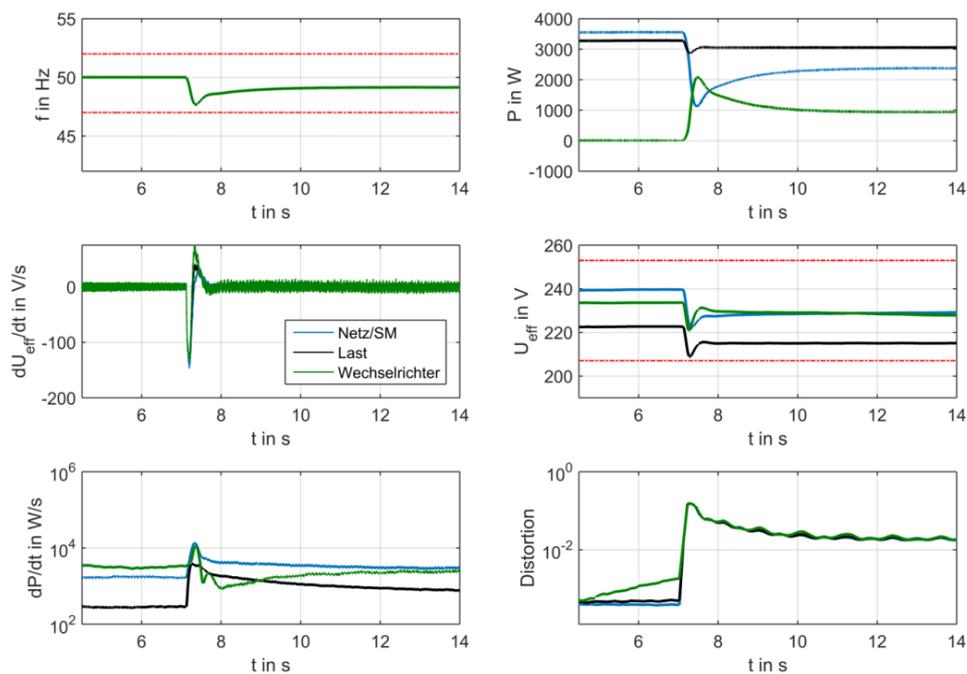


Abbildung 3: Messung Verinselung

Lösungsweg: Wie in Abbildung 3 zu sehen ist, verändert sich die Dynamik des Spannungsvektors nach dem Übergang in den Inselbetrieb. Durch den Einsatz eines Phasenregelkreises kann ein Frequenzsignal gewonnen werden. Im Verbundbetrieb lässt sich ein anderes statistisches Verhalten des Frequenzsignals im Vergleich zum Inselbetrieb beobachten. Ein Parameter, welcher diese Dynamik aufgreift und gleichzeitig einen guten Identifikationsparameter darstellt, ist die Summe der Quadrate der Differenzen (SQD), welcher durch Gleichung (1) beschrieben werden kann.

$$SQD(n) = \sum_{i=1}^{n-1} (f(i) - f(i+1))^2 \quad (1)$$

Die Identifikation basiert auf der Idee, dass im Netzparallelbetrieb sehr viele Lasten und Generatoren im globalen Netz vorhanden sind, welche durch ihr Verhalten die Frequenz in einem sehr kleinen Zeitbereich beeinflussen. Der Wert für SQD wird aus dem Frequenzsignal für n diskrete Punkte gewonnen. Die Anzahl der gemessenen Werte zur Erzeugung vom SQD in Kombination der Abtastzeit bilden dabei die Identifikationszeit ab.

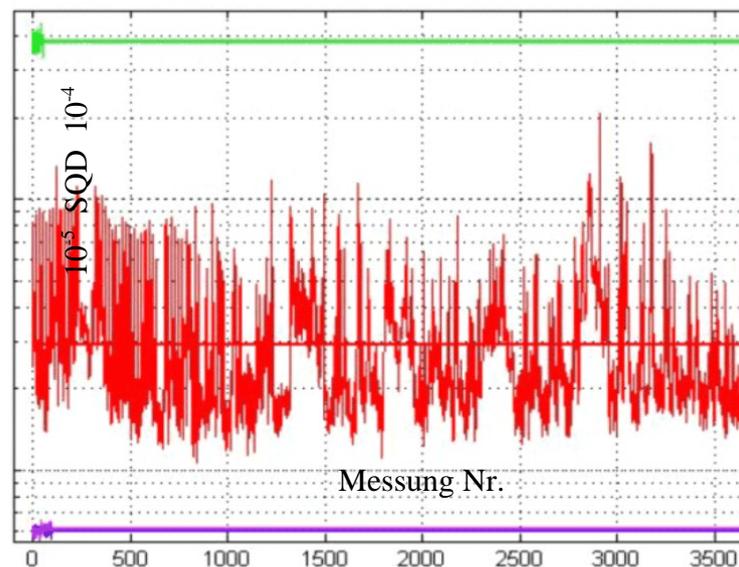


Abbildung 4: SQD unterschiedlicher Quellen
grün: VISMA, rot: Netz, blau/lila: Synchronmaschine

Speziell die Möglichkeit der Identifikation der im MicroGrid befindlichen Komponenten führt zu der Möglichkeit eine Identifikation des Netzzustandes vorzunehmen. Es kann gezeigt werden, dass unterschiedliche Teilnehmer spezielle SQD Werte im Netz ausbilden. Wenn das

überlagerte Netz als Komponente betrachtet wird, vgl. Abbildung 2, beeinflussen die hohe Anzahl an Lasten und Generatoren die Frequenz anders im Vergleich zu anderen Komponenten wie der Synchronmaschine oder der VISMA. Abbildung 4 zeigt die Messung des SQD für unterschiedliche Komponenten. Die grüne Kennlinie zeigt den SQD-Wert für ein Netz, in dem nur die VISMA aktiv ist. Die rote Linie repräsentiert den Netzparallelbetrieb des MicroGrids, wohingegen die lila/blau Kennlinie ein Netz, welches durch eine Synchronmaschine gebildet wird, zeigt.

Bei der Erzeugung der Kennzahl SQD sind einige Aspekte zu berücksichtigen. Zum einen hängt die Dynamik des Frequenzsignals von den Parametern des Phasenregelkreises ab. Zum anderen wird dieses Signal anschließend durch einen Hochpass gefiltert, da die sich langsam ändernden Anteile aus dem Signal (Sekunden-Minuten) für die SQD Generierung nicht von Bedeutung sind. Die Abtastzeit spielt eine entscheidende Rolle bei der Generierung der Kennzahl.

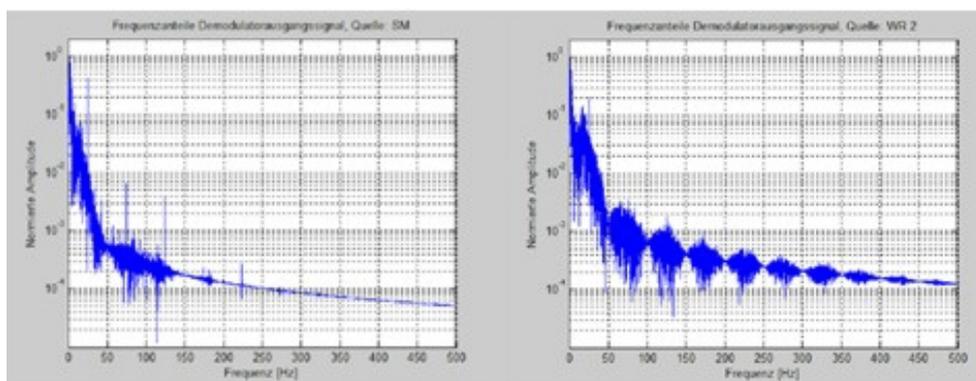


Abbildung 5: Frequenzabhängige Amplitude unterschiedlicher Generatoren

Des Weiteren kann diese Methode durch eine frequenzabhängige Analyse verbessert werden. Es kann gezeigt werden, dass das durch den Phasenregelkreis demodulierte Signal sich in Abhängigkeit der vermessenen Komponente und in Abhängigkeit bestimmter Frequenzbänder noch genauer identifizieren lässt. Abbildung 5 zeigt die frequenzabhängige Amplitude der Synchronmaschine (SM) auf der linken Seite im Vergleich zu einem 3-Phase Wechselrichter (WR2) auf der rechten Seite. Mit diesem Wissen kann die Erzeugung der Kennzahl SQD in gewissen Frequenzbändern geschehen, vgl. Abbildung 6. Die Abbildung zeigt den SQD für unterschiedliche Generatoren (SM = Synchronmaschine, Netz, WR1/2/3 = Wechselrichter) von einer Frequenz ab $f = 400$ Hz.

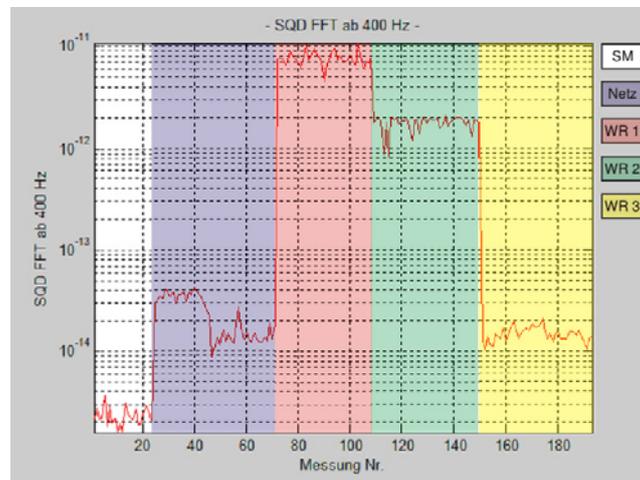


Abbildung 6: SQD, Frequenzspezifisch aber einer Frequenz von $f = 400$ Hz

References: [1] W. Bower; M. Ropp, "Evaluation of Islanding Detection Methods for Utility-Interactive Inverters in Photovoltaic Systems", Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico 87185, 2002

[2] Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution networks, German version EN 50160:2010+Cor.:2010

Projekthomepage: <http://www.smartnord.de>

Bearbeiter: Florian Pöschke, M. Eng

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

IEE

Projektübersicht

Projektleiter: Prof. Dr. rer. nat. Heinz Wenzl
Tel.: +49-5522/9191-70
E-Mail: heinz.wenzl@t-online.de

Arbeitsgruppe Energiespeicher

Forschungsschwerpunkte und Projekte

Die meisten technischen Systeme sind auf eine sichere und zuverlässige Versorgung mit elektrischer Energie angewiesen. Selbst eine sehr kurze Zeitverzögerung zwischen Bedarf und Bereitstellung durch das Versorgungssystem ist in vielen Fällen unzulässig und führt zum Versagen des Systems. Energiespeicher sind deshalb in zahlreichen technischen Anwendungen unverzichtbar, weil sie wirtschaftlich und technisch dazu beitragen, zu jedem Zeitpunkt das Gleichgewicht von Energieerzeugung und Energiebedarf zu gewährleisten. Dies gilt für netzgekoppelte Sicherheitssysteme, aber auch für autonome erneuerbare Energiesysteme, Bordnetze und elektrische Antriebssysteme von Fahrzeugen. Dabei konkurrieren Energiespeicher immer mit hochdynamischen Stromerzeugungseinheiten, Lastmanagement oder anderen Systemlösungen wie z.B. dem Netzausbau.

Batterien sind in der Lage, sowohl in Lade- als auch Entladerichtung sehr schnell auf Leistungsanforderungen zu reagieren. Eine genaue Analyse von Betriebsdaten zeigt, dass Batterien oft sehr hohen dynamischen Belastungen unterworfen werden, selbst wenn der mittlere Energieumsatz gering ist, und dass reale Nutzungsbedingungen sich sehr deutlich von den Bedingungen unterscheiden, die im Labor zur Untersuchung der Eigenschaften, Alterung und des Systemverhaltens verwendet werden.

Die in der Arbeitsgruppe durchgeführten Projekte umfassen vor allem:

- Projekte zur Modellierung des Systemverhaltens auch bei Alterungsprozessen
- Lebensdauerprognose
- Auswirkungen konstruktiver Operationen auf Zelleigenschaften
- Analyse realer Anforderungsprofile und Betriebsdaten
- Sicherheit und Verhalten von Batterien unter Abusebedingungen und
- Studien zum Einsatz von Batterien in Gesamtsystemen auch in Abgrenzung zu möglichen Alternativen.

Elektrochemische Umwandlungssysteme wie Brennstoffzellen und Elektrolyseure werden ebenfalls bzgl. dieser Fragestellungen untersucht.

Neben den im Folgenden genannten Projekten wurden auch zahlreiche studentische Abschlussarbeiten zu diesen Themenbereichen durchgeführt.

- **Alterung und Lebensdauerprognose**

Neben den Alterungsuntersuchungen im Rahmen eines DFG-Projekts und des Projekts BESIC zur Verwendung von Lithium-Ionen-Batterien im Hamburger Hafen werden auch im Graduiertenkollegs GEENI und im Weiterbildungsprojekt Mobile4E Arbeiten zu Alterungsprozessen und ihren Gesamtauswirkungen auf die Leistungsfähigkeit von Batterien durchgeführt. Dafür werden auch Stoffdaten basierte Detailmodelle aufgestellt. In einem weiteren Projekt „Lebensdauerprognose von Brennstoffzellen in realen Anwendungen“ wurden über die Untersuchungen von Alterungsprozessen hinaus Methoden zur Lebensdauerprognose untersucht. Dabei ist zu beachten, dass die Lebensdauerprognose das komplexe Zusammenwirken aller Alterungsprozesse und Bewertung auf einen integralen Wert, die zu erwartende Lebensdauer, erfordert und andere Ansätze als die Untersuchung einzelner Alterungsprozesse bedingt. Das Projekt Lebensdauerprognose von Brennstoffzellen ist bereits abgeschlossen und hat als ein Ergebnis ein Softwaresystem, das Interessierten Unternehmen und Forschungsinstituten kostenfrei zur Verfügung stehen wird. Auf Basis dieser Software soll die Übertragung des methodischen Ansatzes auf die Lebensdauerprognose von Batterien erfolgen.

- **Analyse und Untersuchung realer Betriebsdaten**

Batterien werden in realen Anwendungen ganz anders genutzt als vermutet. In folgenden Projekten werden die entsprechenden Fragestellungen bearbeitet:

- Für einen Mobilfunkbetreiber werden die Betriebsdaten eines Gesamtsystems ausgewertet, um Rückschlüsse auf das Systemverhalten machen zu können und Verbesserungsvorschläge zu formulieren.
- Bei Elektrostraßenfahrzeugen ist die Frage der Schnellladung von großer Bedeutung. In dem von der Europäischen Union (EFRE) geförderten Projekt werden Batterien für Fahrzeuge und Elektroroller mit Sensorik ausgestattet, um an möglichst vielen Stellen der Batterie die Temperatur messen zu können. Dies ist aus Sicherheitsgründen notwendig. Verschiedene Ladekennlinien werden bzgl. der Ladegeschwindigkeit und der Erwärmung beim Laden untersucht.
- Die Sicherheit von Batterien ist von hoher Bedeutung und es wird für die Untersuchung ein Batterietestzentrum errichtet, mit dem Batterien mit einer maximalen Leistung von 1000 kW und hoher Dynamik in Grenzbereichen betrieben werden können, inkl. der

Projektübersicht

Brandentstehungsgefahr. Anfang 2016 werden voraussichtlich alle Betriebsgenehmigungen auch für die Abgasreinigungen etc. vorhanden sein.

- Die Arbeitsgruppe ist weiterhin in Projekte am Energieforschungszentrum Niedersachsen eingebunden, bei dem es um das Laden großer Flurförderzeuge mit Batterien sehr hoher Leistung geht.

- **Studien zum Potential von elektrochemischen Energiespeichersystemen**

Batterien stehen immer in Konkurrenz zu anderen Batteriesystemen und anderen Alternativen. In dem Projekt „Potentiale Elektrochemischer Speicher in elektrischen Netzen in Konkurrenz zu anderen Technologie u. Systemlösungen (ESPEN)“ wird zusammen mit einem größeren Konsortium die Frage untersucht, in welchen Anwendungsfeldern elektrochemische Energiespeicher besondere Chancen im Vergleich zu Alternativen haben, und wie sie zur Ausschöpfung dieser Potentiale ggf. weiterentwickelt werden müssen.

IEE

Projekt: Batterieelektrische Schwerlastfahrzeuge im “intelligenten”
Containerterminalbetrieb - BESIC -

Zielsetzung d. Forschungsverbundes: Im BESIC-Vorhaben wird versucht nachzuweisen, dass die Elektromobilität mit einem Batteriewechselkonzept bei geschlossenen Transport- und Logistiksystemen betriebswirtschaftlich lohnenswert ist. Nach Möglichkeit soll aufgezeigt werden, dass sich in einem Anwendungskontext wie dem Containerterminal Altenwerder in Hamburg ein Wettbewerbsvorteil durch die Einführung von Elektrofahrzeugen ergeben kann. Herkömmliche diesel-elektrische Transportfahrzeuge werden im Rahmen von BESIC mit solchen verglichen, die durch konventionelle Blei-Batteriesysteme oder durch innovative Lithium-Batteriesysteme angetrieben werden. Führen intelligente Batteriewechsel- und Lade-strategien zu deutlichen Betriebskosteneinsparungen, kann das richtungsweisend für den Schwerlastverkehr sein. Das Logistikgeschehen birgt bei gesteuertem Laden gewisse zeitliche Lastverschiebungspotenziale, die seitens des Terminalbetreibers im Austausch mit Stromlieferanten und weiteren Energiewirtschaftsakteuren vermarktet werden können. Unter anderem lassen sich Vergünstigungen im Strombezug erzielen, die einem Batteriewechselkonzept mit Berücksichtigung einer Restwertminderung bei den Fahrzeugbatterien zum Durchbruch verhelfen können.



