



TU Clausthal

Jahresbericht 2020/2021

des

Institutes für Elektrische Energietechnik
und Energiesysteme



Clausthal-Zellerfeld
März 2022

IEE-Bericht Nr. 31/32

Inhaltsverzeichnis

0	Vorwort	1
1	Lehre	3
1.1	Vorlesungen	3
1.2	Übungen, Praktika, Mentoring	6
1.3	Seminarvorträge	9
1.4	Bachelor- und Masterarbeiten	10
2	Veröffentlichungen, Dissertationen	19
2.1	Zeitschriften- und Tagungsaufsätze	19
2.2	Vorträge / Seminare	21
2.3	Veranstaltungen, Exkursionen, Gastaufenthalte	22
3	Forschungsarbeiten + Forschungsgebiete des Institutes	22
3.1	Geförderte Forschungsvorhaben	22
3.2	Projektübersichten	23
4	Personelle Besetzung	143
4.1	Hauptamtliche Mitarbeiter des Instituts	143
4.2	Honorarprofessoren und Lehrbeauftragte	148
4.3	Wissenschaftliche Hilfskräfte	148
4.4	Mitgliedschaften in wissenschaftlichen Vereinigungen und in den Selbstverwaltungsgremien der Universität	149
5	Links	150
6	Anlagen	150

0 Vorwort

Der Wandel an der TU Clausthal und dem IEE ist in vollem Gange. Dazu wird dieser Bericht über Lehre und Forschung in der Zeit des Übergangs vorgelegt.

Liebe Freunde und Förderer des Institutes,
die offizielle Dienstzeit des Unterzeichnenden ist mit der Vorlage des letzten Jahresberichtes 2018/2019 zu Ende gegangen. Der vorliegende Jahresbericht 2020/2021 entstand aus der Überzeugung des Unterzeichnenden, den Institutsbetrieb so lange unter bisheriger Leitung weiterzuführen, bis die (der) Nachfolger:in die neu ausgeschriebene W3-Stelle für Energiespeichertechnik und –systeme wiederbesetzt und die Institutsleitung in jüngere Hände übergeht. Bis dahin werden die laufenden Geschäfte in Forschung und Lehre in bewährter Weise fortgeführt; so jedenfalls der Plan und die derzeitige Vertragslage. Was hat der zeitlich begründete Wandel bisher gebracht? In Lehre und Forschung hat die mit Beginn des Berichtszeitraums aufgekommene Coronapandemie, die inzwischen mehr als zwei Jahre andauert, fast alles verändert. Videodienste, Online-Vorlesungen und –Prüfungen haben den Lehrbetrieb ebenso verändert wie das verordnete Homeoffice, die virtuellen Sitzungen, weitgehend weggefallene Dienstreisen, Präsenzkongresse und –tagungen sowie der Drittmittelwerbepbetrieb in der Forschung. Alle Kräfte wurden darauf gerichtet, den Institutsbetrieb so weit möglich aufrecht zu erhalten, insbesondere in der Lehre. Wie den aufgeführten Vorlesungs-, Übungs- und Praktika-Anmeldungen in StudIP zu entnehmen ist (S. 4 ff), haben sich danach die Summenzahlen erfreulicherweise kaum verändert. Wunsch und guter Wille seitens der Studierenden war offenbar da. Betrübtlich ist jedoch, dass die Anzahl der im Berichtszeitraum abgelegten Prüfungen am Institut im Vergleich zum vorangegangenen Berichtszeitraum um 40 %, d. h. von 1.728 (2018/19) auf 1.016 (2020/21) Prüfungen zurückgegangen ist. Dies lässt indirekt auf die Belastung der Studierenden durch die Pandemie schließen. An den Lehrenden und Prüfenden hat es vermutlich nicht gelegen, denn die Lehrveranstaltungen haben nachweislich wie geplant, wenn auch überwiegend virtuell, stattgefunden. Hierfür sei an dieser Stelle allen internen und externen Personen des IEE-Lehrkörpers herzlichst gedankt. Was die „Modernisierung“ der Lehre angeht, ist neben der allseits gelobten Digitalisierung auch die erfolgreiche Reakkreditierung der vom IEE zu verantwortenden Studiengänge „Energietechnologien“ und „Energiesystemtechnik“ zu nennen. Der BA-Studiengang „Energietechnologien“ wurde der gesellschaftlichen und technischen Entwicklung angepasst und umgestaltet. Der Bachelorstudiengang heißt jetzt „Nachhaltige Energietechnik und –systeme“ und soll u. a. einen Forschungsergebnistransfer aus dem gleichlautenden Forschungsfeld der TU Clausthal befördern. Die Umgestaltung betrifft auch

neue Lehrformen wie z. B. die des „Inverted Classroom“. Es sind entsprechende Lehrformate in den ersten Semestern vorgesehen, die zu Anfang weniger Theorie und mehr Motivationsförderung und Wissensintegration initiieren sollen, was ein intensiveres Projektstudium mit transdisziplinärem Ansatz impliziert. Die Umstellung des Lehr- und Lernformats zieht eine noch intensivere Betreuung durch Lehrende und damit eine höhere Lehrbelastung in den ersten Semestern nach sich. Die Änderungen sollen den Übergang von der Schule ins Studium erleichtern. Natürlich erhoffen sich die Verantwortlichen auch einen höheren Zuspruch seitens der Erstsemester für die Zukunft, denn die Energiewende mit dem Ziel einer nachhaltigeren Energiebereitstellung braucht neben einer Bewusstseinsänderung innerhalb der Gesellschaft auch viele entsprechend ausgebildete Fachkräfte. Hierauf zielt der reakkreditierte Studiengang ab. Die Zukunft wird zeigen, ob der gewählte Ansatz trägt. Die Neustrukturierung der Forschungslandschaft an der TUC ist ein weiteres wichtiges Thema, um den Wandel in der Gesellschaft hin zur nachhaltigen Industriegesellschaft auch in der wissenschaftlichen Ausbildung Rechnung zu tragen. Die nunmehr eingerichteten vier Forschungsfelder (Website der TUC), basierend auf den früheren Schwerpunkten heißen:

- Nachhaltige Energiesysteme
- Rohstoffsicherheit und Ressourceneffizienz
- Neuartige Materialien und Prozesse für wettbewerbsfähige Produkte
- Digitalisierung für eine nachhaltige Gesellschaft.

Sie sind im „House of Research“ (HoR), das vom Vizepräsidenten für Forschung koordiniert wird, organisatorisch zusammengefasst. Dies gilt auch für die an der TUC bestehenden sechs Forschungszentren, die ebenfalls in das HoR eingegliedert werden sollen. Die Beteiligten erhoffen sich dadurch einen stringenteren und ressourceneffizienteren Forschungsbetrieb, der die disziplinäre Forschung an den Instituten mittels der neuen multi- und transdisziplinären Wissenschaftsmethoden ergänzen soll. Der Wandlungsprozess innerhalb der TU Clausthal und des IEE ist natürlich noch nicht abgeschlossen, auch weil die immer parallellaufende externe Begutachtung der Forschung durch die wissenschaftliche Kommission des Landes Niedersachsen (MWK) und die Nachbesetzung der IEE-Institutsleitung und des dazugehörigen Lehrstuhls noch nicht abgeschlossen sind. Es bleibt zu hoffen, dass den Freunden und Förderern des IEE hierzu in zukünftigen Jahresberichten wie gewohnt berichtet werden wird.