Abbildung 1: Schwerlastfahrzeug (AGV) für den Containertransport im Hamburger Hafen mit batterie-elektrischem Antrieb (Quelle: TEREX, HHLA/CTA)

Ziel d. Teilprojektes 2.2.1: In diesem Teil des Arbeitspakets sollen unter Laborbedingungen Leistungstest sowie Untersuchungen des Degradationsverhaltens bei Batteriesystemen auf Basis von Lithium-Ionen und/oder Lithium-Polymer-Technologie (Unterscheidung Typ 1 und Typ 2) durchgeführt werden. Das Ziel ist eine Verbesserung der Möglichkeiten zur technisch-ökonomischen Beurteilung des Einsatzes der Batteriespeichersysteme für Elektromobilität und der Bewirtschaftung dieser unter einem Batteriewechselkonzept.

- Mit den Leistungsprüfungen soll das Batteriewechselkonzept auf den Prüfstand gestellt werden und vor allem die Möglichkeiten für Schnellladevorgänge und eine technisch ökonomisch leicht gewichtigere Ladeinfrastruktur besserersehen werden.
- Ausgehend von den Degradationsuntersuchungen sollen nach Möglichkeit Modelle zur Abschätzung der Restwertminderung aufgestellt werden, die beim Einsatz der Batteriesysteme für die Elektromobilität im Containerterminal eintritt. Damit wird ein Grundstein gelegt, um zu einer genaueren Bewertung der Betriebskosten zu kommen und den Batterieeinsatz entsprechend in Ausrichtung auf die Strommärkte optimieren zu können.

Diese beiden Forschungsfragen werden neben dem Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme von verschiedenen Projektpartnern bearbeitet (siehe Abschnitt Projektpartner)

Projektstand: Schwerpunkt der Systemtests war die Untersuchung des Systemverhaltens bei verschiedenen Ladeleistungen. Die bisher im AGV verwendeten Bleibatterien erlauben lediglich Ladezeiten im Bereich von 7-8 Stunden. Im Gegensatz dazu bieten moderne Lithium-Systeme die Möglichkeit mit deutlich höheren Leistungen zu laden, so dass die drei Varianten “langsameres Laden”, “normales Laden” und “Schnellladung” zu untersuchen waren. Im Folgenden sollen die Ergebnisse der Tests beider Batterien näher erläutert werden die Abbildungen 2 und 3 zeigen beispielhaft den Verlauf einer “normalen” Ladung und einer Schnellladung der Typ 1 Batterie.

Als Vorgabe für die “normale” Ladung galt es, eine Ladedauer von ca. 3 Stunden zu erreichen, weshalb eine Ladeleistung von 80 kW gewählt wurde. Der maximale Ladestrom lag dabei im Bereich von etwa 120 A, was eine moderate Erhöhung der mittleren Batterietemperatur von rund 3°C zur Folge hatte. Ebenfalls lässt sich in Abbildung 2 erkennen, dass das Batteriesystem vom Typ 1 über eine aktive Stromregelung verfügt. So wird im unteren Ladezustandsbereich der Ladestrom zunächst begrenzt, um der Alterung entgegen zu wirken.

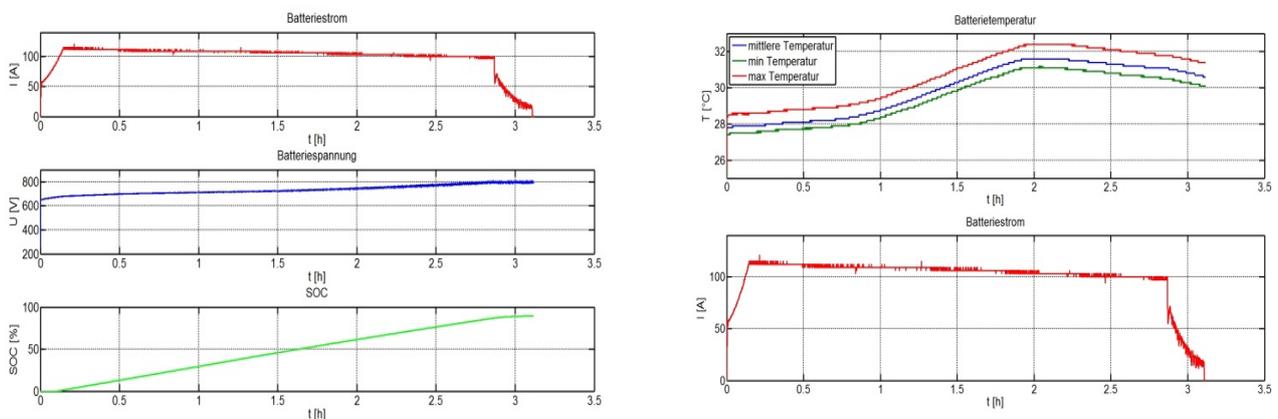


Abbildung 2: Verlauf der Kenngrößen der Typ 1 Batterie bei einer Ladung mit 80 kW (normale Ladung)

Projekt:

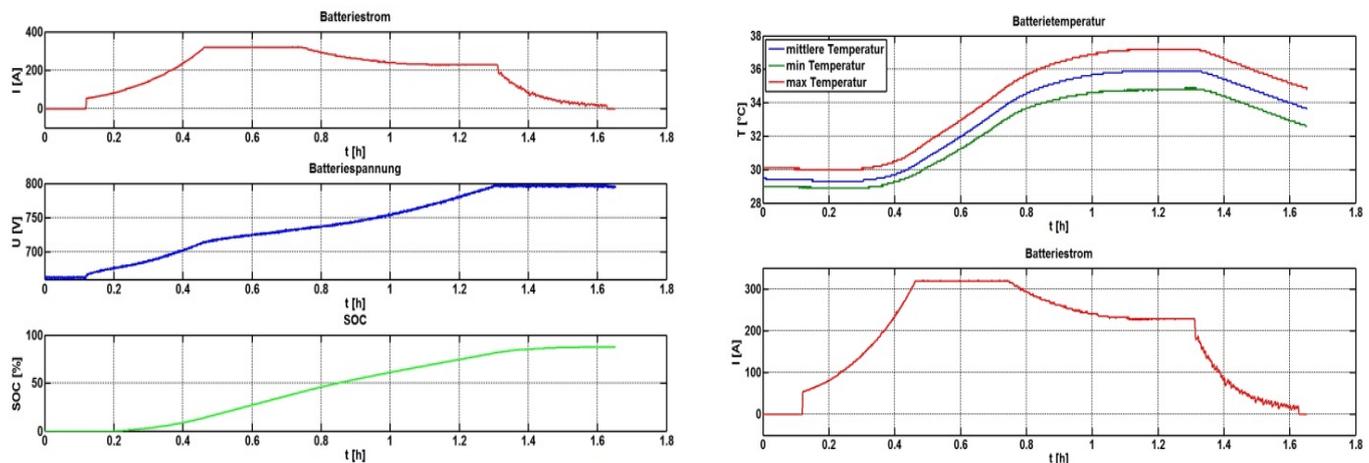
Batterieelektrische Schwerlastfahrzeuge im "intelligenten"
Containerterminalbetrieb - BESIC -

Abbildung 3: Verlauf der Kenngrößen der Typ 1 Batterie bei einer Ladung mit 250 kW (Schnellladung)

Abbildung 3 stellt den Verlauf der Schnellladung des Batteriesystems Typ 1 dar, wobei zu erkennen ist, dass die Schnellladung in 90 Minuten andauerte. Hierfür wurde vom Ladegerät die maximale Ladeleistung von 250 kW zur Verfügung gestellt, wobei das Batteriesystem zunächst im unteren Ladezustandsbereich den Ladestrom begrenzte. Ab einem Ladezustand von 15 % erfolgte die Ladung mit 1 C bzw. 318 A, bis die maximale Zelltemperatur 35°C erreichte. Die aktive Stromregelung des Batteriesystems ist so ausgelegt, dass der maximale Ladestrom in Abhängigkeit von Ladezustand und Batterietemperatur begrenzt wird. Diese Regelung soll eine größtmögliche Lebensdauer des Systems gewährleisten. Für den Test der Schnellladefähigkeit wurde eine Starttemperatur von 27°C gewählt, um einen vorherigen Einsatz der Batterie zu simulieren. Bei einer Starttemperatur von beispielsweise 20°C wäre eine komplette Schnellladung wohl auch in ca. 75 Minuten zu realisieren, da in diesem Fall länger mit dem maximalen Ladestrom von 318 A geladen werden könnte.

Die Degradationsuntersuchungen der verschiedenen Lithium-Technologien erfolgen auf Modulebene. Hierzu wurde ein mögliches Testprofil erstellt, welches auf Fahrdaten der Bleibatterie AGV zurückzuführen ist. Zutreffender kann das Fahrprofil eher als "Standprofil" bezeichnet werden, da die Auswertung erster Fahrdaten ergab, dass die Strombelastungen auf die Batterien im Feld eher als gering einzuschätzen sind. Die Fahrdaten weisen bisher lediglich geringe Dauerströme und nur kurzzeitig hohe Stromamplituden auf. Die Höhe der Stromamplituden ist dabei abhängig von der Zuladung der AGV und resultiert aus den Anfahrströmen der Fahrzeuge. Bei der Auswertung der Daten ergaben sich maximale Anfahrströme in Höhe von 357 A, welche im Bereich des Nennstromes der Batteriesysteme liegen. Das für die Labortests vorgesehene Testprofil hatte daher den in Abbildung 4 dargestellten Verlauf.

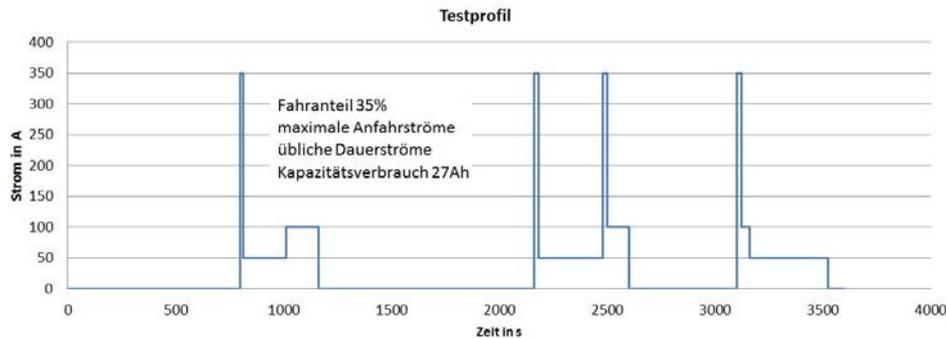


Abbildung 4: Testprofil für Modultests zur Degradationsuntersuchung

Im Allgemeinen wird derzeit davon ausgegangen, dass die Batterien im Feld sehr wahrscheinlich eher einer kalendarischen Alterung unterliegen werden. Dies liegt zum Einen an der geringen “Fahrbelastung”, zum Anderen gibt es nur ein Lithium-Fahrzeug. Das heißt, es wird nur eine Batterie im Betrieb sein, während die andere Batterie in der Ladestation verweilt. Betrachtet man die hohen Energieinhalte der beiden Batteriesysteme, so ist es durchaus denkbar, dass mit den Lithium Systemen durchaus Fahrzeiten von bis zu 24 h möglich erscheinen, wodurch die jeweils nicht benutzte Batterie eine ebenso lange Standzeit ereilt. Dabei wird die Alterung massiv vom Ladezustand und den äußeren Bedingungen abhängen, welche derzeit nur vermutet werden können und später aus den realen Daten des Feldtests ermittelt werden sollen. Diese Faktoren sprechen für eine überwiegend kalendarische Alterung der Batteriesysteme.

Förderung: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

Projektpartner:

- Universität Oldenburg:
- Institut für Informationstechnik
- Professur für Informationsmanagement
- Hamburger Hafen und Logistik AG HHLA/CTA
- TEREX MHPS
- Vattenfall

Bearbeiter: Marcel Thiele, M. Eng. (Tel: 05321/3816-8161)
marcel.thiele@efzn.de

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. H.-P. Beck
Info@iee.tu-clausthal.de

Projekt: Modellierung und Simulation der Zelleigenschaften auf Basis von zeitvarianten Stoffdaten (GEENI)

Problem: Eine erfolgreiche Modellierung von Lithium-Ionen-Batterien muss alle physikalischen und elektrochemischen Vorgänge, wie beispielsweise die elektrochemischen Reaktionen an den Elektroden, die Diffusion und Migration von Ionen im Elektrolyten, den Transport elektrischer Ladungen und den Wärmetransport abbilden. Zusätzlich kann es zu Beeinflussungen der Eigenschaften durch Volumenänderungen und mechanischen Spannungen in den Elektroden kommen. Ein umfassendes Modell muss in der Lage sein, nicht nur die resultierende Zellspannung beim Laden und Entladen, sondern auch die sich in der Batterie einstellenden Temperaturverläufe und mechanischen Spannungen auf der Mikroebene abzubilden. Weiterhin muss ein solches Modell die alterungsbedingten Veränderungen der Materialeigenschaften berücksichtigen.

Lokale Stromdichten, Temperaturen und Potenziale innerhalb einer Batteriezelle werden von mehreren Faktoren beeinflusst. Bestimmende Parameter sind vor allem die Geometrie einer Zelle und die Materialeigenschaften. Weiterhin werden die Elektrodenmaterialien von Akkumulatoren in Abhängigkeit verschiedener Betriebsbedingungen (z.B. Umgebungstemperatur, Ladezustand, Höhe des Lade- und Entladestroms) unterschiedlich belastet.

Ziel: Ziel dieses Projektes ist eine genaue Bestimmung der lokalen Zustandsgrößen in Abhängigkeit der Zellkonstruktion und der Materialeigenschaften. Inhaltlich wird der Aufbau einer Simulation auf der Elektroden- und Zellebene behandelt. Ergebnis ist ein ortsaufgelöstes, mehrdimensionales Simulationsmodell zur Darstellung der Stromdichte-, Spannungs- und Temperaturverteilung innerhalb einer Vollzelle. Durch die Simulation sollen lokale Materialfehler (z.B. Verunreinigungen), wie sie bei der Produktion von Batterien entstehen können, und die Materialermüdung durch Betrieb der Zellen anhand der Ausgabegrößen erkannt werden.

Stand der Technik: Zur Modellierung von Lithium-Ionen-Batterien wurden diverse Modelle vorgestellt. Diese besitzen verschiedenste Ansätze und weisen unterschiedliche Eigenschaften auf. Beispielsweise existieren isotherme, dynamische 2D-Modelle, die den Ladungs- und Ionentransport sehr detailliert abbilden. Solche Modelle besitzen eine hohe Rechenzeit, die sich nur durch geeignete Vereinfachungen reduzieren lässt. Weiterhin gibt es Modelle, die zur tiefergehenden Betrachtung nur einzelne Bereiche einer Zelle betrachten oder unter Verwendung verschiedener Ersatzschaltbilder eine Modellierung auf Systemebene gestatten.

Thermische Modelle, die einzelne Wärmeerzeugungsmechanismen, abbilden sind aus verschiedenen Bereichen, wie beispielsweise der Brennstoffzellenforschung, bekannt. Hier stehen die elektrochemischen Reaktionen, ohmschen Überspannungen und Diffusionsüberspannungen unter Berücksichtigung der drei Wärmeübertragungsmechanismen im Vordergrund.

Lösungsweg: Basis für die Modellierung des zu betrachtenden Systems ist ein elektrotechnisches Netzwerk, dem verschiedene Verfahren zur Analyse zu Grunde liegen. Beispielsweise werden Maschenströme, Knotenpotenziale und Ersatzquellen innerhalb der untersuchten Zelle ermittelt. Die Vorgehensweise wird in Simulationen auf unterschiedlichen Skalengrößen verwendet. Die Betrachtung beginnt im Aufbau der Elektroden und endet auf Ebene der Zelle. Die errechneten Daten werden den höher aggregierten Simulationsmodellen übergeben. In diese Modelle wird in einem zweiten Schritt ein thermisches Ersatzschaltbild integriert, welches Wärmeentwicklung und -transport innerhalb der Zelle abbildet. Die Erstellung des Simulationsprogramms erfolgt mittels MATLAB/ Simulink.

Projektstand: Zur Schaffung einer geeigneten Datengrundlage für die Modellbildung und Simulation wurden in Absprache mit den verbundenen Forschungsinstituten verschiedene standardisierte Prüfverfahren und Messroutinen erarbeitet. Dies beinhaltet die Verwendung von einheitlichen Materialien und Herstellungsverfahren für die zu betrachtenden Lithium-Ionen-Batterien. Weiterhin wurde eine umfangreiche Datensammlung durch mehrere Forschungsstellen zusammengetragen. Durch eigene Messungen im Speicherlabor des IEE werden Daten, die als Grundlage für die Berechnungen dienen, ermittelt.

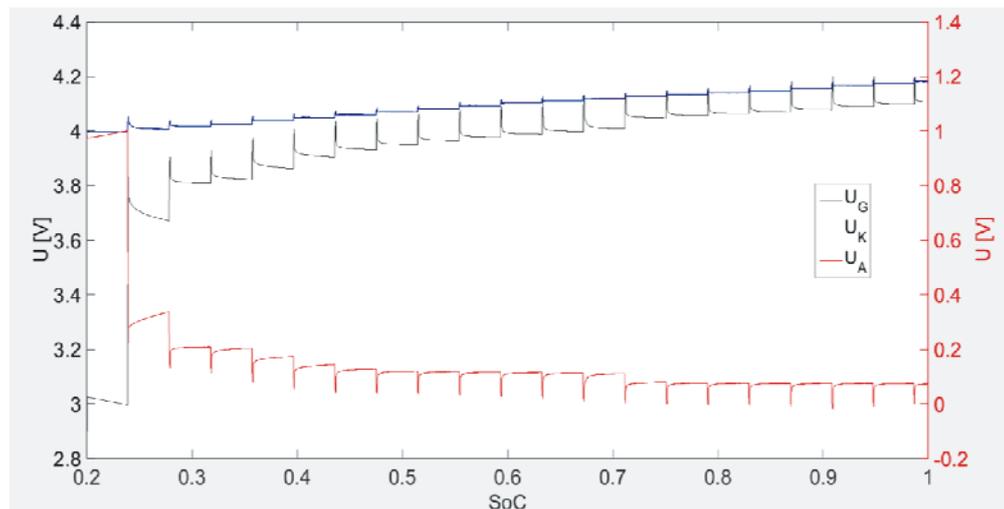


Abbildung 1: Messung der Spannung von Anode (U_A), Kathode (U_K) und der Gesamtspannung (U_G) einer LMO-Zelle in Abhängigkeit des Ladezustands (SoC)

Projekt: Modellierung und Simulation der Zelleigenschaften auf Basis von zeitvarianten Stoffdaten (GEENI)

Diese Messungen werden mit Hilfe einer 3-Elektrodenanordnung durchgeführt. Aus den Messergebnissen werden Funktionen abgeleitet, die zur Simulation im Modell hinterlegt werden. Weiterhin werden Daten aus Impedanzmessungen (vgl. Abbildung 2) und Sprungantworten auf Strompulse gewonnen.

Zur Ermittlung von thermischen Stoffdaten der Aktivmaterialien werden Verfahren der dynamischen Differenzkalometrie verwendet.

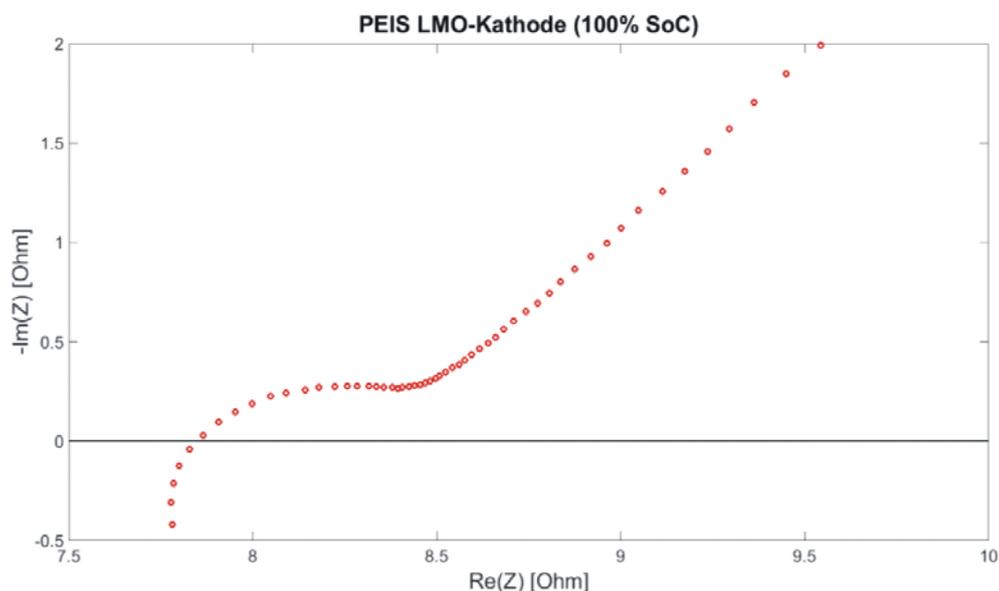


Abbildung 2: Potentiostatische Impedanzmessung LMO-Kathode (U_K) bei einem Ladezustand (SoC) von 100%

Die Grundlagen des elektrischen Ersatzschaltbildmodells wurden auf mögliche Vereinfachungen geprüft und werden derzeit in MATLAB/Simulink umgesetzt. Erste Simulationen nach dem in Abbildung 3 dargestellten Ersatzschaltbild wurden erfolgreich durchgeführt.

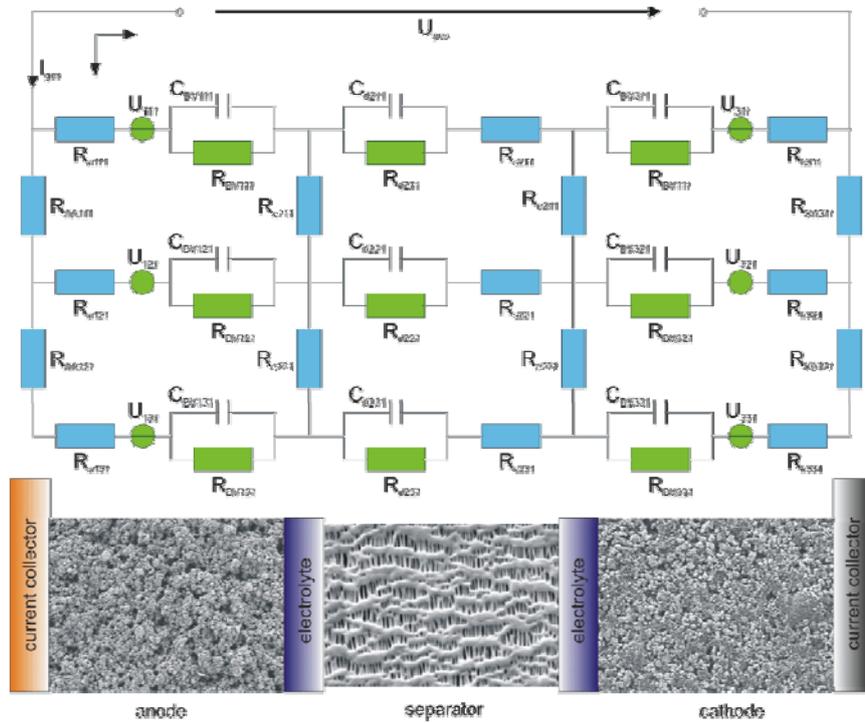


Abbildung 3: 2D-Darstellung des elektrischen Ersatzschaltbilds

Abbildung 4 zeigt die Verteilung der Stromdichte einer Zelle mit einer Kapazität von 10 Ah an den anodenseitigen Kontrollpunkten bei einer Belastung mit 1 C. Die Entladung beginnt bei einem Ladezustand von 85 %. Die Batterie wird über den dargestellten Zeitraum vollständig entladen.

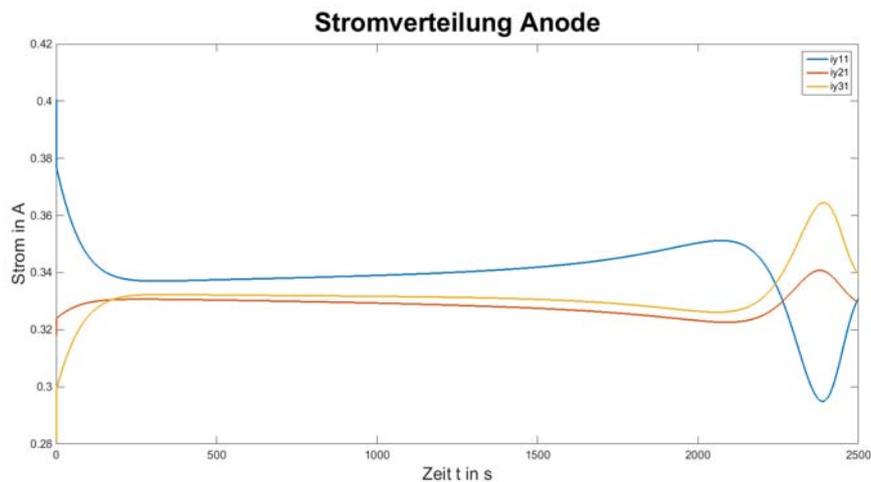


Abbildung 4: Ergebnisse für die Stromverteilung anodenseitig für eine 2-D Simulation

Projekt: Modellierung und Simulation der Zelleigenschaften auf Basis von zeitvarianten Stoffdaten (GEENI)

Nach der Erstellung eines Ersatzschaltbilds, das sich zur Modellierung auf Zell- und Systemebene eignet, wird derzeit ein Ansatz für ein thermisches Modell erarbeitet. Unter Berücksichtigung der verschiedenen Wärmequellen und der relevanten Wärmeübertragungsmechanismen wird ein thermisches Ersatzschaltbild entwickelt. Vereinfachungen, die zur Reduzierung der Rechenzeit beitragen, um auf Zellebene in angemessener Zeit das Verhalten simulieren zu können, werden derzeit geprüft.

Messungen die zur Validierung und Verifizierung des Modells nötig sind, werden parallel zur Modellbildung, Datenermittlung und Programmierung des Simulationsmodells durchgeführt.

Forschungspartner: Verschiedene Institute der

- Technischen Universität Braunschweig
- Georg-August-Universität Göttingen
- Leibniz Universität Hannover
- Carl von Ossietzky Universität Oldenburg
- Westfälische Wilhelms-Universität Münster
- Hochschule für angewandte Wissenschaften und Kunst Göttingen

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Alexander Oberland
alexander.oberland@tu-clausthal.de (Tel:72-2938)

Projektleiter: Prof. Dr. rer. nat. Heinz Wenzl (Tel: 05522/919170)
heinz.wenzl@t-online.de

IEE

Problem: Für den Erfolg der Elektromobilität sind viele unterschiedliche Aktivitäten neben der reinen Entwicklung der Fahrzeuge selbst notwendig. An den Universitäten und Fachhochschulen des Schaufensters „eMobilität Metropolregion Niedersachsen“ wird deshalb ein hochschulübergreifendes modulares Fort- und Weiterbildungsangebot zu den Themenfeldern der Elektromobilität geschaffen. Zielgruppen der Weiterbildungsmodule sind Akademiker wie Ingenieure, Techniker und Manager. Es wird ein abgestimmtes Angebot an Modulen, fünf erlebbare Weiterbildungswerkstätten und ein virtuelles Lernlabor entwickelt, ausgearbeitet und realisiert. Die Weiterbildungsmodule werden als eigenständige berufsbegleitende Fort- und Weiterbildung einsetzbar sein. Sie werden für folgende fünf Themenkomplexe entwickelt: „Elektrofahrzeuge“, „Batterie“, „Leistungselektronik und E-Maschinen“, „Ladeinfrastruktur“ sowie „Mobilität und Geschäftsmodelle“. Die Module sollen die erstellten Weiterbildungswerkstätten und die simulationsbasierte Lernsoftware nutzen. Die Anforderungen für die Weiterbildungsmodule werden gemeinsam mit Industriepartnern und anderen Verbundprojekten der Schaufenster abgestimmt. Die Weiterbildungsmaßnahmen werden im Rahmen des Projektes erprobt. Bei der Entwicklung der Module wird darauf geachtet, dass aktuelle Forschungsergebnisse und neuste Versuchs- und Technikaufbauten in das Weiterbildungsprogramm integriert werden. Das Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme arbeitet im Bereich Batterien innerhalb eines Konsortiums mehrerer niedersächsischer Hochschulen zusammen und konzentriert sich auf die Systemebene, insbesondere dem Verhalten von Zellen beim Laden und Entladen, wenn die Zellen in Reihe oder parallel geschaltet werden.

Ziel: Ziele des Projektes ist die Entwicklung einer Simulationssoftware, die den Spannungsverlauf vieler Zellen in Reihen- und Parallelschaltung darstellen kann. Die Notwendigkeit von Batteriemanagementsystemen und die Sicherheitsrisiken beim Betrieb von Batteriesystemen sollen auf diese Weise klar und eindringlich verdeutlicht werden.

Stand der Technik: Bei dem Projekt handelt es sich um ein Projekt, das den bekannten Stand der Technik als Basis hat und sich auf die didaktisch optimale Vermittlung des Stands der Technik konzentriert. Eine Weiterentwicklung des Stands der Technik findet nicht statt.

Lösungsweg: Die für das Verhalten von Zellen benötigten Modelle sind sowohl Ersatzschaltbildmodelle als auch ein, auf Differentialgleichungen beruhendes physikalisch chemisches Modell. Wegen der Komplexität der Berechnung werden bei der Spannungsberechnung von Zellen in Reihe oder parallel nur vereinfachte Ersatzschaltbilder verwendet.

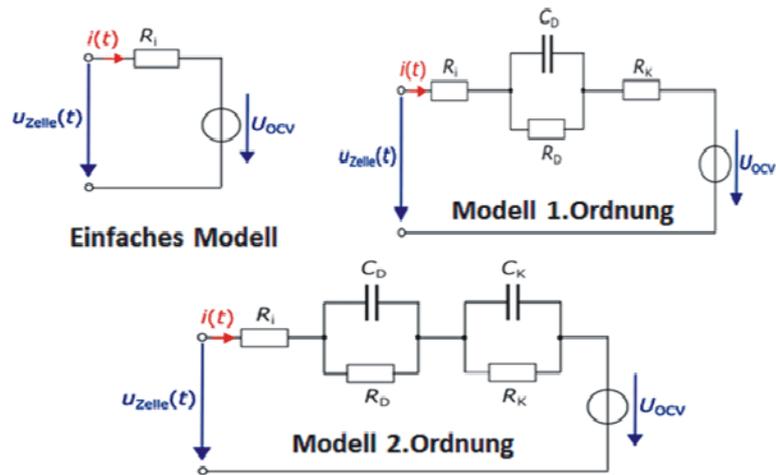


Abbildung 1: Ersatzschaltbild der Zellen

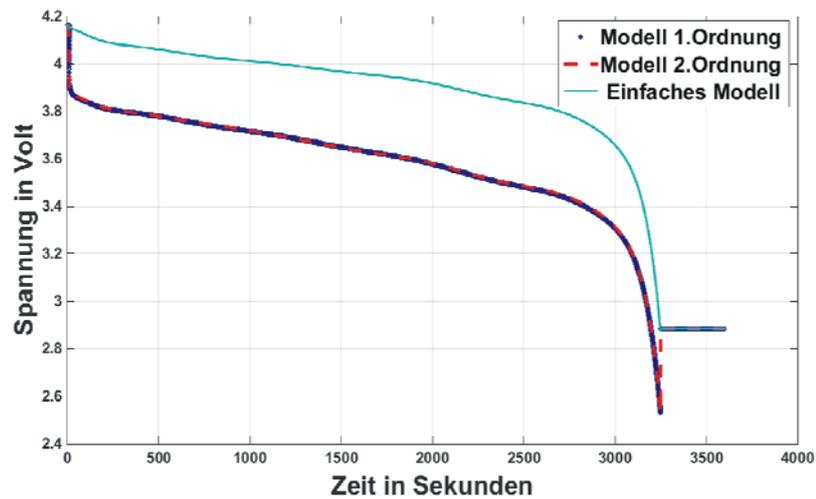


Abbildung 2: Vergleich des Spannungsverlaufs von 3 Ersatzschaltbildern (Abbildung1) einer Li-Zelle bei einem konstanten Strom ($I=0,046$ A)