Glück auf!

1 Lehre

1.1 Vorlesungen

Die Studierendenzahlen sind in den zurückliegenden zwei Jahren wiederum leicht zurückgegangen (derzeit rd. 3500 Studierende). Im Mittel gab es im Berichtszeitraum am IEE pro Jahr “nur” noch knapp 700 Studierende im Grundstudium und 400 im Fachstudium. Die Zahl der fortgeschrittenen Studierenden resultiert aus den vielen Wahlpflichtfächern, die vom haupt- und nebenamtlichen Lehrpersonal angeboten werden. Insbesondere den Lehrbeauftragten und den Honorarprofessoren des IEE sei an dieser Stelle für die erbrachte Lehrleistung wieder einmal herzlich gedankt. Ein wissenschaftlicher konsekutiver Studiengang Nachhaltige Energietechnik und -systeme (BA) und Energiesystemtechnik (MA), die zum 01.10.2022 erfolgreich reakkreditiert sein werden, wären ohne diese Expertise der internen und externen nebenamtlichen Lehrkräfte nicht einschlägig. Das gilt auch für den neu eingeführten Bachelorstudiengang Elektrotechnik (Beginn ab WS 2018/2019).

Die “Renner” in der Lehre (gemessen an den Studierendenzahlen) sind, wie man der folgenden Tabelle entnehmen kann, nach wie vor die Fächer (ungefähre Anzahl der StudIP-Einschreibungen pro Jahr in Klammern)

- Grundlagen der Elektrotechnik (700)
- Elektrizitätswirtschaft (70)
- Leistungsmechatronische Systeme (40)
- Regenerative Energiequellen (50)

Sie tragen 3/4 der Studierendenzahlen. Ähnliches gilt für die dazugehörigen Übungen.

Insgesamt fanden im Verlauf des Berichtszeitraums 1016 Bachelor- und Masterprüfungen statt, die von den prüfungsberechtigten Hochschullehrern, Honorarprofessoren und Lehrbeauftragten des Institutes abgenommen wurden. Alle sind Prüfungen im Haupt- bzw. Fachstudium (5.-10. Semester).

Tabelle 1: Anzahl der StudIP-Einschreibungen in die vom IEE angebotenen Vorlesungen

		2020	2021
Beck/Wehrmann	Grundlagen der Elektrotechnik I/II (W 8800 / S 8801) Elektrotechnik für Ingenieure I/II (W8800 / S 8801)	755	689
Beck/Turschner	Elektrische Energietechnik (S 8803)	30	51
Beck/Turschner	Regelung Elektrischer Antriebe (W 8808)	10	4
Beck	Energieelektronik (W 8811)	9	7
Beck	Einführung in die Elektrischen Netzwerke und Felder (W 8820)	8	5
Beck/Turschner u. a.	Energiesysteme (W 8804)	30	76
zum Hingst	Elektrische Energieverteilung (W 8812)	24	19
zum Hingst	Elektrische Energieerzeugung (S 8815)	20	32
Beck/Turschner	Leistungmechatronische Systeme (S 8826)	30	48
Turschner	Leistungmechatronische Regelungssysteme (S 8824)	5	4
Jahn (ab WS 2021 Turschner)	Regenerative Elektrische Energietechnik (W 8818)	35	32
Beck	Elektrizitätswirtschaft (S 8819)	65	69
Benger	Batteriesystemtechnik und Brennstoffzellen (W 8816)	13	13
Benger	Sicherheit und Zuverlässigkeit von Batteriesystemen (S 8839)	10	8
Kühl	Regenerative Energiequellen (W 8830)	62	44
Buddenberg	Fossile und regenerative Energieressourcen (W 8831)	15	22
Mecke	Grundstoffindustrie und Energiewende (SS 8837)	8	11
Siemers	Berechnung und Bewertung der Emissionen von nachhaltigen Energiesystemen und Energieprozessen (W 8834)	6	6

Unter Corona-Bedingungen wurden diese Prüfungen online mündlich bzw. schriftlich abgenommen. Mündliche Online-Prüfungen sind auch im Gegensatz zu Online-Klausuren Lehrveranstaltungen, weil eine Interaktion und Kommunikation zwischen Prüfer und Prüfling stattfinden kann und sie im Hinblick auf die notwendige Rechtssicherheit der Beurteilung gerichtsfester sind.

Im Praktikum „Grundlagen der Elektrotechnik I, II“ gab es auch in Corona-Zeiten ein mündliches Vortestat (Quickie) mit einem vorgeschalteten schriftlichen Online-Fragenteil (Moodle) zur Messung der Vorkenntnisse der Praktikumssteilnehmer:innen. Die praktischen Versuche wurden nach den AUA-Regeln durchgeführt. Das bedeutete Einzelexperimente für Studierende, was bei rd. 400 Teilnehmer:innen zu einem immensen Zusatzaufwand führte. Auch hierfür sei dem Laboraufsichtspersonal herzlich gedankt für die intensive Betreuung der Studierenden.

Ein Problem in den ersten Semestern sind die sinkenden Eingangsqualifikationen der Abiturienten. Hier wird seitens des Institutes mit Sondermitteln der Fakultät durch zusätzliche Angebote (Vorkurse, Klausuraufgaben-Übungen in den Vorlesungen, mehr Zeit für die Klausurbearbeitung bei gleichem Schwierigkeitsgrad etc.) entgegen gewirkt. Diese Kurse wurden auch in Corona Zeiten im Jahr 2021 nach der 3G-Regel durchgeführt, um den Studienerfolg zu fördern.

Der Schwerpunkt der IEE-Lehrleistung liegt nach wie vor in den angebotenen Kursen Grundlagen der Elektrotechnik I, II. Folgende Studiengänge der Fakultäten I, II und III nutzten das elektrotechnische Grundlagenangebot, das es mittlerweile in drei Ausprägungen gibt:

- Energie und Rohstoffe (Elektrotechnik für Ingenieure I und II)
- Energietechnologien (Grundlagen der Elektrotechnik I und II)
- Maschinenbau (Grundlagen der Elektrotechnik I und II)
- Materialwissenschaft und Werkstofftechnik (Einführung in die elektrischen Netzwerke und Felder)
- Verfahrenstechnik/Chemieingenieurwesen (Grundlagen der Elektrotechnik I und II)
- Wirtschaftsingenieurwesen (Elektrotechnik für Ingenieurwesen I und II)
- Elektrotechnik (Grundlagen der Elektrotechnik I und II)
- Digital Technologies (Grundlagen der Elektrotechnik I und II)
- Sportingenieurwesen (Elektrotechnik für Ingenieure I und II)

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

Elektrotechnik (BA)

Elektro- und Informationstechnik (MA) (geplant WS 2022/2023)

Maschinenbau, Studienschwerpunkt "Mechatronik"

Energiotechnologien (BA)

Energiesystemtechnik (MA/FH-Absolventen)

Wirtschaftsingenieurwesen, Studienrichtung Rohstoffe und Energie

Energie- und Materialphysik

Die relativ hohen Studierendenzahlen in der Vorlesung Leistungsmechatronische Systeme (30/48) sind auf die Umstellung des Lehrangebotes im Fach zurückzuführen.