Projekt: Mobile4E

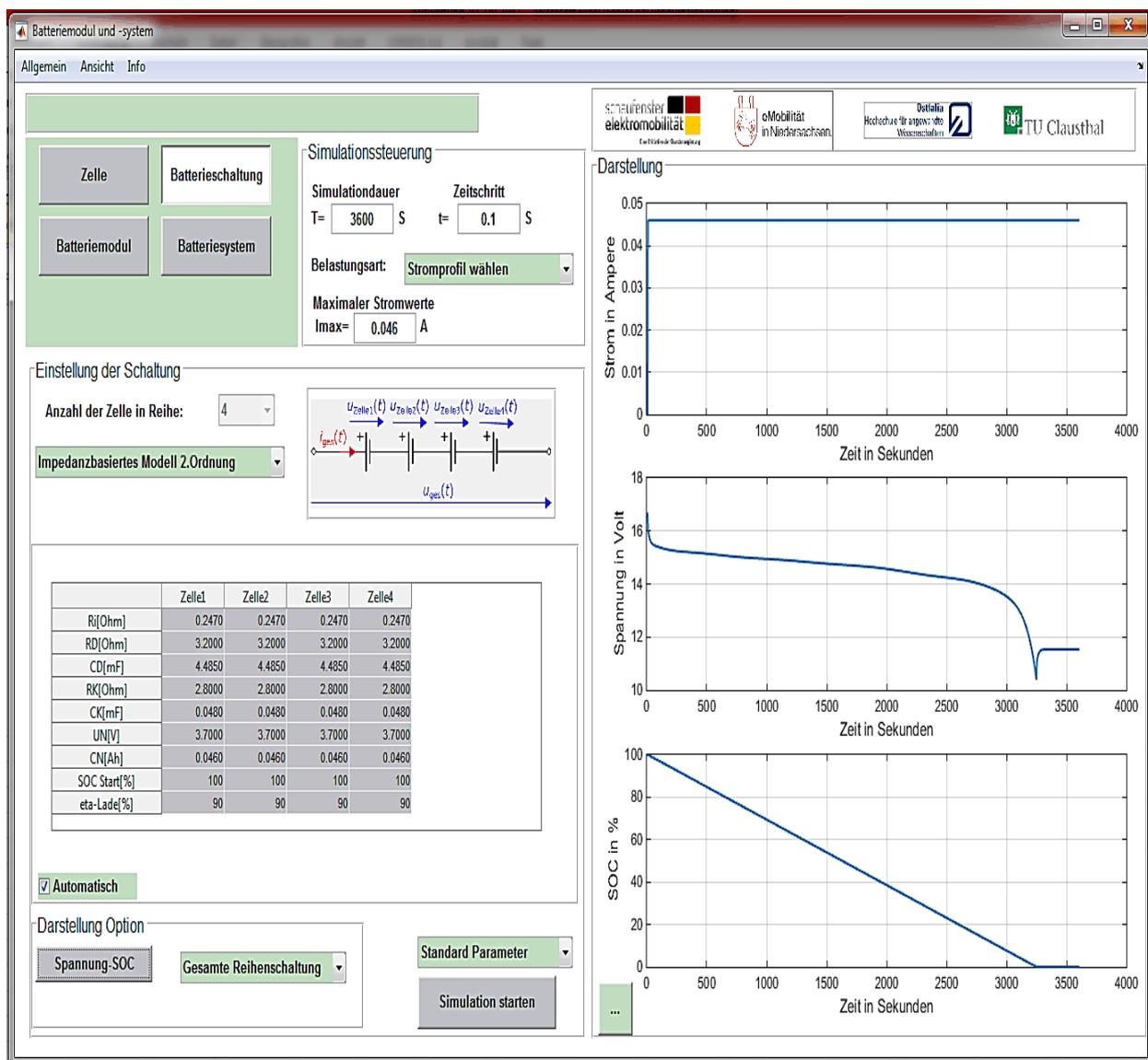


Abbildung 3: Bedienungsfläche

Das Simulationsprogramm basiert auf Matlab-Simulink (Abbildung 4) und verfügt über eine benutzerfreundliche, leicht erlernbare Bedienungsfläche (Abbildung 3), damit die Teilnehmer des Seminars eigene Fragestellungen bei verschiedenen Verschaltungen simulativ untersuchen können.

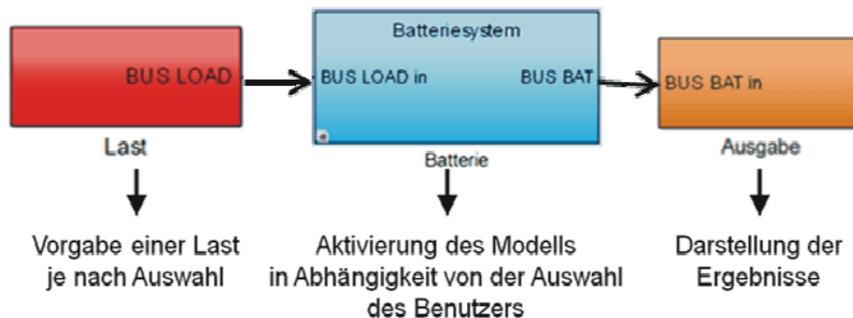


Abbildung 4: Simulationsblock des Modells

Projektstand: Die wesentlichen Arbeiten des Gesamtprojekts sind von allen Partnern bereits weitgehend abgeschlossen. Im Bereich Batterien fanden im November und Dezember zweieinhalb tägige Seminare mit Teilnehmern aus der Automobilindustrie statt. Im ersten Seminar wurde der Bau von Zellen erläutert und praktisch durchgeführt, im zweiten Teil, an dem auch das IEE beteiligt war, wurde die Montage von Zellen zu Gesamtsystemen, die Parametrisierung von Zellen und in einem Simulationsblock das Verhalten von Zellen in Reihen- und Parallelschaltung gezeigt.

Das Feedback der Teilnehmer und die Erfahrungen aus der Seminardurchführung werden jetzt noch bis zum offiziellen Projektende am 30. 6. 2016 eingearbeitet.

Veröffentlichung: Präsentation und Durchführung der Simulationen bei einem Seminar am 02. - 04.12.2015

Förderung: Das Projekt wird gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) unter dem Geschäftszeichen 16SNI017E

Projektlaufzeit: 15.06.2016 - 14.06.2016

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Maria Geng

Dipl.-Ing. Eric Tchoupou Lando (Tel: 72-3819)
eric.tchoupou.lando@tu-clausthal.de

Projektleiter: Prof. Dr. rer. nat. Heinz Wenzl (Tel: 05522/919170)
heinz.wenzl@t-online.de

Projekt: Lebensdauerprognosemodelle von Brennstoffzellen in realen Anwendungen

Problem: Brennstoffzellen stehen schon seit mindestens 1970 kurz vor dem Durchbruch. Damit es aber endlich so weit kommt und dieser Termin nicht noch weitere Jahrzehnte vor sich hergeschoben wird, müssen Brennstoffzellen auch wirtschaftlich werden. Zu diesem Zweck ist eine Lebensdauerprognose für Brennstoffzellen in realen Anwendungen für die Markteinführung fast unerlässlich. Aus diesem Grunde gibt es das BMWi Projekt Entwicklung von Lebensdauerprognosemodellen von Brennstoffzellen in realen Anwendungen. In welchem Modelle entwickelt werden, die dazu beitragen sollen, die Lebensdauern von Brennstoffzellen möglichst genau abzuschätzen, wodurch der wirtschaftliche Einsatz vorab bestimmt werden kann.

Ziel: Ziel des Projektes ist die Entwicklung von Lebensdauerprognosemodellen für Brennstoffzellen in realen Anwendungen. Diese sollen möglichst genau die Lebensdauer von Brennstoffzellen voraussagen und außerdem zu der Weiterentwicklung von Brennstoffzellen beitragen. Das geschieht, indem in den Modellen Lastverläufe vorgegeben werden, zu denen dann eine Lebensdauer einer Brennstoffzelle ausgegeben wird. Bedingung ist, dass zu der Brennstoffzelle schon ein paar Daten vorhanden sind, aus denen die Parameter der Brennstoffzelle ermittelt werden können, wodurch wiederum die Prognose realisiert werden kann. Auch soll es möglich sein, die Parameter der Brennstoffzelle zu verändern, sodass durch gezielte Modifikationen einzelner Parameter, was zum Beispiel eine Verringerung des Durchtrittswiderstandes sein kann, weil die Elektrodenoberflächen verändert wurden, die Auswirkungen auf die Lebensdauer der Brennstoffzelle in der jeweiligen Anwendung untersucht werden können.

Stand der Technik: Es gibt viele verschiedene Simulationen von Brennstoffzellen, wovon einige auf Methoden der finiten Elemente beruhen und andere auf physikalisch-chemischen Modellen, die in Form von elektrischen Ersatzschaltbildern realisiert worden sind. Dabei gibt es den großen Nachteil, dass die Simulationszeiten der finiten Elemente Methode für ganze Lebensdauern sehr langwierig sind. Gleiches gilt für ausführliche Ersatzschaltbildern, bei welchen man schnell zu Simulationszeiten gelangt, die länger als die realen Laufzeiten sind. Auch ist es schwierig alle dort benutzten Parameter mit einer zeitlichen Alterung zu versehen, weshalb sich die hier entwickelten Modelle auf wenige Parameter beschränken, deren zeitlicher Verlauf aus schon vorhandenen kurzen Messdaten ermittelt und dann prognostiziert werden.

Lösungsweg: Es werden zwei verschiedene Ansätze als Prognosemodelle verfolgt. Dabei wird eines vom Institut für Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit und eines vom Institut für Elektrische Energietechnik entworfen. Der neuartige Ansatz vom IMAB ist, dass bei diesem Modell die Methoden der Betriebsfestigkeit zum Einsatz kommen. Dabei werden die Zahlverfahren der Betriebsfestigkeit verwendet, um die Führungsgröße, hier die Spannung, in Klassen einzuteilen und diesen eine Schädigung zuzuordnen, welche von den Projektpartnern

ermittelt wurde. Der andere Ansatz beruht auf einem physikalisch-chemischen Modell, welches in Form der Larminiefunktion von James Larminie, die unter Experten allgemein anerkannt ist, entwickelt wird. Dabei wird die Zeitabhängigkeit der einzelnen Parameter aus vorhandenen Daten ermittelt und diese entsprechend prognostiziert. Anschließend können die beiden Lebensdauern aus den unterschiedlichen Modellen verglichen werden mit der Hoffnung, dass beide unabhängigen Ansätze zum gleichen Ergebnis führen werden, was eine gegenseitige Stützung der Ansätze wäre.

Projektergebnisse: Das Projekt endete am 30.04.2014 und unterteilt sich in drei größere Tätigkeitsbereiche. Zum einen gibt es das ereignisbasierte Modell vom IMAB, welches auf der Grundlage der Betriebsfestigkeit erstellt wurde. Mehr zu diesem Projektteil ist im Jahresbericht des IMAB zu finden. Der zweite Bereich ist das physikalisch-chemische Modell, welches auf der Grundlage von Larminie und Dicks auf gebaut wurde. Die Grundidee dieses Modells ist es, die eingelesenen Daten in einzelne Polarisationskurven (U-I-Kennlinien) einzuteilen. Eine solche Einteilung kann in Abbildung 1 gesehen werden.



Abbildung 1: Einteilung der Daten in einzelne Polarisationskennlinien (farbig dargestellt)

Projekt: Lebensdauerprognosemodelle von Brennstoffzellen in realen Anwendungen

In einem nächsten Schritt werden die einzelnen Polarisationskurven mit der Larminiefunktion alle einzeln über eine Regressionsanalyse angefitet (Abbildung 2) und aus diesen Ergebnissen ein Zeitverlauf für die nun zeitabhängige Larminiefunktion gewonnen.

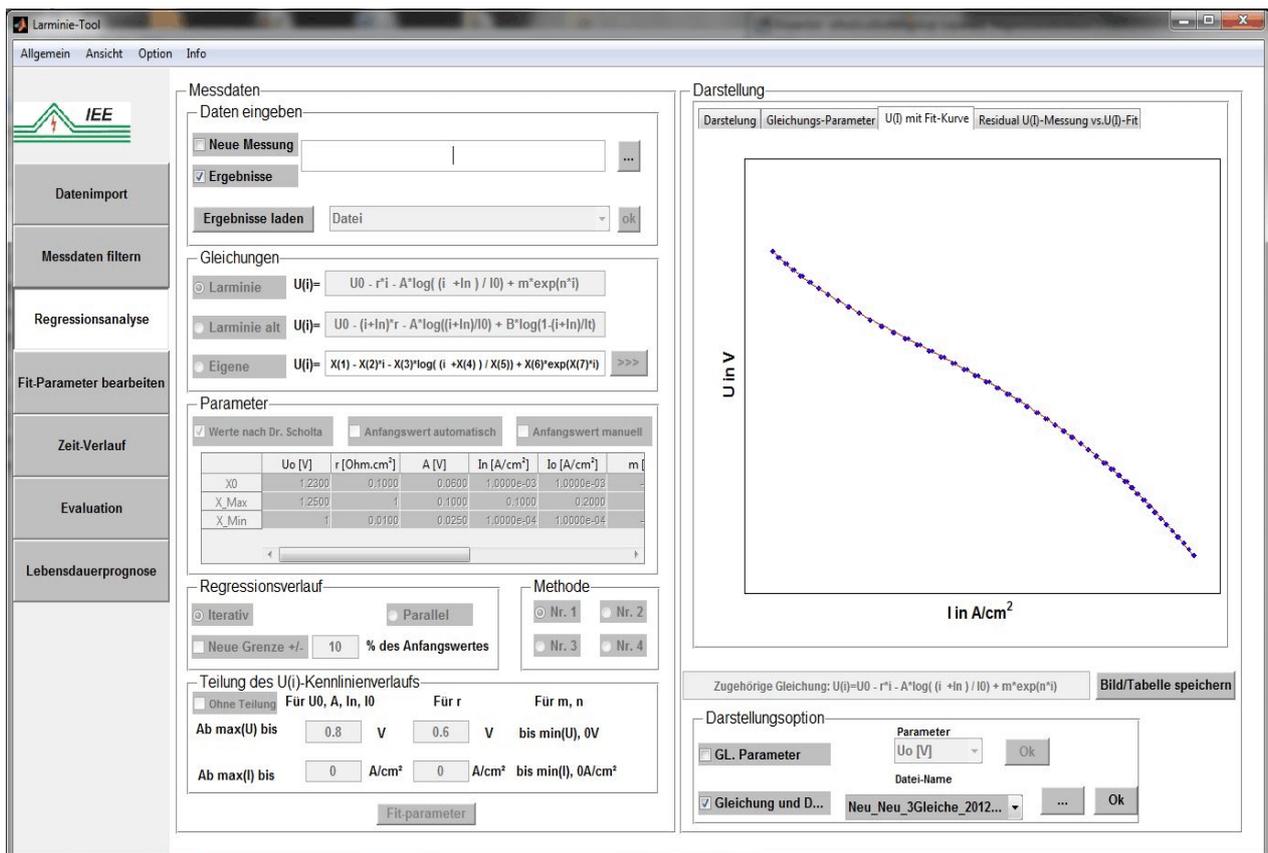


Abbildung 2: Fit einer einzelnen Polarisationskennung

Mit der zeitabhängigen Larminiefunktion können nun die Messdaten angefitet (Abbildung 3) und extrapoliert werden, um auf diesem Wege eine Lebensdauerprognose zu erhalten.

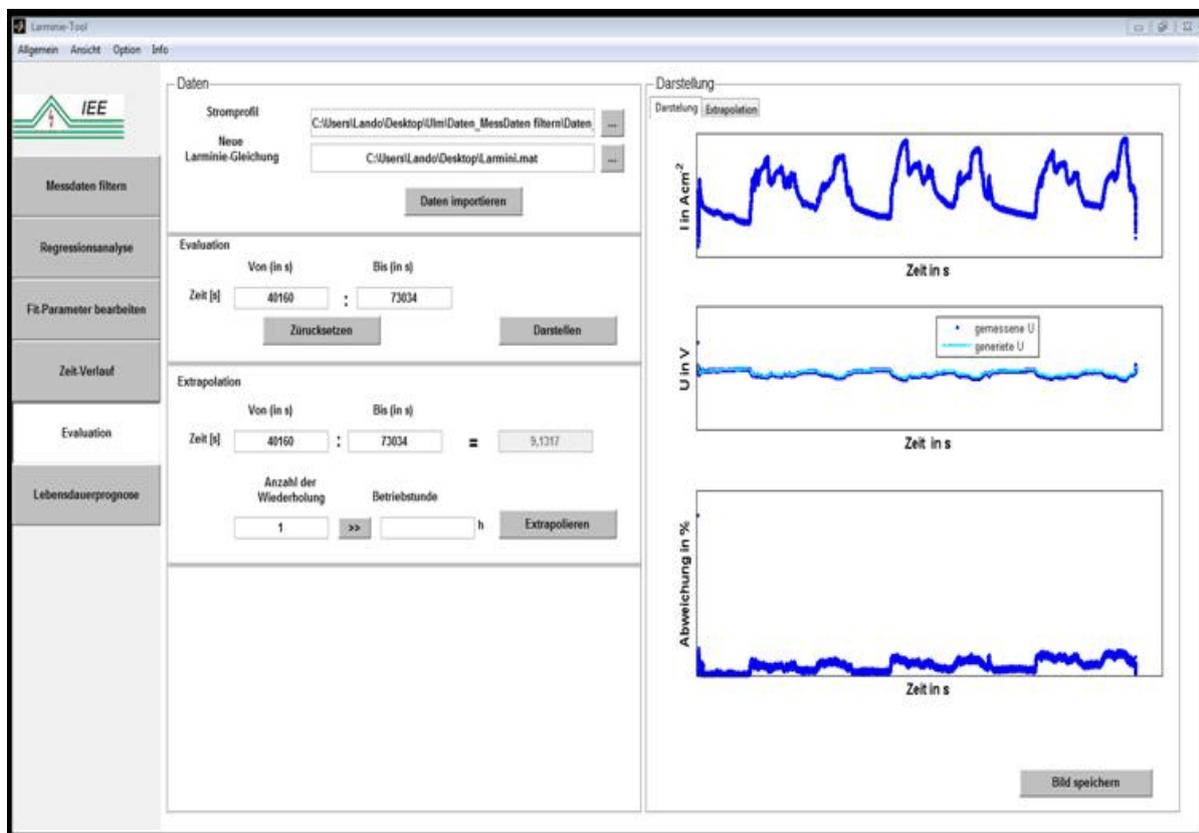


Abbildung 3: Fit realer Messdaten im Zeitverlauf

Das Lebensdauerende kann dabei selbst definiert werden, wobei sich zeigte, dass eine Spannung unter 0,5 V als ein mögliches Ende angenommen werden kann.