Für Labor- Mechatrikanlagen größerer Leistung ($> 10 \text{ kW}$) haben wir den Begriff "Leistungsmechatronik" geprägt und zwar in Analogie zur Elektronik/Leistungselektronik. Leistungsmechatronik enthält als Kerngebiete Leistungselektronik, Antriebstechnik, Regelungstechnik, Elektronik und Technische Informatik; sie ist damit ein Gebiet der (elektrischen) Energiesystemtechnik. Sie unterscheidet sich von der bisherigen Antriebstechnik durch die noch weiter ausgedehnten Gebiete: mathematische Modellbildung, Simulation und Validierung. So ist z. B., wie in einem laufenden Forschungsprojekt, auch die Dynamik der Tiefbohrtechnik-Antriebe und Anwendung der Digitaltechnik inklusive der Bohrgestänge Teil des Gesamtmodells, weil nur durch diese Weiterfassung der Systemgrenzen die Selbsterregungseffekte im Antriebsstrang beherrscht werden können. Dieses neue Forschungsgebiet des IEE betrifft die Tiefbohrtechnik mit dem Teilgebiet SmartDrilling (Tiefbohren mit hohem Bohrvorschub und Standzeiten).

Neben der Leistungsmechatronik gehören die regenerative dezentrale elektrische Energietechnik in umrichter gespeisten Netzen (Micogrid) und die dazugehörigen Speichersysteme mit Elektroenergie-Zugang zu den Arbeitsgebieten des IEE, und zwar in Forschung und Lehre. Das gesamte Arbeitsgebiet wird unter dem Begriff Elektrische Energiespeichersysteme als Teil des grundständigen MA-Studienganges Energiesystemtechnik zusammengefasst. Hierfür ist schwerpunktmäßig die neue Professur für Energiespeichertechnik und -systeme vorgesehen (vgl. Vorwort).

1.2 Übungen, Praktika, Mentoring

Im Berichtszeitraum wurden folgende Übungen und Praktika durchgeführt. Die Rechenübungen fanden durchgängig online statt. Die Praktika wurden in Präsenz unter Einhaltung der 3G und AUA-Regel abgehalten. Die Zahlen geben jeweils die Teilnehmendenzahl lt. StudIP an.

Tabelle 2: Teilnehmerzahl der Übungsangebote des IEE gemäß StudIP-Anmeldungen

		2020	2021
Große Übung	Grundlagen der Elektrotechnik I/II (Reineke/Kreth)	684	655
Tutorien	Grundlagen der Elektrotechnik I/II (Kreth/wiss. Hilfskräfte)	250	222
Übung	Elektrische Energietechnik (Turschner/Lin/Piontek)	30	51
Übung	Regelung Elektrischer Antriebe (Turschner)	10	4
Übung	Leistungsmechatronische Systeme (Turschner)	30	48
Übung	Leistungsmechatronische Regelungssysteme (Turschner)	5	4
Übung	Energieelektronik (C. Klaas)	5	7
Übung	Elektrische Energieerzeugung (Sisik)	20	32
Übung	Einführung in die Elektrischen Netzwerke und Felder (Kreth/Reineke)	8	5
Übung	Regenerative Elektrische Energietechnik (Jahn, ab WS 2021 Turschner)	35	32
Übung	Elektrische Energieverteilung (Tkalcec)	24	19
Übung	Batteriesystemetechnik und Brennstoffzellen (Orazov/Grabow)	13	13
Übung	Sicherheit und Zuverlässigkeit v. Batteriesystemen (Orazov/Grabow)	10	8
Übung	Regenerative Energiequellen (Kühl)	62	44

		2020	2021
Übung	Fossile und regenerative Energieressourcen (Buddenberg)	15	22
Übung	Elektrizitätswirtschaft (A. Klaas)	65	69
Übung	Grundstoffindustrie und Energiewende (Mecke)	8	11
Übung	Berechnung und Bewertung der Emissionen von nachhaltigen Energiesystemen u. Energieprozessen (Siemers)	6	6
Praktika	Grundlagen der Elektrotechnik I/II (Ufkes/wiss. Hilfskräfte)	356	403
Praktikum	Energieelektronik (Piontek/Reineke)	-	2
Praktikum	Elektrische Energiespeicher (Orazov/Grabow)	6	3
Praktikum	Elektrische Maschinen (Turschner/Deblon)	10	5
Praktikum	Regenerative Elektrische Energietechnik (Ufkes/Tkalcec)	10	16
Praktikum	Hochspannungstechnik (Kreth/Klaas)	7	20
Grundpraktikum	Ingenieurwissenschaft im Bachelor Energietechno- logien (Turschner/Deblon/Göken)	7	12
Grundpraktikum	Maschinenbau (Turschner/Deblon/Göken)	-	5
Gemeinschafts- seminar	Gemeinschaftsseminar zur Elektrischen Energie- technik und Energiesystemtechnik (Fries)	6	10

1.3 Seminarvorträge

2020

Anane, Nidhal	Saisonale Wärmespeicher
Bagoglu, Cankat	Entwicklungen in der Elektromobilität
Buchheister, Felix	Technische Entwicklungen in Braunkohlekraftwerken
Höges, Nils	Lithium als Rohstoff für Energiespeicher
Kruse, Ulrike Eike	Herausforderungen der Elektromobilität in der Luft
Mattis, Erik	KWK-Kraftwerke am Beispiel des Küstenkraftwerks K.I.E.L.
Sander, Anastasia	Biogasanlagen und ihre Rolle in der Energiewende
Youssef, Radwa	Geothermie als regenerative Energiequelle

2021

Klocke, Kevin	Die Solarzelle
Ude, Jan-Niklas	Bioenergie in Deutschland
Steingröver, Paul	Energie- und Mobilitätswende im Verkehrssektor
Wachid, Putri	Power-to-Gas
Assad, Nessim	Regenerative Bereitstellung von Wärme für Haushalt und Industrie
Bertram, Nico	Der Lithium-Ionen Kondensator / Hybrid-Ionen Kondensator