Der letzte Tätigkeitsbereich stellt die Untersuchung der Strominhomogenitäten in den Brennstoffzellen dar. Dazu wurde eine Brennstoffzelle mit variabler Medienführung aufgebaut, durch welche eine von Zelle zu Zelle abwechselnde Gasversorgung realisiert werden konnte. Als Ergebnis ist deutlich zu sehen, dass eine Reduktion der Strominhomogenitäten stattfindet, wenn die Betriebsart von der gleichseitigen Gasversorgung (Abbildung 4) zur abwechselnden Gasversorgung (Abbildung 5) verändert wird. Hier vor allem daran zu erkennen, dass beide Seiten höhere Ströme führen und somit die Unterschiede zu den Maxima geringer werden.

Projekt: Lebensdauerprognosemodelle von Brennstoffzellen in realen Anwendungen

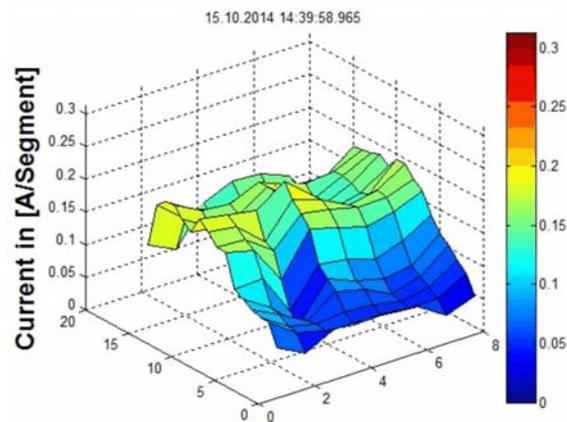


Abbildung 4: Strominhomogenitäten bei gleichseitiger Gasversorgung

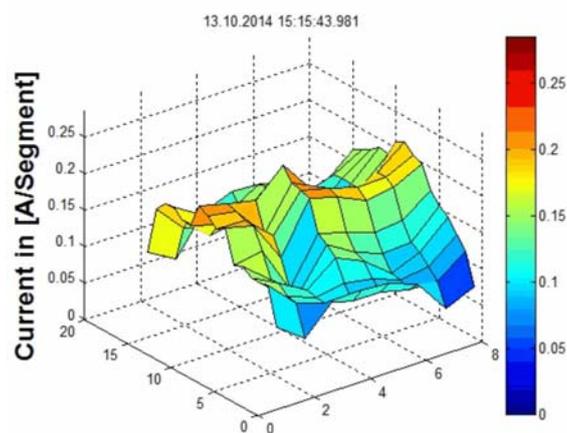


Abbildung 5: Strominhomogenitäten bei wechselseitiger Gasversorgung

Nähere Informationen zu den Ergebnissen, deren Interpretationen und weitere Untersuchungen können der Dissertation „Lebensdauerprognose von elektrochemischen Systemen unter besonderer Berücksichtigung von Brennstoffzellen“, ISBN 9783736990913, entnommen werden.

Projektpartner: Partner in dem Projekt sind neben dem EFZN mit den ausführenden Stellen Institut für Elektrische Energietechnik (IEE) und dem Institut für maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit (IMAB) das Zentrum für Brennstoffzellen Technik GmbH in Duisburg (ZBT), das Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoffforschung in Ulm (ZSW), das Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme in Freiburg (ISE) und das Helmholtz Zentrum in Berlin (HZB).



Bearbeiter: Dr.-Ing. Raoul Heyne (Tel: 72-2272)
raoul.heyne@tu-clausthal.de

Dipl.-Ing. Eric Tchoupou Lando (Tel: 72-3819)
etl@tu-clausthal.de

Projektleiter: Prof. Dr. rer. nat. Heinz Wenzl (Tel: 05522/919170)
heinz.wenzl@t-online.de

Projekt: Schnellladung von Elektrofahrzeugen

Problem: Vergisst man einmal sein Elektroauto nachts nachzuladen, um morgens damit zur Arbeit oder zu einem Termin zu kommen, steht man bei vielen Elektrofahrzeugen vor einem Problem. Die Ladezeiten betragen über eine herkömmliche Schuko-Steckdose zwischen 4 und 9 Stunden. Auch Fahrzeuge mit einer Schnellladeoption können zu Problemen führen, da dort eine Schnellladung angeboten wird, die die Batterie von 20% auf 80% in ca. 45 Minuten nachlädt, was jedoch nur 60% der Reichweite ausmacht. Bei gängigen Fahrzeugen bedeutet eine solche Nachladung eine zusätzliche Reichweite von 48 bis 80 Kilometern. Was aber wenn der Termin 100 km entfernt ist und keine 45 Minuten an Zeit zur Verfügung stehen?

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



Ziel: Ziel des Projekts sind die Entwicklung und Realisierung von Ladealgorithmen, die eine Ladung der Batterie von 0% auf 100% in weniger als 30 Minuten ermöglichen und dabei keine Schädigung auf die Batterie ausüben. Der Hauptalterungsmechanismus bei der Schnellladung ist die Temperatur, welche durch faseroptische Sensoren überwacht wird. Diese Sensoren werden in die Fahrzeugbatterien implementiert, wodurch ganze Temperaturfelder der Batterien der Elektrofahrzeuge erstellt werden können. Auch wird ein Businesscase für Tankstellenbetreiber entwickelt, bei dem sich herausstellen soll, welche Möglichkeiten heutige Tankstellenbetreiber im Zeitalter der Elektromobilität haben.

Stand der Technik: Wie oben erwähnt, sind heutige Schnellladungen keine vollständigen Ladungen und das „Schnell“ ist somit relativ, da eine echte Ladung von 0% auf 100% bei gleichbleibender Ladegeschwindigkeit heutzutage noch etwa 75 Minuten dauern würde, was nicht wirklich schnell ist. Ein großes Problem stellt auch die Möglichkeit einer Schnellladung zu Hause dar, welche durch kleine Hausanschlussleistungen nicht einfach realisiert werden können. Aus diesem Grunde wird es für heutige Tankstellen weiterhin eine Daseinsberechtigung geben, denn diese haben meistens einen größeren Stromanschluss, sodass ein Nachtanken in unter 30 Minuten, was je nach Fahrzeug zwischen 15 und 100 kW benötigt, dort durchgeführt werden kann, sofern es Ladealgorithmen dazu gibt.

Lösungsweg: Erst werden verschiedene Ladeverfahren an Einzelzellen auf dem Prüfstand getestet und versucht, damit eine Schnellladung in unter 30 Minuten zu erreichen. Diese Verfahren werden dann auf mehrere Zellen und ganze Batterien übertragen, bevor Sie in Ladesäulen implementiert und an ganzen Fahrzeugen getestet werden. Um die Schnellladung kontrollieren zu können und die Auswirkungen auf die Batterien zu erfassen, wird die Temperatur überwacht. Zu diesem Zweck werden faseroptische Sensoren in die Zellen eingebracht, um die Temperatur an jeder Zelle messen zu können, ohne den Aufbau der Batterien verändern zu müssen. Eine solche Applikation der Fasern in die Batterie kann in Abbildung 1 und Abbildung 2 gesehen

werden.



Abbildung 1: Teil einer Fahrzeugbatterie mit faseroptischer Sensorik (grün)



Abbildung 2: Komplette Fahrzeugbatterie mit Temperatursensoren und weiterer Messtechnik

Projektergebnisse: Bei der Entwicklung der Ladeverfahren wurde mit der Untersuchung an Einzelzellen begonnen und diese dann über kleinere Module z.B. von Elektrorollern zu der ganzen Fahrzeugbatterie hin ausgedehnt.

Ladeverfahren		Ladedauer in h		maximale Temperatur in K	Temperaturdifferenz ΔT
		80%	100%		
IU-Ladung	2C	0,40	0,68	310,35	17,2
	3C	0,27	0,38	318,25	25,1
	4C	0,20	0,31	324,55	31,4
	5 C (15,2 V)	0,16	0,31	318,35	25,2
Stufenladung	3C mit 3 Stufen	0,28	0,74	309,35	16,2
	4C mit 3 Stufen	0,32	0,86	311,25	18,1
Pulsladung	2C 850 ms	0,40	0,67	311,15	18
	3C 850 ms	0,27	0,44	318,95	25,8
	4C 500 ms	0,20	0,40	319,15	26
	4C 850 ms	0,20	0,32	322,95	29,8

Abbildung 3: Ergebnisse verschiedener Schnellladung an einer Einzelzelle

Projekt: Schnellladung von Elektrofahrzeugen

In Abbildung 3 sind die Ladezeiten von unterschiedlichen Ladeverfahren für einen 40Ah Rollerstack zu sehen. Deutlich wird, dass die meisten Zeiten eine Ladung innerhalb von 30 Minuten deutlich unterschreiten. Die an den Stacks getesteten Ladeverfahren wurden schließlich auf die Fahrzeugbatterien der Elektrofahrzeuge angewendet. Das beste Ergebnis von der Fahrzeugbatterie ist in Abbildung 4 zu sehen.

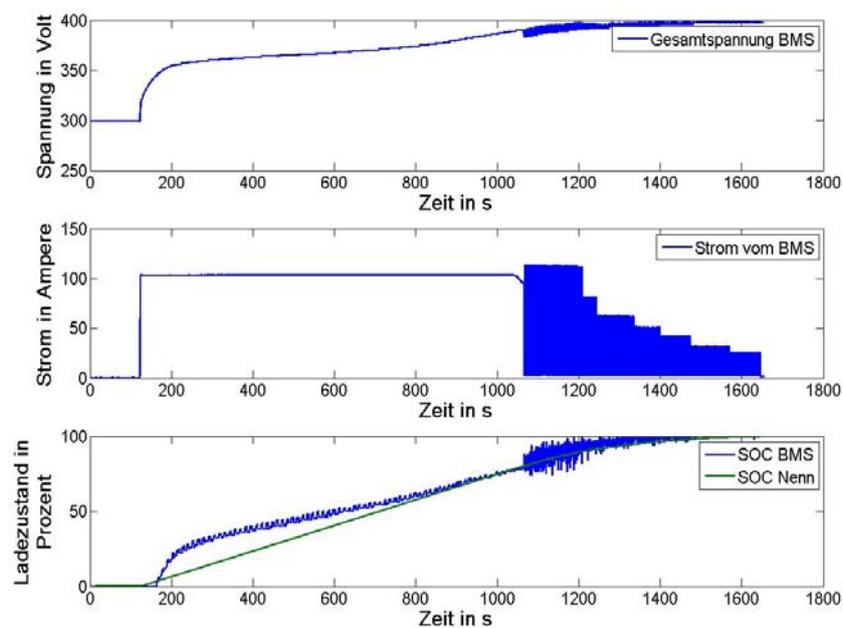


Abbildung 4: Schnellladung der Fahrzeugbatterie in ca. 27 Minuten bis 40 Ah erreicht sind

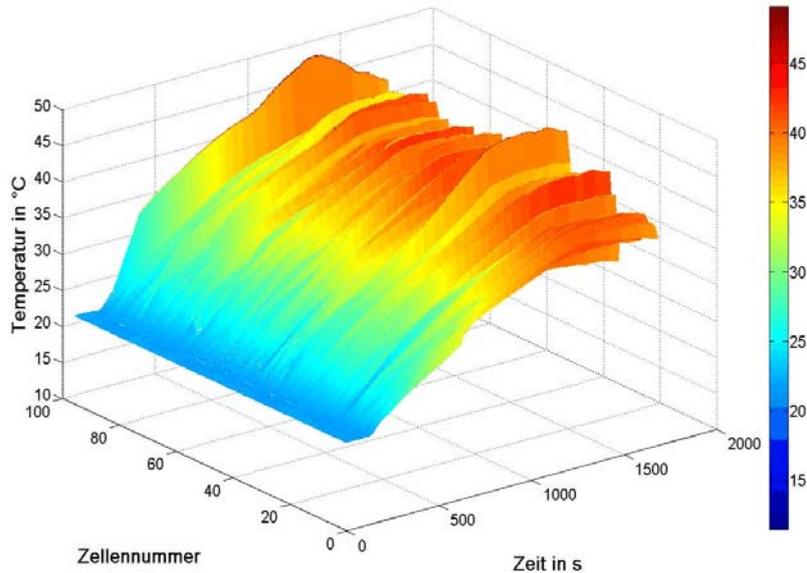


Abbildung 5: Temperaturverlauf der einzelnen Zellen bei der Schnellladung

In Abbildung 4 ist zu sehen, dass das Projektziel einer 100%-igen Ladung in unter 30 Minuten durch eine Ladung mit maximal 2,5C (hier 100A) Ladestrom und einer quasi gepulsten Stufenladung innerhalb von ca. 27 Minuten erreicht wurde. Eine quasi gepulste Stufenladung liegt vor, weil zu den Pulsen der Strom durch das Managementsystem stufenförmig reduziert wurde. Der Temperaturverlauf zu dieser Messung kann in Abbildung fünf gesehen werden. Deutlich zu sehen ist, dass zwei Zellen die Temperatur von 40°C übersteigen. Dies kann zum einen an der Position der Zellen im Stack liegen, was eher unwahrscheinlicher erscheint und zum anderen daran, dass die Sensoren nicht gut geeicht waren, zumal die Zellausdehnung ebenfalls Einfluss auf die Temperaturen nahm, was in folgenden Projekten durch noch bessere Applikation verhindert wird.

Weiter wurden im Projekt vier Ladesäulen entwickelt, welche extern aufgestellt und in Betrieb genommen wurden. Dadurch wird ein Beitrag der Anbindung des Harzes an die Metropolregion geleistet.



Abbildung 6: Pressetermin zum Rollout der Elektrofahrzeuge am 02.05.2013



Abbildung 7: Pressetermin zur Aufstellung der Ladesäule auf der Araltankstelle von Jochen Schreiber am 29.10.2014

Wie in Bild 7 zu sehen, können die Ladesäulen, welche bis Leistungen von 60kW kaskadierbar sind, beide gängigen Protokolle ChaDeMo und CCS umsetzen und sind außerdem frei programmierbar, wodurch die Vollladungen in 30 Minuten erreicht werden können. Dabei wurde auch das Tankstellenpersonal geschult, sodass diese Elektrofahrzeugbesitzer bei einer Schnellladung unterstützen können. Viel Zuspruch gab es in Elektroforen, weil Besitzern von Elektrofahr-

zeugen mit ChaDeMo Ladeprotokoll im Gegensatz zum Schaufenster Elektromobilität, wo hauptsächlich das CCS Ladeprotokoll gefördert wird, auch eine Möglichkeit der Schnellladung geschaffen wurde.

Projektpartner: Partner in dem Projekt sind mehrere Firmen neben den Antragstellern Fraunhofer Heinrich Hertz Institut in Goslar und dem Energieforschungszentrum Niedersachsen mit dem Institut für elektrische Energietechnik und Energiesysteme als ausführende Stelle des Energieforschungszentrums Niedersachsens. Das ist die Wolfsburg AG, die das Projekt unterstützt und den Aufbau einer Ladesäule in Wolfsburg steuert. Weiter beteiligt sich Jochen Schreiber, der Besitzer von zwei Araltankstellen, bei dem eine Ladesäule in Schöppenstedt installiert ist. Außerdem ist die Firma Power Innovation Partner, die die Ladesäulen herstellt bzw. so umrüstet, dass beliebige Ladeverfahren programmiert werden können. Die WVI GmbH (Prof. Dr. Wermuth Verkehrsforschung und Infrastrukturplanung), die sich mit den Auswirkungen der Schnellladung auf das Nutzerverhalten von Elektroautobesitzern beschäftigt gehört ebenfalls dazu. Schließlich partizipiert die Firma E-Wolf GmbH, welche die Elektrofahrzeuge einbringt und für das Projekt umbaut und einen Zugang zu der Software der Fahrzeuge ermöglicht.



Jochen Schreiber



Bearbeiter:

Dr.-Ing. Raoul Heyne
raoul.heyne@tu-clausthal.de

(Tel: 72-2272)

Projektleiter:

Prof. Dr. rer. nat. Heinz Wenzl
heinz.wenzl@t-online.de

(Tel: 05522/919170)

Projekt: Entwicklung von Materialien und Komponenten für Zink-Luft Sekundärelemente (AKUZIL)

Problem: Zink-Luft-Zellen haben deutliche Vorteile gegenüber anderen Zell-Systemen. Sie sind preiswert, intrinsisch sicher und haben eine hohe spezifische Energie. Wiederaufladbare Zink-Luft-Zellen haben eine höhere theoretische Energiedichte als Lithium-Ionen-Batterien und damit das Potential, die Reichweite von Elektrostraßenfahrzeugen signifikant zu erhöhen. Auch für stationäre Anwendungen stellt das Zink-Luft-System eine attraktive Möglichkeit der chemischen Speicherung für elektrische Energie dar. Außerdem sind die einzusetzenden Materialien sehr preiswert. Im Vergleich zu den verwendeten Elektrolyten und Materialien der meisten anderen Batteriesysteme sind die für Zink-Luft-Systeme in Frage kommenden Elektrolyte nicht brennbar. Daher handelt es sich um ein äußerst sicheres System. So können zum Beispiel primäre Zink-Luft-Batterien in Hörgeräten eingesetzt werden. Dazu werden bis heute ausschließlich wässrige Elektrolyte eingesetzt. Zudem sind die in Zink-Luft-Batterien verwendeten Materialien sehr umweltverträglich und lassen sich einfach recyceln. Jedoch sind die Einsatzbereiche beschränkt, da die Leistung bezogen auf den Energiegehalt gering ist (großer Spannungseinbruch auch bei kurzen, hohen Leistungsanforderungen, Eignung nur für lange Überbrückungszeiten) und es große Probleme bei der Wiederaufladung gibt. Deshalb sind zurzeit im Markt keine wiederaufladbaren Zink-Luft-Sekundärelemente vertreten. Die bei der Wiederaufladung auftretenden technischen Schwierigkeiten sollen im Rahmen des geplanten Projektes bearbeitet werden.

Ziel: Ziel dieses Projektes ist die Entwicklung von Materialien und Komponenten für die Herstellung von Zink-Luft-Sekundärelementen unter Berücksichtigung von Systemrestriktionen und Systemoptionen, die in automobilen Anwendungen (Elektromobilität) und im Bereich der Netzstützung, u.a. durch Fahrzeugbatterien, in der Energieversorgung (stationäre Systeme) zu erwarten sind.

Die wesentlichen Herausforderungen bei der Entwicklung wiederaufladbarer Systeme sind:

- Eigenschaften und Beständigkeit der Katalysatoren und Katalysatorträger der Gasdiffusionselektrode, die sowohl Sauerstoff reduzieren als auch oxidieren können,
- Vermeidung der Zink-Dendritenbildung beim Ladeprozess,
- Wiederherstellung einer günstigen Mikrostruktur der Zinkelektrode bei der Wiederaufladung,
- Vergiftung des Elektrolyten mit CO₂ bei alkalischen Elektrolyten.

Sowohl die kalendarische Lebensdauer als auch die Zyklenlebensdauer ist bisher sehr begrenzt. Ansätze zur Überwindung dieser Problemstellungen sind die Entwicklung von alternativen Elektrolyten und neuen Additiven, die Entwicklung von verbesserten Katalysatoren und Trägermaterialien, die gezielte Gestaltung der Elektrodenstruktur sowie konstruktive Überlegungen auf der Zell- und Gesamtsystemebene. Das Anforderungsprofil für wiederaufladbare Systeme dieses Projektes richtet sich an der Elektromobilität aus.

Stand der Technik: Wiederaufladbare Zink-Luft-Batterien werden bereits von kleinen Entwicklungsunternehmen (ReVolt, Deutschland; Zincpower, USA; Electric Fuel, Israel/USA) angeboten. Technische Details, z.B. durch Veröffentlichungen sind jedoch nicht bekannt. Bisher gibt es noch keine technisch brauchbaren wiederaufladbaren Zink-Luft-Batterien, die den Anforderungen z.B. hinsichtlich Zyklenlebensdauer gerecht werden.

Der Stand der Technik zu wässrigen Elektrolyten ist relativ hoch. Daher werden Lösungsansätze vor allem auf geeignete Katalysatoren aufbauen. Bei nichtwässrigen Elektrolyten gibt es eine Vielfalt von Hinweisen auf große technische und wirtschaftliche Potentiale jedoch sind die Materialien, die allen Anforderungen in Interaktion mit den anderen Komponenten erfüllen können, noch nicht bekannt bzw. noch nicht in Wechselwirkung untereinander untersucht worden.

Lösungsweg: Das IEE übernimmt Simulationsaufgaben. Anhand eines Modells sollen das elektrische Verhalten und insbesondere die Stromhomogenität von Zellen und in Elektroden untersucht werden können. Weiterhin wird ein Modell zur Modellierung der Zelleigenschaften mittels eines thermisch- und elektrisch gekoppelten, orts aufgelösten Modells durchgeführt. Anhand dieses Modells soll das Verhalten der Zelle über einen weiten Ladezustandsbereich sowohl in Entlade- als auch in Laderrichtung untersucht werden können.

Projektstand: Das Projekt wurde am 30.04.2015 abgeschlossen. Im Laufe des Projektzeitraums sind zwei Simulationsmodelle entstanden. Es ist ein Modell zur Simulation der Ladung und Entladung unter idealen Bedingungen sowie unter Berücksichtigung einzelner Alterungsprozesse entwickelt wurden. In Abbildung 1 ist ein modellierter Zyklenverlauf einer idealen Zink-Luft-Zelle ohne Alterungseinflüsse abgebildet.

Projekt: Entwicklung von Materialien und Komponenten für Zink-Luft
Sekundärelemente (AKUZIL)

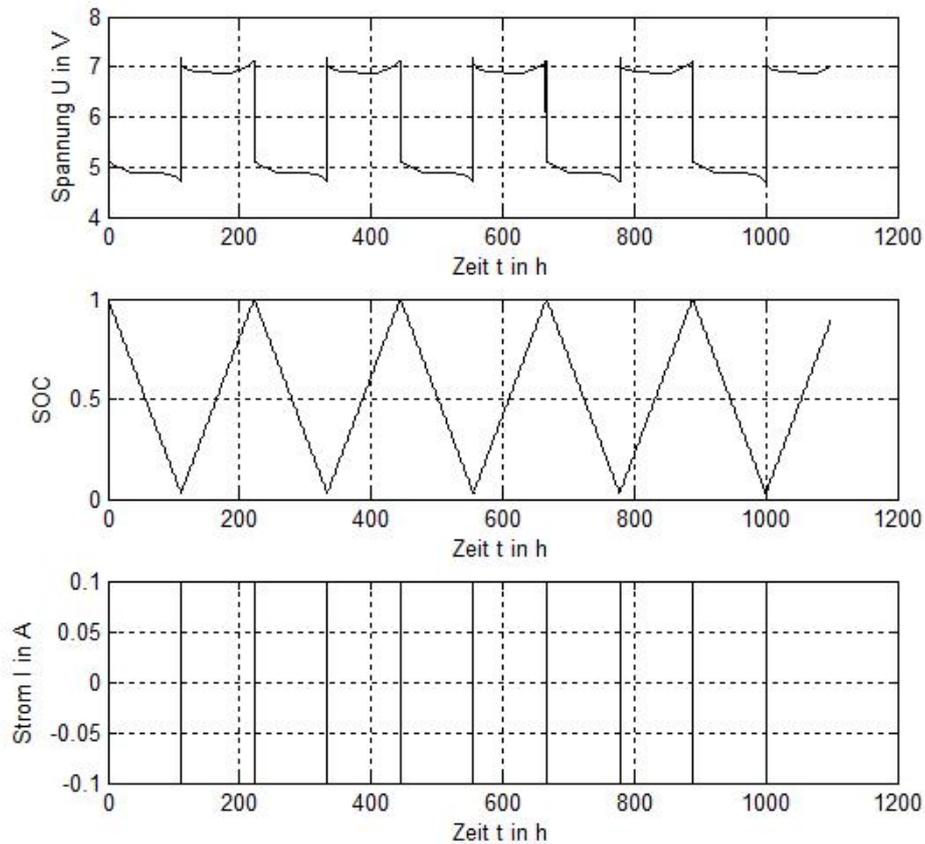


Abbildung 1: Spannungsverlauf, Ladungszustand (SOC) und Stromverlauf mehrerer Zyklen einer idealen Zink-Luft-Zelle ohne Alterungseinflüsse

Mithilfe der Modellierung der einzelnen Alterungseinflüsse kann abgeschätzt werden in welcher Form die Kapazität der Zelle abnimmt. In Abbildung 2 sind z.B. mehrere Zyklen unter Berücksichtigung der Aktivmassenschlammablagerungen am Zellenboden dargestellt. Aufgrund der irreversiblen Ablagerungen wird die Kapazität kontinuierlich geringer.

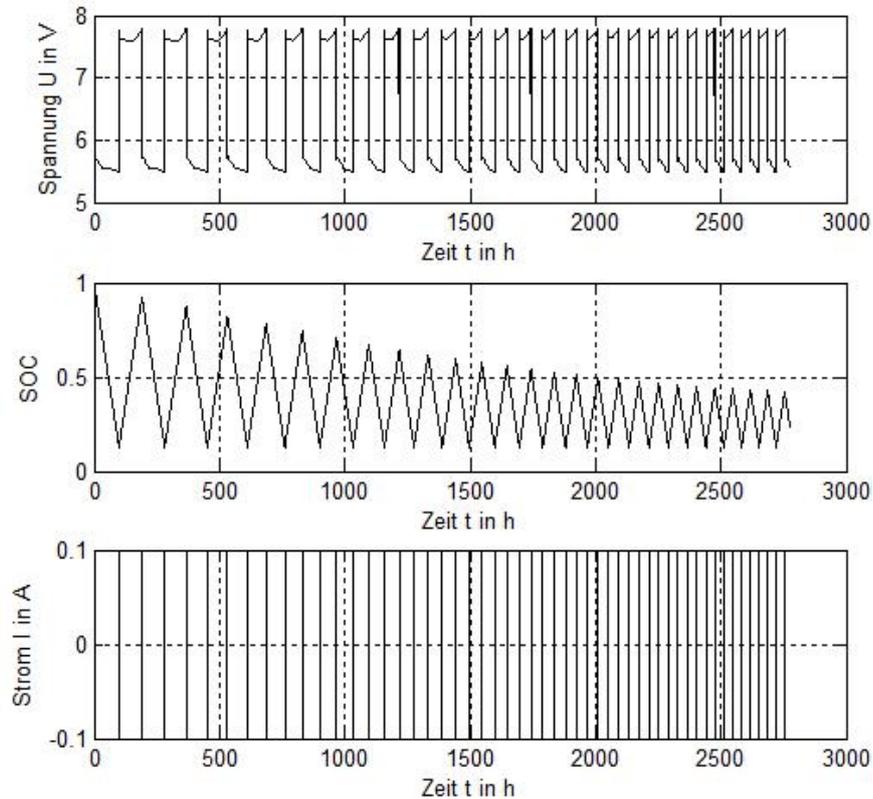


Abbildung 2: Spannungsverlauf, Ladungszustand (SOC) und Stromverlauf der modellierten Zyklen mit Berücksichtigung der Aktivmassenschlammablagerung am Boden der Zelle

Zusätzlich zu diesem Modell wurde im Rahmen des Projektes ein zweites Simulationsmodell zur Beschreibung der Entladung von Zink-Luft-Primärbatterien verwirklicht. Dieses ortsaufgelöste, ersatzschaltbildbasierte Modell dient zur Untersuchung der Stromstärkenverteilung in der Zinkelektrode während der Entladung. Die Stromverteilung wird für drei Bereiche in der Zinkelektrode untersucht, innen am Elektrolyt, in der Mitte der Zinkelektrode und außen am Stromkollektor. In Abbildung 3 sind die Simulationsergebnisse dargestellt.

Projekt: Entwicklung von Materialien und Komponenten für Zink-Luft
Sekundärelemente (AKUZIL)

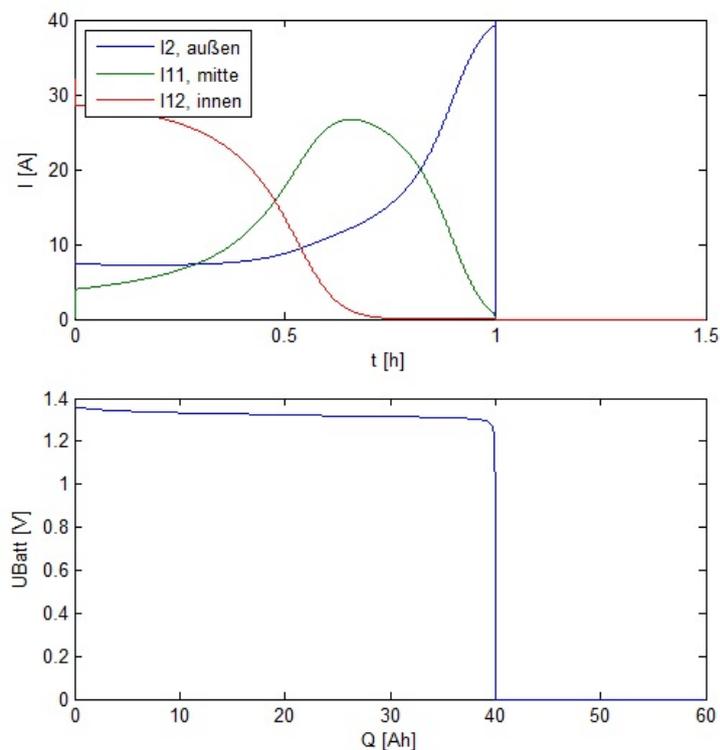


Abbildung 3: Stromverlauf während der Entladung in der Zinkelektrode (innen am Elektrolyt, in der Mitte und außen am Stromkollektor) und der Spannungsverlauf

Aus der Abbildung 3 ist ersichtlich, dass zunächst fast nur innen am Elektrolyt das Aktivmaterial verbraucht wird. Erst wenn das Material innen fast aufgebraucht ist wird aus der Mitte der Elektrode und ganz zum Schluss außen das Material abgebaut. Um eine einfache Wiederaufladung zu ermöglichen wäre ein Verbleib von $\text{Zn}(\text{OH})_4^{2-}$ besser als deren Umwandlung zu ZnO . Diese Umwandlung tritt nur dann auf wenn die Konzentration an $\text{Zn}(\text{OH})_4^{2-}$ zu hoch wird, also immer dann wenn die Reaktion nur lokal in einem Bereich stattfindet wie es hier der Fall ist. Ein Ansatz ist die Elektrode so großflächig und dünn wie möglich zu gestalten. Ein weiterer Lösungsansatz ist mit einem fließenden Elektrolyt zu arbeiten. So werden die erzeugten $\text{Zn}(\text{OH})_4^{2-}$ Moleküle abtransportiert und frischer Elektrolyt fließt nach. Dadurch entstehen keine straken lokalen Konzentrationsansammlungen von Reaktionsprodukten. Außerdem kann das sich aktuell in der Zelle befindende Elektrolytvolumen viel kleiner ausfallen wodurch der Innenwiderstand der Zelle reduziert wird.

Des Weiteren wurde untersucht ob die Sauerstoffelektrode durch Selbstatmung in der Lage ist die Zelle ausreichend mit Sauerstoff zu versorgen oder ob Pumpensysteme erforderlich sind. Für diese Untersuchung wurden Berechnungen mit Hilfe des Fick'schen Gesetzes durchgeführt. Das Ergebnis ist, dass sich in einer 40 Ah Zelle nach einer einstündigen Entladung ein Restsauerstoffanteil von 11,5 % befindet. Dies gilt für eine Sauerstoffelektrode mit einer Porosität von

50 % und einer Dicke von 0,1 mm. Bei dickeren Elektroden oder Elektroden mit geringerer Porosität könnte die Diffusion allerdings nicht mehr ausreichen. Für die Sauerstoffelektrode ist eine sehr dünne Elektrode mit sehr hoher Porosität geeignet. Nur bei einer Elektrode mit diesen Eigenschaften ist die Tauglichkeit zur selbstatmenden Zelle gegeben.

Projektpartner: Partner in dem Projekt sind neben dem Energieforschungszentrum Niedersachsen (EFZN) mit den ausführenden Stellen Institut für Mechanische Verfahrenstechnik (MVT), Institut für Chemische Verfahrenstechnik (ICVT), Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme (IEE), die TU Braunschweig mit dem Institut für Partikeltechnik (iPAT), die Carl von Ossietzky Universität Oldenburg mit dem Institut für Reine und Angewandte Chemie (IRAC), dem Fraunhofer Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM) und die Industrieunternehmen Grillo-Werke AG, W.C. Heraeus GmbH, Solvay Fluor GmbH und Volkswagen AG.



Projektlaufzeit: 01.04.2012 - 30.04.2015

Förderung: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Maria Geng

Dipl.-Ing. Alexander Oberland (Tel.:72-2938)
alexander.oberland@tu-clausthal.de

Projektleiter: Prof. Dr. rer. nat. Heinz Wenzl (Tel.: 05522/91 91 70)
heinz.wenzl@t-online.de

Projekt: ESPEN

Projekt: Verbundprojekt: Potentiale Elektrochemischer Speicher in elektrischen Netzen in Konkurrenz zu anderen Technologien und Systemlösungen (ESPEN)

Teilvorhaben: Verringerung des Potentials elektrochemischer Speicher durch alternative und ergänzende Technologien und Systemlösungen



Projektziel: Ziel des Projekts ist die Entwicklung von Handlungsempfehlungen zum Einsatz von elektrochemischen Speichern und deren Weiterentwicklung, sodass diese das zukünftige Energieversorgungssystem optimal unterstützen können.