1.4 Bachelor- und Masterarbeiten

Bachelorarbeiten

2020

Al-Moayed, Adi	Elektrospeicherheizungen und die Energiewende? Betreuer: Dr. zum Hingst, Prof. Beck, Fries, M. Sc.
Mao, Chengxue	Modellierung eines modernen Müllverbrennungskraftwerks Betreuer: Dr. zum Hingst, Prof. Beck, Fries, M. Sc.
Chafi, Leo	Untersuchung eines solarbetriebenen Microgrids ohne zentrale Regelung mit asymmetrischer Energieerzeugung Betreuer: Dr. zum Hingst, Prof. Beck, Kreth, M. Sc.
Fischer, Lars Henry	Auslegung eines Batterie- und Wasserstoffspeichers für eine netzdienliche Schnellladestation mit PV-Anlage Betreuer: Dr. Bengler, Prof. Beck, Kreth, M. Sc.
Thomas, Kristina	Strukturierter Vergleich der solarthermischen Kraftwerke mit einem Ausblick auf eine klimaneutrale Zukunft Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Beck
Kuhlmann, Matthias	Vernetzung und Industrie 4.0: Evaluierung und Aufbau einer gesamten Anwendung: Von der Sensor- und Functional Safety-Ebene über die visualisierte High-Speed Automatisie- rung bis in die Cloud Betreuer: Prof. Siemers (IEI), Dr. Turschner, Dr. Zander (Hermann Zander GmbH)
Sprengelmeyer, Jonas	Vergleich wissenschaftlicher Methoden zur kontaktlosen Energieübertragung unter besonderer Berücksichtigung der induktiven Kopplung Betreuer: Prof. Beck, Dr. zum Hingst, Tkalec, M. Sc.

- Foresto, Priskila Liane E. M. Minimierung der Treibhausgasemissionen von Bestandsgebäuden durch energetische Sanierung
Betreuer: Dr. zum Hingst, Prof. Beck, Dr. Hashemifarzad
- Meyer, Florian Matthias Initiierung und Charakterisierung von internen Kurzschlüssen in Lithium-Ionen-Batterien mit Fokus auf die optische Post-Abuse-Analyse
Betreuer: Dr. Bengler, Prof. Beck, Grabow, M. Sc.
- Becker, Karl Untersuchung von Mehrachs-PV-Anlagen und Vergleich mit Einachs-PV-Anlagen
Betreuer: Prof. Beck, Dr. zum Hingst, Kreth, M. Sc.
- Schmetz, Benedikt K. Mehrphasige Optimierung, Erweiterung und Automatisierung einer Industrieanlage zur Sortierung und Trennung von Blistern und Küvetten
Betreuer: Prof. Siemers (IEI), Dr. Turschner
- Al-Mahbashi, Hasan A. Y. Untersuchung der Dynamiküberwachung eines Nox-Sensors in einem speziellen leichten Nutzfahrzeug und Optimierung der Softwareseitigen Diagnosestrategie
Betreuer: Prof. Weber (IEVB), Prof. Beck, Dipl.-Ing. Ulrich (IAV)

2021

- Hanse, Hannes Einfluss der Nutgeometrie auf das dynamische Betriebsverhalten fremderregter Synchronmaschinen
Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Beck, C. Klaas, M. Sc., Dr. Okla (Piller)

Dreesch, Meinhard	Vergleich eines neuartigen digitalen Stromzählers mit einem konventionellen Ferraris-Zähler Betreuer: Prof. Beck, Dr. Turschner
Borchert, Jan-Eric	Recherche und Bewertung von Energiemanagementsystemen Betreuer: Dr. zum Hingst, Prof. Beck, Kreth, M. Sc.
Xiang, Jiuzhou	Auslegungsverfahren für Hausbatteriespeicher in Verbindung mit PV-Anlagen Betreuer: Prof. Beck, Dr. zum Hingst, Klaas, A.-K., M. Sc.
Maoua, Ahmed	Optimale Steuerung eines PV-Wechselrichters mit Simulation in MATLAB/Simulink Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Beck
Reichrath, Timo	Vorteile einer Lithium-Batterie im 12 V Bordnetz unter besonderer Berücksichtigung des Motorstarts Betreuer: Dr. Benger, Prof. Wenzl, Dipl.-Ing. Hoh (Johnson Controls)
Kubicki, Alexander	Das zukünftige Energiesystem in Deutschland Betreuer: Dr. zum Hingst, Prof. Beck, A.-K. Klaas, M. Sc.
Cansiz, Yusuf Emin	A Comparison of P, PI and PID Controllers in Pitch Angle Controlling of Variable - Speed Wind Turbines Betreuer: Prof. Bohn (IEI), Dr. Turschner
Litterscheidt, Christian	Abgasreinigung mittels Regenerativer Thermischer Oxidation - Thermodynamische Bilanzierung und Entwurf eines Simulationsmodells einer 3-Turm Anlage mit Ansys Fluent Betreuer: Prof. Fischlschweiger (IEVB), Prof. Beck

Projektarbeiten**2020**

Er, Deniz	Sicherheitskritische Bewertung von Lithium-Ionen-Zellen unter besonderer Berücksichtigung der Zustandsgröße State of Safety Betreuer: Dr. Bengler
Maqwalah, Mohammed	Photovoltaics system design for a Yemeni house Betreuer: Dr. Turschner
Sengül, Düzgün	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung über die Lebenszeit von Speicher-Umrichter-Systemen zur Erbringung von Momentanreserve unter besonderer Berücksichtigung der Lithium-Ionen-Batteriespeichersysteme Betreuer: Dr. Bengler, Dipl.-Ing. Deblon
Lerch, Kathrin Susanne	Virtual Inertia Control for Frequency Stability in a Three-Area Power System Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Mitani (Japan)
Alidou, Nourou	Simulation eines 3-Level-Wechselrichters mit unterschiedlichen Steuer- und Regelverfahren Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Beck
You, Jing	Energiemanagementsystem eines Haushalts unter Einbeziehung von Prognoseunsicherheiten Betreuer: Dr. zum Hingst, Fries, M. Sc.

2021

Al Hammal, Amjad Al-Badani, Yaser	Umstieg von Dieseltransportern auf Elektrotransporter bei Umzug & Möbeltaxi Star Betreuer: Dr. Turschner
Hartleb, Michael	Simulation der Verteilung von physikalischen Größen in Lithium-Ionen-Batterien auf Basis elektrischer Netzwerke Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Beck, Dipl.-Ing. Oberland
Stenger, Simon	Simulation eines dreiphasigen Phasenstromregler Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Beck
Schmidt, Daniel	Aufbau und Regelung eines elektrischen Antriebssystems am Beispiel eines Windgetriebeprüfstandes Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Beck
Nikolai, Lukas Georg	Modellierung und Untersuchung einer Vehicle-to-Home- Anwendung an Einfamilienhäusern mit stationärem Speicher und PV-Anlage Betreuer: Dr. zum Hingst, Prof. Beck, Kreth, M. Sc.
Mhaidly, Mahmoud Jaradat, Qusai	Konzeptbewertung von neuartigen Methoden zu internen Kurzschlussenergie bei Lithium-Ionen-Pouchzellen Betreuer: Dr. Benger, Grabow, M. Sc.