Im Rahmen des Verbundprojekts werden daher die Potentiale elektrochemischer Speicher in Bezug auf ihren Beitrag zur Wirtschaftlichkeit, Stabilität und Sicherheit der zukünftigen Stromversorgung in Deutschland untersucht. Weiterhin werden alternative Speichertechnologien, wie zum Beispiel Pumpwasser- oder Druckluftspeicher sowie stoffliche Speicher, und Systemlösungen, wie etwa Konzepte des Lastmanagements betrachtet, um Anwendungsbereiche zu identifizieren, in denen elektrochemische Speicher besonders geeignet sind.

Stand der Technik: Zur Sicherstellung der Stabilität des elektrischen Energieversorgungssystems sind eingespeiste und entnommene Energie stets – unter anderem durch den Einsatz von Regelleistung – im Gleichgewicht halten. Bisher erfolgt die Bereitstellung der Regelleistung vornehmlich durch thermische Kraftwerke, die zum Beispiel mit Kohle oder Erdgas befeuert werden. Bei diesen Kraftwerken verursachen die nötigen technischen Besonderheiten für schnelle Änderungen der abgegebenen Leistung eine Erhöhung der Investitions- und Betriebskosten bei gleichzeitiger Verringerung des Wirkungsgrades.

Im heutigen elektrischen Energieversorgungssystem sind zwei Arten von Energiespeichern vorhanden. Zum einen ist Energie in den rotierenden Massen der Generatoren- und Turbinensätze der großen Kraftwerke gespeichert, die bei Frequenzänderung kurzfristig Energie mit hoher Leistung aufnehmen beziehungsweise abgeben. Somit tragen die Generatoren der großen thermischen Kraftwerke, wie zum Beispiel Kern- und Braunkohlekraftwerke, entscheidend zur Stabilisierung des elektrischen Systems bei. Da sich die Anzahl der am Netz befindlichen Großgeneratoren im Zuge der Energiewende verringern wird und diese zunehmend durch kleinere Erzeugungseinheiten auf Basis regenerativer Energien ersetzt werden, wird sich auch ihre frequenzstabilisierende Wirkung reduzieren, sodass Alternativen gefunden werden müssen (vgl. [1]).

Bei der zweiten Art vorhandener Energiespeicher handelt es sich um Pumpwasser- und Druckluftspeicherkraftwerke, die als Spitzenlastkraftwerke bei hohem Bedarf für kurze Zeit eine hohe Leistung abgeben können, sofern der Speicher geladen ist. Während Schwachlastzeiten – Zeiten geringen Leistungsbezugs und damit einhergehenden geringen Energiekosten – werden diese Speicher geladen. Speicherkraftwerke werden zum Ausgleich der eingespeisten und der

bezogenen Leistung, also zur Erbringung von negativer und positiver Regelleistung, eingesetzt. Weitere Energiespeicher sind im elektrischen Energieversorgungssystem derzeit nicht vorhanden und werden aufgrund der vorhandenen, recht flexiblen Kraftwerkskapazität und der Übertragungskapazität des elektrischen Netzes momentan nicht benötigt. Ist die Kapazitätsgrenze des elektrischen Netzes durch starken, lokalen Zubau von Anlagen zur Nutzung regenerativer Energiequellen erreicht, werden die Netze durch den Zubau neuer beziehungsweise die Verstärkung bestehender Übertragungs- und Verteilnetztrassen ausgebaut (vgl. [2]).

Lösungsweg: Verbundprojekt: Im Einzelnen werden die nachfolgend aufgeführten Punkte im Rahmen des Verbundprojekts bearbeitet.

- Erstellung von Referenznetzen zur Betrachtung verschiedener Szenarien mit großen zentralen Erzeugungseinheiten beziehungsweise mit ausschließlich dezentraler und größtenteils regenerativer Erzeugung.
- Definition von Anwendungsszenarien für Speicher und Ermittlung der technischen und wirtschaftlichen Anforderungen an Speicher im Netz
- Betrachtung von alternativen Lösungen zum Einsatz von Energiespeichern, wie zum Beispiel des Ausbaus der elektrischen Netze, des Lastmanagements, des Einsatzes von Spitzenlastkraftwerken mit kurzer Reaktionszeit oder des Einsatzes von Zusatzlasten
- Untersuchungen an elektrochemischen Speichern bezüglich des Wirkungsgrades, der Reaktionszeit, der Dynamik und der Lebensdauerkosten beim zu erwartenden Lastkollektiv
- Möglichkeit der Nutzung von Energiespeichern, die primär für andere Anwendungen vorgesehen sind, wie zum Beispiel in USV-Anlagen und Elektrofahrzeugen
- Berechnung von Lebenszykluskosten von Energiespeichersystemen in den ermittelten Belastungsfällen
- Untersuchung der Potentiale von Energiespeichern, die in Abhängigkeit der Netzgrößen Spannung und Frequenz zur Netzstabilisierung eingesetzt werden, und Entwicklung entsprechender Regelkonzepte
- Betrachtung von Kommunikationssystemen und Bewertung der dadurch entstehenden Vorteile in Bezug auf die zu erwartenden Zusatzkosten
- Analyse der rechtlichen Rahmenbedingungen für die Bereitstellung von Speicherkapazitäten und Erarbeitung von Änderungsvorschlägen dieser Rahmendbedingungen für den Betrieb von kleinen, dezentralen Speicheranlagen.
- Bewertung von Akzeptanzproblemen und möglichen Auswirkungen von dezentralen Speichersystemen

Im Fokus des Verbundprojekts steht die Untersuchung der Eignung verschiedener Speichertechnologien in unterschiedlichen Anwendungsgebieten. Vor diesem Hintergrund wurden aus

Projekt: ESPEN

den durchgeführten Netzsimulationen Anforderungsprofile an elektrochemische Speicher in den folgenden Anwendungsbereichen ermittelt:

- Spannungshaltung durch Reduzierung der (lokalen) Einspeisespitze
- Unterstützung bei oder Übernahme der Erbringung von Regelleistung
- Vermeidung von Netzengpässen
- Glättung des Residuallastverlaufs

Aus den ermittelten Anforderung (Leistung, Kapazität, Belastung) wurden im Rahmen einer wirtschaftlichen Betrachtung unter Berücksichtigung von Alterungseffekten der jeweils betrachteten Speichertechnologie, die jeweils beste Speichertechnologie und –auslegung für die definierten Anwendungsbereiche bestimmt. Ergebnisse der ebenfalls im Rahmen des Projekt durchgeführten experimentellen Speicheruntersuchung werden in die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen berücksichtigt. Erste Projektergebnisse sind in die VDE-Studie „Batteriespeicher in der Nieder- und Mittelspannungsebene“ [3] eingeflossen.

Da neben den technischen Aspekte des Speichereinsatzes ebenfalls rechtliche Aspekte und Fragestellungen der Akzeptanz für den Einsatz von elektrochemischen Speichern relevant sind, wurden weiterhin die rechtlich-regulatorischen Rahmenbedingungen für den Einsatz von Speichern analysiert und erste Anpassungsvorschläge erarbeitet, die die Einsatzmöglichkeiten von Speichern im Energiesystem verbessern können. Außerdem wurden ökologische Auswirkungen und die Akzeptanzproblematik untersucht, um nicht-technische Hemmnisse der Speichernutzung in den untersuchten Anwendungsfällen zu identifizieren.

Arbeiten am Institut für elektrische Energietechnik und Energiesysteme:

Betrachtung alternativer Technologien: Die Kernaufgabe des am Institut für elektrische Energietechnik und Energiesysteme durchgeführten Teilvorhabens bezieht sich auf die Betrachtung alternativer Lösungen zur Integration regenerativer Energie in das Energiesystem. Damit werden folgende Alternativen zu Einsatz elektrochemischer Speicher betrachtet, die das Potential dieser in bestimmten Anwendungsfällen reduzieren können.

Nutzung von Gas- und Wärmenetzen (Power-to-Heat und Power-to-Gas), Spitzenlastkraftwerke, Ausbau der elektrischen Netze, Lastmanagement, Zusatzlasten. Ziel ist die Beschreibung möglicher Alternativen, ihrer Kosten und Auswirkungen auf die Netzqualität, Wirtschaftlichkeit und Zuverlässigkeit der Versorgung, sowie deren Auswirkungen auf andere gesellschaftliche und volkswirtschaftliche Aspekte. Im Fokus dieses Arbeitsschrittes steht dabei nicht die genaue Untersuchung dieser Lösungsalternativen, sondern die Identifizierung von Bereichen, in denen elektrochemische Speicher besonders gute Chancen haben werden, und Bereichen, in denen alternative Lösungen besondere Vorteile haben können. Auch Kombinationen der genannten Alternativen mit Speichertechnologien sollen betrachtet werden.

Während der Projektlaufzeit hat sich gezeigt, dass insbesondere die Nutzung von Wärmenetzen durch die Anwendung des Power-to-Heat-(P2H)-Konzepts eine interessante Alternative zum

Einsatz elektrochemischer Speicher, sowohl für die lokale Aufnahme von Einspeisespitzen im Niederspannungsnetz, als auch für die Nutzung regional vorhandener Energieüberschüsse, die andernfalls durch Einspeisemanagementeingriffe abgeregelt werden würden (vgl. [4]).

Im Rahmen der beispielhaften Untersuchung eines Niederspannungsnetzes wurden folgende Möglichkeiten zu Einhaltung der Spannungsgrenzen bei unterschiedlicher PV-Durchdringung verglichen:

- Einsatz von P2H in den Haushalten zur Aufnahme überschüssiger Energie
- Einsatz von elektrochemischen PV-Hausspeichern zur Steigerung des Eigenverbrauchs
- Einsatz eines zentralen elektrochemischen Speichers am Strangende
- Kombination eines zentralen Speichers mit dem Einsatz von P2H in den Haushalten

Die Betrachtungen zeigen, dass der Betrieb der dezentralen Speicher (1 kWh Speicherkapazität pro 1 kWp der installierten PV-Anlage) mit dem Ziel der Maximierung des Eigenverbrauchs erwartungsgemäß einen geringen Effekt auf die Spannungserhöhung im Netz haben, da die Speicher zum Zeitpunkt der Spitzeneinspeisung meist bereits geladen sind. Gleichermaßen zeigt auch der am Strangende installierte zentrale Batteriespeicher mit einer Kapazität von 240 kWh (in Anlehnung an das Pilotprojekt der Stadtwerke Neustadt und IBC Solar in der Gemeinde Fechheim) einen geringen Einfluss auf die Spannungserhöhung, da die Speicherkapazität mit steigender installierter PV-Leistung nicht ausreicht.

Obwohl sich der signifikante Wärmebedarf der Haushalte auf die Wintermonate konzentriert (Ermittlung der Wärmebedarfszeitreihen nach [5] und [6]), führt die Nutzung des P2H-Konzepts durch den Vergleich mit dem Bedarf an elektrischer Leistung relativ hohen und kontinuierlichen Bedarf an thermischer Energie auch in den Sommermonaten noch zu einer wesentlichen Verringerung der Höhe und Anzahl der einspeisebedingten Spannungsbandverletzungen. In Bezug auf die Reduktion der Anzahl und Dauer der Überspannungseignisse (Überschreitung der Nennspannung um mehr als 10 %, bei einer Eingangsspannung von 107 % der Nennspannung am MS/NS-Trafo) stellt sich die Kombination aus dezentraler Nutzung von P2H-Systemen mit einem zentralen elektrischen Speicher als technisch vorteilhafteste Lösung dar. Die Untersuchung wurde während der P2H-Dialogplattform des EFZN im Mai 2015 in Goslar vorgestellt und im Tagungsband veröffentlicht [7].

Neben Auswirkungen des Einsatzes dezentraler P2H-Anlagen auf das Verteilnetz, wird ebenfalls der Einsatz eines zentralen Systems zur Aufnahme ansonsten abgeregelter Energie durch eine P2H-Anlage innerhalb eines Fernwärmenetzes untersucht [8].

Anhand eines beispielhaft betrachteten Fernwärmenetzes (basierend auf Angaben eines Stadtwerks), welches 434 Gebäude (vorwiegend Mehrfamilienhäuser) mit Wärme versorgt, wurden die Möglichkeiten der Installation eines elektrischen Heizsystems (5 MW) zur Aufnahme von regionalen Überschüssen (an einem fiktiven Markt), zur Teilnahme am Sekundärregel- und

Projekt: ESPEN

Minutenreservenmarkt, sowie zur Vermarktung an der EEX (Day-Ahead- und Intraday-Markt) untersucht. Im System ist ein Wärmespeicher mit einer Kapazität von 16 MWh vorhanden. Die Wärmebereitstellung erfolgt mittels eines Biomasse-Heizkraftwerks mit einer thermischen Leistung von 17 MW. Für die Spitzenlastbringung sowie zur Redundanz sind weiterhin Erdgaskessel im System vorhanden.

Für die Ermittlung der in der Region abgeregelten Energie wird auf die öffentlich verfügbaren Daten des lokalen Verteilnetzbetreibers zurückgegriffen und aus den Angaben zu den Einsparmaßnahmen, die Zeitreihe der abgeregelten Leistung abgeschätzt. Für die Umlagenbelastung des bezogenen Stroms werden einerseits die aktuell geltenden Rahmenbedingungen untersucht und andererseits eine nach [4] vorgeschlagene Reduzierung der EEG-Umlage und damit einhergehende verringerte Grenzkosten beziehungsweise gebotene Arbeitspreise betrachtet.

Es zeigt sich, dass der vorhandene Speicher mit einer Kapazität von 16 MWh für die Vermarktung an den Regelleistungsmärkten ausreichend ist. Unter den angenommenen Rahmenbedingungen können 20 % der anderenfalls abgeregelten Energie zur Wärmebereitstellung eingesetzt werden.

Ergebnis der Analyse ist, dass die Nutzung der abgeregelten Energie in der Beispielregion in Mecklenburg-Vorpommern durch eine Power-to-Heat-Anlage im betrachteten Wärmenetz möglich, die Wirtschaftlichkeit der Anlage jedoch nur dann gegeben ist, wenn die Energie am regionalen Überschussmarkt mit 0 ct./kWh und ohne Umlagenbelastung gehandelt werden kann.

Dissemination der Ergebnisse: Im Rahmen des Projekts wurden offene Workshops zu den verschiedenen Themenstellungen durch das Institut für elektrische Energietechnik und Energiesysteme organisiert und durchgeführt. Die erarbeiteten Ergebnisse werden mit Industrieunternehmen, insbesondere Energieversorgern und Netzbetreibern und der Politik diskutiert, um die Umsetzung der Handlungsvorschläge voranzubringen.

Seit Beginn des Projekts wurden Workshops unter reger Beteiligung von Interessenten aus Industrie und Forschung zu folgenden Themenstellungen durchgeführt:

- Pumpspeicherkraftwerke (Februar 2013 in Goslar)
- Große Batteriespeicher zur Netzstützung (April 2013 in Frankfurt am Main)
- Spannungshaltung (Mai 2013 in Magdeburg)
- Power-to-heat – mit der Landesinitiative Energiespeicher und Systeme und der Firma Stiebel Eltron (Oktober 2013 in Holzminden)
- Power-to-Gas (November 2013 in München)
- Netzausbau (März 2014 in Magdeburg)
- Große Batteriespeicher – mit der Landesinitiative Energiespeicher und Systeme und der Firma Power Innovation (Mai 2014 in Achim)
- Rechtliche und regulatorische Rahmenbedingungen (Mai 2014 in Aachen)

- Nachhaltige Versorgungssicherheit – mit der Landesinitiative Energiespeicher und Systeme und enercity (November 2015 in Hannover)
- USV- und Notstromanlagen – mit der Landesinitiative Energiespeicher und Systeme und der Firma Piller (März 2015 in Osterode am Harz)

Stand des Projekts: Die Kernpunkte des Projekts sind bereits abgeschlossen. Die Ausarbeitungen für den gemeinsamen inhaltlichen Abschlussberichts stehen noch aus.