Jansen, Marcel	Entwicklung eines Leitfadens zum Aufbau von Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge im öffentlichen und halböffentlichen Bereich Betreuer: Dr. Benger, Prof. Beck, Dipl.-Ing. Salaschur (Volkswagen AG), Kreth, M. Sc.
Zhu, Xiaoyu	Vom Konzept zum Geschäftsmodell - Ermittlung und Analyse der offenen wirtschaftlichen und rechtlichen Fragen des Vehicle-to-Grid-Konzepts Betreuer: Prof. Beck, Prof. Schwindt (WiWi), Kreth, M. Sc.
Peng, Zhiyuan	Modellierung, Regelung und Simulation von Synchronverter Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Beck
Keßler, Fabian	Evaluation der Energieoptimierung eines hoch elektrifizierten Quartiers mit Berücksichtigung des Netzzustands Betreuer: Dr. zum Hingst, Prof. Beck, Fries, M. Sc.
Weiß, Jennifer Annabell	Vermessung einer elektrischen Hochleistungsmaschine Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Beck, Kremer, M. Eng. (John Deere European Technology Innovation Center)
Yanga Mbemo, Yanick	Entwurf eines Proportional-Resonanz-Reglers für einen Einphasenwechselrichter Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Beck
Basse, Jannik	Weiterentwicklung des Elektromobilitätskonzepts von Continental am Standort Regensburg Betreuer: Dr. Benger, Prof. Beck, Dr. Fuchs (Continental), Kreth, M. Sc.

2021

- Maqwalah, Mohammed The breaking of the O-H bond, both strong and weak, in the presence of a catalyst by laser excitation to ensure Hydrogen Energy
Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Beck
- Wirtz, Sven Die Rolle von Wärmenetzen in der Transformation des Energiesystems Deutschland
Betreuer: Prof. Buddenberg, Prof. Beck
- Er, Deniz Modellierung eines Lithium-Ionen-Moduls zur Detektion sicherheitskritischer Zellzustände
Betreuer: Dr. Bengler, Prof. Wenz, Klink, M. Sc., Orazov, M. Sc.
- Pollmanns, Arno Autarke Energieversorgung einer Kleinstadt durch regenerative Energien
Betreuer: Dr. zum Hingst, Prof. Schenk-Mathes (WiWi), A.-K. Klaas, M. Sc.
- Hartmann, Frederik Substitution von Blei-Säure-Batterien durch Lithium-Ionen-Batterien für statische USV-Anlagen unter Berücksichtigung technischer, wirtschaftlicher und ökologischer Aspekte
Betreuer: Dr. Bengler, Prof. Wenzl
- Tillmanns, Alexander W. Theoretischer Vergleich unterschiedlicher Strangwechsellrichter-Konzepte für die Verwendung in Photovoltaikfreiflächenanlagen
Betreuer: Prof. Beck, Dr. zum Hingst

- Al-Badani, Yaser S. K. Studie der Herausforderungen der elektrischen Energieversorgung in Jemen und die Nutzung von regenerativen Energiequellen unter besonderer Berücksichtigung der Solar-energie
Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Beck
- Al Hammal, Amjad Strompreis-Zeitreihen in Fundamentalmodellen (SCOPE)
Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Beck, Schmitz, M. Sc. (Fraunhofer), Kopsike, M. Sc. (Fraunhofer)
- Geißler, Pascal Entwicklung eines Regelungskonzeptes für ein umrichterbasier-tes System zur unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV)
Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Beck
- Alidou, Nourou Alternative Leistungsregelung eines Wechselrichters mit Phasenstromregler und Simulation in Matlab/Simulink
Betreuer: Dr. Turschner, Prof. Siemers (IEI)
- Baedeker, Konstantin Entwurf und Simulation eines modellprädiktiven Reglers (MPC) einer PV-Wärmepumpenanlage mit Trinkwarmwasserspeicher in einem Einfamilienhaus
Betreuer: Dr. zum Hingst, Prof. Beck, A.-K. Klaas, M. Sc.
- Schmidt, Daniel Berechnung des Autarkiegrads einer Elektrospeicherheizung in Verbindung mit einer PV-Anlage
Betreuer: Dr. zum Hingst, Prof. Beck, A.-K. Klaas, M. Sc.
- Hartleb, Michael Untersuchung des Einflusses der anodischen Ruhespannungskennlinie auf die orts aufgelöste Simulation des dynamischen Verhaltens einer Lithium-Ionen-Zelle
Betreuer: Dr. Benger, Prof. Wenzl, Dipl.-Ing. Oberland
- You, Jing Vergleich einer dezentralen und zentralen Energieversorgung eines Quartiers mit PV
Betreuer: Dr. zum Hingst, Prof. Beck, A.-K. Klaas, M. Sc.

- Hebenbrock, André Development and experimental validation of a combined electric and thermal observer model for application-oriented fault detection on EV-sized modules
Betreuer: Prof. Kunz (ICVT), Prof. Beck, Klink, M. Sc.
- He, Xuwen Design of a Complementary Renewable Energy Plant under Uncertainty
Betreuer: Prof. Beck, Dr. zum Hingst, Cramer, M. Sc. (Forschungszentrum Jülich GmbH)

2 Veröffentlichungen, Dissertationen

2.1 Zeitschriften- und Tagungsaufsätze

Zeitschriften- und Tagungsaufsätze, Bücher

2020

- Lerch, K. S. Frequency Stability Assessment on Virtual Inertia Control Strategy
Kerdphol, T. in Connected and Islanded Multi-Area Power Systems
Mitani, Y. International Conference on Environment and Electrical Engineering
Turschner, D. EEEIC2020, (09. – 12. Juni 2020)
...
- Oberland, A. The Effect of Fire Protection Layers on the Safety Behavior of
High Performance Lithium Ion Modules
Poster:
https://www.researchgate.net/publication/343474194_The_Effect_of_Fire_Proteciton_Layers_on_the_Safety_Behavior_of_High_Performance_Lithium_Ion_Modules, (06. August 2020)

- Klink, J. Thermal fault detection by changes in electrical behavior in lithium-ion cells
Grabow, J. Journal of Power Sources,
... <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775321001166>, (Januar 2021)
Beck, H.-P.
- Debon, F. Implementation and Evaluation of a High-Performance Battery
Reineke, S. Converter System for Providing Synthetic Inertia at Distribution
Werther, B. Network Level
Turschner, D. Posterbeitrag: EPE'21 ECCE Europe Ghent (06. - 10. September
Benger, R. 2021)
Beck, H.-P.
- Klaas, A.-K. A MILP Model for Revenue Optimization of a Compressed Air Energy
Beck, H.-P. Storage Plant with Electrolysis
https://dokumente.ub.tu-clausthal.de/receive/clausthal_mods_00001885 oder
<https://www.mdpi.com/1996-1073/14/20/6803> (Oktober 2021)
- Ohrdes, T. Wind-Solar-Wärmepumpenquartiere – Praxiserfahrungen und
... Planungshilfen für den erneuerbaren Betrieb von
Klaas, A.-K. Wärmepumpenquartieren mit minimiertem Primärenergiebedarf
Spielmann, V. https://dokumente.ub.tu-clausthal.de/receive/clausthal_mods_00001887 oder
Wehrmann, E.-A. <https://isfh.de/publikationen/berichte/> (August 2021)

Dissertationen:

Im Berichtszeitraum wurden vier Promotionen abgeschlossen, dies ist ein guter Mittelwert (2/a) bezogen auf die Zahlen der TUC ($\approx 1/a$). Die Zahlen im IEE könnten noch höher sein, leider schaffen aber 1/3 der Assistent:innen ihren Promotionsabschluss nicht während der Universitätszeit. Meistens sind hierfür persönliche Gründe ausschlaggebend.

2020

- Haslbeck, Matthias Beeinflussung der Blindleistungsbilanz von Mittelspannungsnetzen durch Steuerung von Blindleistungsquellen am Beispiel betrieblicher Kompensationsanlagen
Referenten: Prof. Beck, Prof. Brückl (OTH Regensburg)
- Kaiser, Friederike Steady State and Time Dependent Compressed Air Energy Storage Model Validated with Huntorf Operational Data and Investigations of Hydrogen Options for a Sustainable Energy Supply
Referenten: Prof. Weber (IEVB), Prof. Beck, Dr.-Ing. Mancini (IEVB)
- Tchoupou Lando, Eric Entwicklung eines ereignisbasierten Lebensdauermodells und Validierung der linearen Schadensakkulationshypothese für NMC/Graphit Lithium-Ionen Zellen
Referenten: Prof. Beck, Prof. Wenzl

2021

- Werther, Benajmin Stabilitätsanalyse zur Bereitstellung von Momentanreserve am starren Netz durch einen Verbund Virtueller Synchronmaschinen
Referenten: Prof. Beck, Prof. Timme (TU Dresden)

2.2 Vorträge / Seminare

- Grabow, J.
Klink, J.
Orazov, N.
Benger, R.
.
.
Early Thermal Runaway detection in lithium ion batteries by using of a coupled electrical - thermal plausibility model
Poster:https://www.researchgate.net/publication/341326451_Early_Thermal_Runaway_detection_in_lithium_ion_batteries_by_using_of_a_coupled_electrical_-thermal_plausibility_model oder <https://battery-power.online/poster/80/>
(12.05.2020)

2.3 Veranstaltungen, Exkursionen, Gastaufenthalte

Veranstaltungen:

Wegen der Corona-Pandemie fanden leider keine Veranstaltungen statt.

Exkursionen:

Wegen der Corona-Pandemie fanden leider keine Veranstaltungen statt.

Gastaufenthalte:

Wegen der Corona-Pandemie fanden leider keine Veranstaltungen statt.

3 Forschungsarbeiten

3.1 Geförderte Forschungsvorhaben

Im Berichtszeitraum wurden folgende geförderte Forschungsvorhaben bearbeitet:

1. BMWi über Projektträger Jülich
 Wind-Solar-Wärmepumpen-Quartier - Erneuerbar betriebene Wärmepumpen zur
 Minimierung des Primärenergiebedarfs
 Teilvorhaben: Elektrische Verteilnetze für Wärmepumpenquartiere
 Kurzbezeichnung: WPuQ
 Bearbeiter: Dr. Wehrmann, Dipl.-Ing. Spielmann

2. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
 ZIM
 Kurzbezeichnung: Magnet-Rad
 Bearbeiter: Dr. Turschner

3. BMBF über Projektträger Jülich
Kollektive Nichtlineare Dynamik Komplexer Stromnetze: Dynamik, Statistik und
Netzsicherheit
Kurzbezeichnung: CoNDYNetII
Bearbeiter: Dr. Turschner

4. BMWi über PTJ
Netzstützung und Systemdienstleistungserbringung durch eine Industriezelle mit
Inselnetzfähigkeit und Erneuerbaren Energien
Teilvorhaben: Hochdynamische Stabilitätsbetrachtungen der transienten Vorgänge im
Inselnetzbetrieb
Kurzbezeichnung: INZELL
Bearbeiter: Dr. Turschner, Dipl.-Ing. Ufkes

5. MWK über Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrttechnik
H2-ReNoWe - Neue Nutzungsperspektiven für das Druckluftspeicherwerk Huntorf
durch Erforschung neuer Betriebskonzepte unter Einbindung einer Wasserstoffnutzungs-
strategie
Kurzbezeichnung: ReNoWe
Bearbeiter: Prof. Beck, A.-K. Klaas, M. Sc., C. Klaas, M. Sc., Breuer, M. Sc. (CUTEC)

3.2 Projektübersichten

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

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

Das folgende Bild 1 soll die diesbezügliche neue Institutsstruktur erläutern.

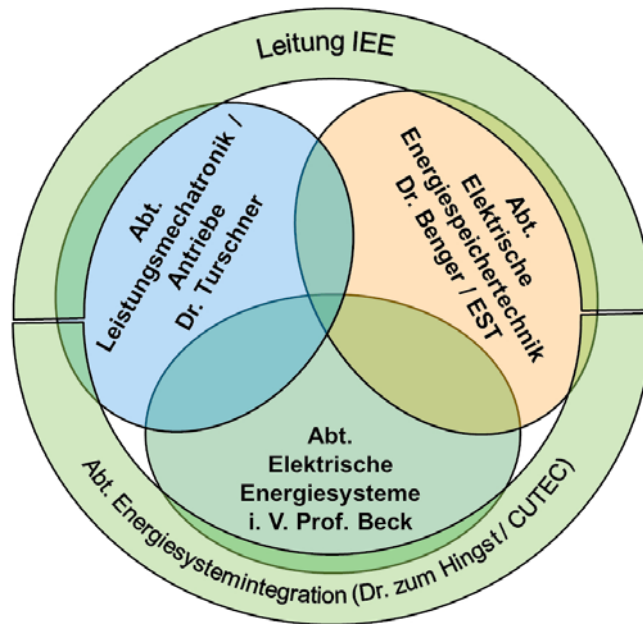


Bild 1: Neue Organisationsstruktur des IEE bis zur Wiederbesetzung der Kernprofessur Elektrotechnik (Nachfolge Beck)

Projektübersicht

Abteilung Dezentrale Energiesysteme

Abteilungsleiter: NN, Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Beck
Tel.: +49-5323-72-2570
E-Mail: sekretariat@iee.tu-clausthal.de

Ziel der Forschungsarbeiten in dieser Abteilung ist die Unterstützung der Transformation des deutschen Energiesystems hin zur Nachhaltigkeit

Aktuelle Projekte:

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

Die Energiewende benötigt Speicher im elektrischen Netz, um die Fluktuationen, hervorgerufen durch die regenerative Erzeugung, auszugleichen und möglichst in jedem Augenblick Angebot und Nachfrage an elektrischer Energie in Übereinstimmung zu bringen, um so die Netzfrequenzschwankungen zu vermeiden. Der IEE-Ansatz zur Lösung dieses Problems besteht in der Entwicklung von Konzepten für sog. Regenerative-Speicherkraftwerke. Ein Vertreter dieser Entwicklungslinie ist das seit 40 Jahren bestehende Druckluftspeicherkraftwerk Huntorf, das zum Ausgleich der Energieverluste Erdgas für seinen Betrieb benötigt. Zur Transformation zum regenerativen Speicherkraftwerk soll das untertage gespeicherte Erdgas durch den im Kraftwerk erzeugten Wasserstoff ersetzt werden, wozu ein von der Kraftwerkseinsatzplanung gesteuerter Großelektrolyseur integriert wird. Im Projekt wird mittels Simulationsrechnungen untersucht, wie beide Betriebsmittel für Erzeugungs- und Speicherbetrieb dimensioniert und betrieben werden können, um eine Wirtschaftlichkeit zu erreichen.