- Literatur:**
- [1] Deutsche Energie-Agentur (Hrsg.): dena-Studie Systemdienstleistungen 2030 – Sicherheit und Zuverlässigkeit einer Stromversorgung mit hohem Anteil erneuerbarer Energien, Berlin, 2014
 - [2] Deutsche Energie-Agentur (Hrsg.): dena-Verteilnetzstudie – Ausbau- und Innovationsbedarf der Stromverteilnetze in Deutschland bis 2030, Berlin, 2012.
 - [3] JvDE (Hrsg.): Batteriespeicher in der Nieder- und Mittelspannungsebene – Anwendungen und Wirtschaftlichkeit sowie Auswirkungen auf die elektrischen Netze, Frankfurt am Main, 2015
 - [4] Agora Energiewende (Hrsg.): Power-to-Heat zur Integration von ansonsten abgeregeltem Strom aus Erneuerbaren Energien. Berlin, 2014.
 - [5] Hellwig, M.: Entwicklung und Anwendung parametrisierter Standard-Lastprofile. München, Technische Universität, Dissertation, 2003.
 - [6] Bundesumweltministerium (Hrsg.): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau erneuerbarer Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. Berlin, 2012.
 - [7] Armbrecht, B.; Schütte, T.; Spielmann, V. Anwendung von P2H zur Begrenzung der PV-Einspeiseleistung um Netzausbaumaßnahmen im Niederspannungsnetz zu vermeiden. In: Wenzl, H.; Kaiser, F. (Hrsg.): Erneuerbare erfolgreich integrieren durch Power to Heat: Dialogplattform des EFZN Goslar, 5. und 6. Mai 2015. 1. Auflage. Göttingen: Cuvillier Verlag Göttingen, 2015. S. 39 – 51
 - [8] Bettinger, C.; Spielmann, V. Regenerativer Überschussstrom für Power-to-Heat - Abschätzung der Potentiale von Überschussstrommärkten. In: Wenzl, H.; Kaiser, F. (Hrsg.): Erneuerbare erfolgreich integrieren durch Power to Heat: Dialogplattform des EFZN Goslar, 5. und 6. Mai 2015. 1. Auflage. Göttingen: Cuvillier Verlag Göttingen, 2015. S. 158 – 169

Projekt: ESPEN

- Projektpartner:**
- Energie-Forschungszentrum Niedersachsen (ausführende Stelle: Institut für elektrische Energietechnik und Energiesysteme) – Verbundprojektkoordinator
 - Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) in Freiburg
 - Fraunhofer-Institut für Windenergie- und Energiesystemtechnik (IWES) in Kassel
 - Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoffforschung (ZSW) – Fachgebiet Elektrochemische Akkumulatoren (ECA) in Ulm
 - Technische Universität München (TUM) – Lehrstuhl für Elektrische Energiespeichertechnik (EES)
 - Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH Aachen) – Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA) – Lehrstuhl für Elektrochemische Energiewandlung und Speichersystemtechnik
 - Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (OvGU) – Lehrstuhl Elektrische Netze und Alternative Elektroenergiequellen (LENA)

Die am Projekt beteiligten Personen beziehungsweise Organisationen sind Mitglied der Interessengemeinschaft für Batterien in elektrischen Netzen.



Förderung: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

Laufzeit: 01.11.2012 - 31.12.2015

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Verena Spielmann (Tel: 72-3736)
verena.spielmann@tu-clausthal.de

Projektleiter: Prof. Dr. rer. nat. Heinz Wenzl (Tel: 05522/919170)
heinz.wenzl@t-online.de

4 Personelle Besetzung

4.1 Hauptamtliche Mitarbeiter des Instituts

Hochschullehrer: (Institutsdirektor)	Prof. Dr.-Ing. H.-P. Beck
	Prof. Dr.-Ing. M. Faulstich
Akademischer Direktor:	Dr.-Ing. E.-A. Wehrmann
Akademische Rätin a. Z.	Dr.-Ing. G. Sourkouni-Argirusi (Austritt 02/15)
Oberassistent:	Prof. Dr. rer. nat. H. Wenzl
Wiss. Assistent:	Dr.-Ing. D. Turschner
Wissenschaftliche Mitarbeiter:	Dr.-Ing. R. Bengler (ab 07/15 EFZN)
	Dipl.-Ing. A. Bentaleb
	L. Beushausen, M. Sc.
	Dipl.-Ing. N. Ell
	S. Fiebrich, M. Eng.
	Dipl.-Ing. M. Geng (Austritt 06/2015)
	A. Hashemifarzad, M. Sc.
	Dr.-Ing. R. Heyne
	Dipl.-Wirtsch.-Ing. K. Koring
	Dipl.-Ing. A. Oberland
	F. Pöschke, M. Eng. (Austritt 03/2015)
	Dipl.-Wirtsch.-Ing. I. Ryspaeva
	Dipl.-Ing. R. Schnieder
	Dipl.-Ing. B. Schwake
	Dipl.-Ing. V. Spielmann
	Dipl.-Ing. M. Stubbe (Austritt 07/2015)
	Dipl.-Ing. E. Tchoupou Lando

Dipl.-Ing. A. Theiß, M. Sc. (Austritt 10/15)
M. Thiele, M. Eng.
Dipl.-Ing. A. Ufkes
Dipl.-Ing. J. Umbach (Austritt 09/14)
Dipl.-Ing. B. Werther

Freie wissenschaftliche Mitarbeiter:
(externe Doktoranden)

Becker, Andreas (EFZN)
Bedrunka, Alexander (Hochschule Hannover)
Fiebrich, Stefan (EFZN)
Haslbeck, Matthias (OTH Regensburg)
Küster, Torben (IAV)
Schmicke, Christian (Hochschule Hannover)
Stebner, Gerhard (Ostfalia Hochschule WF)

MitarbeiterInnen im Technischen
und Verwaltungsdienst (MTVD):

Frau Bartsch (Austritt 03/15)
Frau E. Mendt (Austritt 08/15)
Frau C. Schönemann
Frau Stolzheise-Hiltmann (Austritt 03/15)
Frau Zugehör
Herr M. Kirchner
Herr J. Köplin (Austritt 03/15)
Herr R. Koschnik
Herr I. Lührig
Herr K. ter Smitten
Herr M. Buchholz (Auszubildender)
Herr J.-N. Gebhardt (Auszubildender)
Herr M. Gieseler (Auszubildender)
Herr F. Hesse (Auszubildender)
Herr D. Holzapfel (Auszubildender)

Die Mitarbeiter des Institutes für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme



H.-P. Beck
(Direktor)
-2570



M. Faulstich
(CUTEC-Leiter)
-933-120



E.-A. Wehrmann
(Akad. Oberrat)
-2595



G. Sourkouni-Argirusi
(ehem. Mitarbeiterin)



D. Turschner
(Wiss. Assistent)
- 2592



H. Wenzl
(Oberassistent)
- 2272



S. Zugehör
(Sekretariat)
- 2299



Frau Mendt
(ehem. Mitarbeiterin)



Frau Bartsch
(ehem. Mitarbeiterin)



A. Stolzheise-Hiltmann
(ehem. Mitarbeiterin)



R. Benger
(ehem. Mitarbeiter)



A. Bentaleb
(WiMa, Dezentrale Energieversorgung)
- 2593



L. Beushausen
(WiMa, Speicher-
systeme)
- 05321/3816-
8161



N. Ell
(WiMa, Antriebs-
strang Windkraft-
anlage)
- 3821



S. Fiebrich
(WiMa, Speicher-
systeme)
05321/3616-8065



M. Geng
(ehem. WiMa)



A. Hashemifar-
zad
(WiMa, Energie-
systemanalyse)
- 933-0



R. Heyne
(WiMa, Batterie-
systeme)
- 2272



K. Koring
(WiMa, Speicher-
systeme)
-05321/3816-8101



A. Oberland
(WiMa, Batterie-
systeme)
- 3720



F. Pöschke
(ehem. WiMa)



I. Ryspaeva
(WiMa, Energie-
systemanalyse)
-05321/3816-8095



R. Schnieder
(WiMa,
Elektrische
Verteilnetze)
- 3597



B. Schwake
(WiMa, Virtuelle
Synchron-
maschine)
- 2929



V. Spielmann
(WiMa, Batterie-
systeme)
- 3736



M. Stubbe
(ehem. WiMa)



E. Tchoupou Lando
(WiMa, Batterie-
systeme)
- 2572



A. Theiß
(ehem. WiMa)



M. Thiele
(WiMa, Speicher-
systeme)
-05321/3816-
8161



A. Ufkes
(WiMa, Netze)

- 2594



J. Umbach
(ehem. WiMa.)



B. Werther
(WiMa, Netz-
stabilität)
-05321/3816-
8101



M. Buchholz
(Auszubilden-
der)
-2940



J.-N. Gebhardt
(Auszubildender)

-3839



M. Gieseler
(Auszubildender)

-2940



F. Hesse
(Auszubildender)

3839

Mitarbeiterinnen / Mitarbeiter

Telefon: 05323/72-



D. Holzapfel
(Auszubildender)

- 2940



M. Kirchner
(Elektronik)

-3839



J. Köplin
(ehem. Mitarbeiter)



R. Koschnik
(Energieelektronik)

- 5067



I. Lührig
(Energietechnik)

- 2571



C. Schönemann
(Techn. Zeichnerin)

- 2177



K. ter Smitten
(Mechanik)

- 2571

Mitarbeiterinnen / Mitarbeiter

Telefon: 05323/72-

4.2 Nebenamtlich tätige Hochschullehrer bzw. Lehrbeauftragte

	Lehrgebiete:
Prof. Dr.-Ing. E. Baake	Lehrgebiet Theorie Elektromagnetischer Felder
Dr.-Ing. Buddenberg	Fossile und regenerative Energieressourcen
Dipl.-Ing. H. Darrelmann	Autonome Netze
Dr. rer. nat. W. Faber	Energiesysteme: Kapitelteil Kernbrennstoffe
Dr.-Ing. J. Heldt	Sonderprobleme Elektrischer Maschinen
Dr. Ing. J. Jahn	Regenerative Elektrische Energietechnik
Prof. Dr.-Ing. J. Kühl	Regenerative Energiequellen
Dr.- Ing. G. Lülff	Optimierung und Instandhaltung von Elektroenergieanlagen
Prof. Dr.-Ing. K.-D. Maubach	Elektrizitätswirtschaft
Prof. Dr. rer. nat. H. Wenzl	Batteriesystemtechnik und Brennstoffzellen

4.3 Wissenschaftliche Hilfskräfte

Herr H. Al-Ashwal	Frau M. Ivers	Herr C. Rammelt
Herr B. Armbrrecht	Herr D. Janssen	Herr S. Reineke
Herr L. Beushausen	Herr J. Kiefer	Herr H. Rohde
Frau L. Busche	Frau M. Klarmann	Herr F. Rohkamm
Frrau H. Chen	Frau E.-C. Kohlstedt	Herr S. F. Schäfer
Herr M. Dossou	Herr N. Kreth	Herr T. Schütte
Herr D. Er	Herr M. Lensing	Herr W. Schreiber
Frau E. Frink	Frau B. Lentze	Herr J. Schumacher
Herr J.-M. Frohwerk	Herr S. Marx	Herr A. Sturm
Herr M. Fuhrmann	Frau P. Memari	Herr K. Tkalcec
Herr J. Gollenstede	Frau A. Moeske	Herr L. Wandelt
Herr D. He	Frau S. E. Musial	Herr F. Winning

4.4 Mitgliedschaften in wissenschaftlichen Vereinigungen und in den Selbstverwaltungsgremien der Universität

- Prof. Dr.-Ing. H.-P. Beck
- Vorstandsvorsitzender des Energieforschungszentrums Niedersachsen (ab 01.02.2008)
 - Mitglied im Energy Academy Europe (Uni Groningen NL)
 - AQUAS-Gutachter
 - Vorstandsmitglied des Forums Clausthal (FC)
 - DFG/AiF-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.) Themenfeld Energie
 - Mitglied in der Niedersächsischen Regierungskommission Klimaschutz “Runder Tisch Energie”
 - Mitglied im VDE-Energiespeicher
 - Mitherausgeber des Handbuches Energiemanagement
- Dr.-Ing. E.-A. Wehrmann
- Mitglied der Kommission zum wissen. Fehlverhalten
- Dr.-Ing. D. Turschner
- Mitglied der Jury bei “Jugend forscht”
 - Mitglied des internationalen Programmkomitees “International Conference on Renewable Energy and Power Quality ICREPQ”
- Herr R. Koschnik
- Ausbilder
 - Sicherheitsbeauftragter
 - Mitglied des Prüfungsausschusses für Energieelektroniker der IHK Braunschweig

5 Links

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

6 Anlagen

Die Anlagen sind in der angegebenen Reihenfolge eingebunden

Anlage 1 Ressourcen des Institutes

Anlage 2 Einweihung Institutsfassade
(Zeitungsausschnitt der Goslarschen Zeitung)

Institut für Elektrische Energietechnik

Ressourcen des Institutes

●	Verfügbare Gebäudefläche	1670 m ²
	-Bürofläche	826 m ²
	-Labor-/Prüffeldfläche	794 m ²
	-Büros und Labor (EFZN Goslar)	100 m ²
●	Mitarbeiter (Stand Ende 2015)	
	-wissenschaftliches Personal	16
	-techn./Verwaltungsangestellte	11
	-Lehrbeauftragte	10
	-Wissenschaftliche Hilfskräfte	36
	-externe Doktoranden	7
		<hr/>
		80
●	Prüffeld mit	
	-Maschinen-/Antriebslabor	
	-Energieelektroniklabor	
	-Hochspannungs-/Energieanlagenlabor	
	-Prüfstände für Walzwerks-, Bahn- /Schredder-Antriebe mit Umrichter	
	-Batterie-Prüfstand mit Impulslade / -entladegerät und Impedanzspektrometer	
	-Prüfstand für Windkraftanlagen zur Getriebeprüfung	
	-Schleudergrube	
	-Brennstoffzellen-Versuchseinrichtung	
●	Labor elektrische Verteilnetze (Multi-VISMA), EFZN	
●	Netz-/Speicherlabor (EFZN)	
●	Prozeßrechner-/Simulationstechniklabor: Windows - NT - Workstations, Digitale Signalprozessor - Einschübe, CIP-Pool, WAP-Pools	
●	Windenergieanlage Easywind (5 kW)	
●	PV-Fassaden Anlage (10 kW)	
●	Regenerative Schnellladetankstelle	
●	Tesla-Roaster, 2 Fiat-Panda-EV	

Mittwoch, 30. April 2014

OBERHARZ

E-Mail: redaktion.claus
 Internet: www.goslars
 Telefon/Telefax: (053
 Facebook: www.facebook
 Twitter: www.twitter.c

Institut kann sich wieder sehen lassen

1,4 Millionen in neue Fassade investiert: IEE ist wichtiger Baustein der energetischen Sanierung von TU-Gebäuden

Clausthal-Zellerfeld. Große Fortschritte macht die energetische Sanierung von Institutsgebäuden der TU Clausthal. Mit einem Festakt ist gestern die Neugestaltung des Instituts für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme (IEE) im Campusgebiet Feldgraben gefeiert worden. Inklusiv einer Photovoltaikanlage wurden rund 1,4 Millionen Euro in die neue Fassade investiert. Neben dem IEE ist in dem Gebäude auch das Institut für Elektrische Informationstechnik untergebracht.

An der Einweihung nahmen auch zahlreiche Vertreter aus Politik und Verwaltung, darunter Landrat Thomas Brych, teil. Der Oberharzer Samtgemeindebürgermeister Walter Lampe fand die richtigen Worte für die neue Fassade: „Dem sanierten Institutsgebäude sieht man von außen an, was innen zu erwarten ist: Forschung auf hohem Niveau.“

Weitere Projekte geplant

In einjähriger Bauzeit wurden insgesamt 1400 Quadratmeter Fassade erneuert. Das 50-jährige IEE-Jubiläum sei zwar schon zwei Jahre her, merkte TU-Präsident Prof. Thomas Hanschke an, dennoch sei die Sanierung zum richtigen Zeitpunkt fertig geworden. „Denn Institutsleiter Professor Hans-Peter Beck kam 1989 an die TU Clausthal und feiert in diesem Jahr sein 25-



Werben für die E-Mobilität (v.li.): Institutsmitarbeiter Dipl.-Phys. Raoul Heyne sowie die Professoren Martin Faulstich und Hans-Peter Beck. Fotos: Bertram



Mit neuer Fassade inklusive Photovoltaikanlage: Das Clausthaler Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme.

jähriges Dienstjubiläum im Oberharz.“ Außerdem kündigte Hanschke an, dass die TU an der energetischen Sanierung festhalte und sich für 2015 das Gebäude der Geophysik vornehme. Das Wissenschaftsministerium habe dafür schon Unterstützung signalisiert. In den vergangenen Jahren waren bereits mehrere Gebäude saniert worden: das Institut für Erdöl- und Erdgastechnik, das Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik mit dem Institut für Werkstoffkunde und Werkstofftechnik sowie das Institut für Schweißtechnik

Die gestrige Feier bot Gelegenheit, eine kleine Rückschau in die IEE-Geschichte zu halten: Dem-

nach hatte sich nach Übernahme der Institutsleitung durch Prof. Beck der Schwerpunkt in Lehre und Forschung von der reinen Elektrotechnik in Richtung Energietechnik verlagert. Ihm ging es besonders um die Verbindung des allgemeinen Elektrotechnikstudiengangs mit der immer wichtiger werdenden Energietechnik.

Wichtiger Studiengang

Daraus entstand 1994 der Studiengang Energiesystemtechnik, der nur an wenigen Standorten in Deutschland gelehrt wird. Lange vor der Energiewende der Bundesregierung bildete die Energietechnik

in Forschung und Lehre den Schwerpunkt des Instituts.

Arbeitsfelder sind dezentrale Energiesysteme, leistungsmechatronische Systeme/elektrische Antriebe sowie Energiespeicher. 2013 wurden diese Arbeitsgruppen um eine weitere von Prof. Martin Faulstich, Leiter des Clausthaler Umwelttechnik-Instituts und Vorsitzender des Sachverständigenrates für Umweltfragen der Bundesregierung, ergänzt. Er bereichert das Institut um die Sparte der nichtelektrischen Energiesysteme. Diese Erweiterung ging einher mit der Umbenennung des Instituts in „Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme“.

red/öh