Bearbeiter: Ann-Kathrin Klaas, M. Sc.

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. Roman Weber

Teilprojektleiter: Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Beck

- **H2-ReNoWe - Neue Nutzungsperspektiven für das Druckluftspeicherkraftwerk Huntorf durch Erforschung neuer Betriebskonzepte unter Einbindung einer Wasserstoffnutzungsstrategie**

Das im vorangegangenen Projekt entwickelte Konzept für regenerative Speicherkraftwerke zur Residuallastglättung und Netzfrequenzstabilisierung soll am Beispiel vom KW Huntorf in Zusammenarbeit mit dem Kraftwerksbetreiber Uniper soweit ertüchtigt werden, dass die notwendigen Komponenten wie Unterspeicher, Elektrolyseur mit kraftwerksdienlicher Einspeisung (≤ 300 MW) und H₂-Druckluftgasturbine mit Generator (400 MW) ausgelegt und das initiierte Betriebsverhalten der neuen Kraftwerksgeneration (4.0) studiert werden kann. Es ist geplant, die Umbau- und Ertüchtigungsmaßnahmen seitens der Fa. Uniper zeitnah zu realisieren.

Bearbeiter: Simon Breuer, M. Sc.; Ann-Kathrin Klaas, M. Sc.; Christoph Klaas, M. Sc.
Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Beck

- **Wind-Solar-Wärmepumpen-Quartier - Erneuerbare betriebene Wärmepumpen zur Minimierung des Primärenergiebedarfs (WpuQ)**

Teilvorhaben: Elektrische Verteilnetze für Wärmepumpenquartiere

Das Ziel der Forschungsarbeiten zu diesem Projekt ist die Untersuchung des Einflusses elektrischer und thermischer Speicherkapazitäten auf die Belastung des Niederspannungsnetzes in Wärmepumpen-Wohnquartieren. Zu diesem Zweck wird ein kombiniertes Simulationsmodell des thermischen und elektrischen Systems in Wohngebäuden als gemischtes ganzzahlig lineares Optimierungsproblem implementiert, dessen Energiemanagement, operationalisiert als Zielfunktionen die zur Entlastung des umgebenden Netzes, die Steigerung des elektrischen Vorortverbrauches sowie einen effizienten Wärmepumpenbetrieb zum Ziel hat.

Bearbeiter: Ann-Kathrin Klaas, M. Sc.; Dipl.-Ing. Verena Spielmann
Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Beck

- **Transformation des Hüttenwerks der Salzgitter Flachstahl GmbH im Rahmen des Projekts SALCOS®**

Das Projekt SALCOS betrifft die Transformation der Stahlproduktion mittels Hochofen hin zu einer CO₂-armen Variante mittels Direktreduktionsanlage und Elektrolichtbogenofen. Zur Direktreduktion des Eisenerzes wird "grüner" Wasserstoff benötigt, der im integrierten Hüttenwerk mittels Elektrolyse prozessnah erzeugt werden soll. Das IEE-

Projektübersicht

Teilprojekt in Kooperation mit der Salzgitter-Flachstahl GmbH betrifft die Erstellung einer Energiesystemmodellierung des zukünftigen Hüttenwerkes. Das Projekt wird in drei Fragestellungen aufgeteilt.

- a) Modellierung des Istzustandes
- b) Modellierung der ersten Ausbaustufe mit 5 % Wasserstoff (H₂-Elektrolyse) und 95 % Erdgas zur Befeuerung des Hochofens
- c) Endausbau SALCOS (ohne Hochofen mit 100 % H₂)

Ziel ist ein "atmender", d. h. flexibler CO₂-armer Stahlproduktionsprozess auf Basis regenerativer elektrischer Energie.

Bearbeiter: Nils Kreth, M. Sc.

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Beck

IEE

Projekt: Huntorf 2020

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

Problem: Im Zuge der Energiewende soll der Strom zukünftig vorwiegend regenerativ erzeugt werden, wodurch die Stromeinspeisung im Gegensatz zum konventionellen Kraftwerkspark stark volatil wird. Durch diese natürliche Volatilität werden flexibel regelbare Kraftwerke, Regelernergie und Stromspeicher zunehmend wichtiger für den sicheren und stabilen Netzbetrieb. Bereits 1978 wurde das Druckluftspeicherkraftwerk Huntorf in Betrieb genommen, um das Norddeutsche Stromnetz abzusichern. Dieses Kraftwerk hat eine schnelle Reaktionszeit und kann 320 MW Leistung beim Ausspeichern über etwa acht Stunden abrufen. Im Vergleich zu modernen Gas- und-Dampf-Kraftwerken (GuD) wird der für den Prozess notwendige Brennstoff Erdgas hierbei mit einem Brennstoffwirkungsgrad von bis zu 65 % deutlich effizienter eingesetzt. Trotz dieser positiven und auch für die Energiewende entscheidenden Eigenschaften des Druckluftspeicherkraftwerks ist die Anzahl der Betriebsstunden in den 2010er Jahren aus rein wirtschaftlichen Gründen auf unter hundert Stunden pro Jahr gefallen.

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

Stand der Technik: Das Druckluftspeicherkraftwerk Huntorf ist einzigartig in Europa. Das Konzept basiert auf einem offenen Gasprozess, wobei Kompression und Entspannung der Verbrennungsluft zeitlich entkoppelt sind. Im Kompressorbetrieb wird bei elektrischer Nennleistung von 68 MW Umgebungsluft auf bis zu 70 bar verdichtet und anschließend in zwei 310.000 m³ fassenden untertägigen Salzkavernen gespeichert. Im Generatorbetrieb wird die gespeicherte Druckluft in der Brennkammer des Kraftwerks mit Erdgas erwärmt und anschließend bei einer elektrischen Nennleistung von 320 MW auf Umgebungsdruck entspannt.

Der ursprüngliche Zweck des Speicherkraftwerks Huntorf bestand darin, durch die Komprimierung der Verbrennungsluft überschüssige Energie von unflexiblen, konventionellen Kraftwerken in Schwachlastzeiten zu speichern und in Hochlastzeiten ins Netz zurück zu speisen. Seit der Inbetriebnahme wurde Huntorf jedoch vor allem für die Bereitstellung von Minutenreserve verwendet. In den letzten Jahren konnte die Anlage allerdings damit nur wenig Betriebsstunden pro Jahr aufweisen. Aus diesem Grund werden im Forschungsprojekt Huntorf 2020 neben einem Konzept zur Dekarbonisierung alternative markt- und netzdienliche Einsatzmodelle entwickelt. Abbildung 1 zeigt ein Foto und das Blockschalbild des Kraftwerks Huntorf inkl. der Erweiterung um eine Elektrolyse und einen Wasserstoff-Kavernenspeicher.

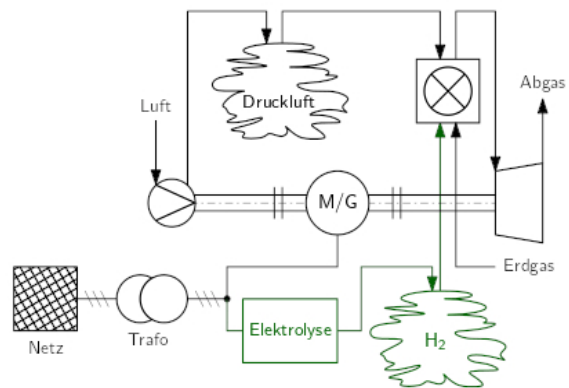


Abbildung 1: Foto (© Uniper) und Blockschalbild des Druckluftspeicherkraftwerks Huntorf mit der Erweiterung um Elektrolyse und Wasserstoff-Kavernenspeicher in grün

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

Das Teilvorhaben des IEE umfasste die dritte Betrachtungsebene, in der die makroskopische Betrachtung des Druckluftspeicherkraftwerks Huntorf und der im Projekt erarbeiteten Kon-

Projekt: Huntorf 2020

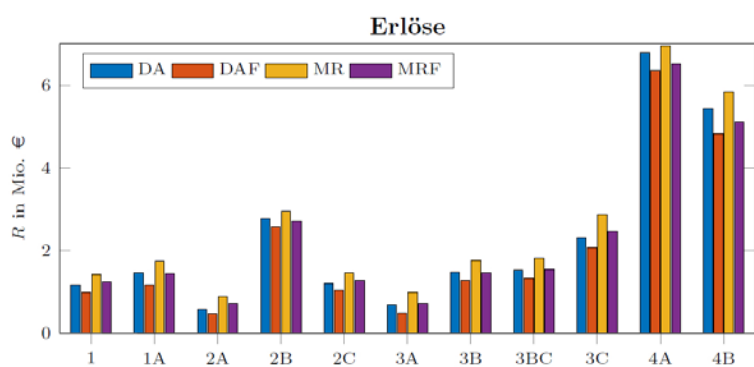
zeptvarianten innerhalb des regionalen Stromnetzes erfolgte. Der Schwerpunkt lag dabei auf der Bilanzierungsebene Stromnetz, wobei auch Stoffströme und Speicherfüllstände einbezogen wurden. Dabei wurde das Energiesystem inklusive verschiedener Wasserstofferzeugungseinheiten unter Berücksichtigung zukünftiger Entwicklungen (Energieszenarien am Standort) hin zu höherem Anteil an Erzeugern erneuerbarer Energie, wie Windkraft und Photovoltaik, berücksichtigt.

Projektstand: Betrachtungsebene 1 lieferte umfangreiche Erkenntnisse hinsichtlich der teilweisen oder vollständigen Brennstoffsubstitution von Erdgas durch Wasserstoff im Druckluftspeicherkraftwerk Huntorf sowohl energetisch als auch hinsichtlich des Emissionsverhaltens. Die Simulation zeigte eine Machbarkeit der Substitution bis zu einem Anteil von 60 % Wasserstoff im Brennstoff ohne signifikante Erhöhung der Instabilität oder der Schadstoffemissionen, Betrachtungsebene 2 lieferte wichtige Erkenntnis zu den Optionen der Umgestaltung des Kraftwerksprozesses und ist durch Messungen validiert. Das Modell wurde sowohl stationär als auch dynamisch betrachtet und ermöglicht die Berechnung von verschiedenen Wirkungsgraden des Kraftwerks.

Die Betriebseigenschaften aus den Betrachtungsebenen 1 und 2 wurden in der obersten Betrachtungsebene, die das regionale Energiesystem am Standort Huntorf darstellt, verwendet. Das Druckluftspeicherkraftwerk kann am Day-Ahead- und Regelleistungsmarkt teilnehmen oder alternativ durch die Glättung der regionalen Residuallast netzdienlich betrieben werden. Um verschiedene Anlagenerweiterungen und Anwendungsszenarien zu vergleichen wurde ein gemischt-ganzzahliges lineares Optimierungsmodell des Kraftwerks entwickelt. Dieses bildet das derzeitige Kraftwerkskonzept und Konzeptvarianten, wie erhöhte Speicherkapazität, bessere Brennstoffeffizienz durch Rekuperation und Teillastbetrieb durch kalte Entspannung, ab. Zusätzlich wird das Kraftwerkskonzept um ein Elektrolyse-Modell erweitert, um die Erzeugung von Wasserstoff mittels Elektrolyse und die lokale Nutzung im Druckluftspeicherkraftwerk abzubilden.

Die jährlichen Erlöse der marktorientierten Anwendungsfälle sind in Abbildung 2 dargestellt und liegen zwischen ca. 0,5 Mio. € und 7 Mio. €. Die Erlöse berechnen sich aus dem Gewinn, der durch den Verkauf von Energie am Day-Ahead-Markt oder der Teilnahme am Minutenreservemarkt erzielt wird, abzüglich der Kosten für den Einkauf von Energie und Brennstoff sowie der Startkosten. Ein Retrofit des Kraftwerks (erhöhte Ein- und Ausspeicherleistung, erhöhte Speicherkapazität und Rekuperation) verspricht bei gleichzeitiger Teilnahme am Day-Ahead- und Minutenreservemarkt die höchsten Jahreserlöse. Dabei wirkt sich die Verbesserung der Brennstoffeffizienz durch Rekuperation stärker auf die Erlöse aus als die Erhöhung der Spei-

cherkapazität und Leistung. Die jährlichen Erlöse der Anlagenvarianten mit Elektrolyse hängen stark von der Nennleistung des Elektrolyseurs ab. Die zusätzliche Teilnahme am Minutenreservemarkt bringt nur wenige zusätzliche Erlöse in Vergleich zur alleinigen Teilnahme am Day-Ahead-Markt.



1	Kraftwerk Huntorf
1A	Höhere Speicherkapazität
2A	Wasserstoffverbrennung (Einkauf über festen Wasserstoffpreis)
2B	Rekuperator
2C	Teillastbetrieb (kalte Verbrennung) möglich
3A	Wasserstoffverbrennung in HD-Brennkammer, Elektrolyse mit 20 MW
3B	Wasserstoffverbrennung in HD-Brennkammer, Elektrolyse mit 120 MW
3C	Wasserstoffverbrennung in HD-Brennkammer, Elektrolyse mit 470 MW
4A	Retrofit

Abbildung 2: Durchschnittliche jährliche Erlöse für Anwendungsfälle DA (Teilnahme am Day-Ahead-Markt), DAP (Teilnahme am Day-Ahead-Markt mit rollierender Planung) MR (Teilnahme am Day-Ahead- und Minutenreserve-Markt) und MRP (Teilnahme am Day Ahead- und Minutenreserve-Markt mit rollierender Planung) für verschiedene Anlagenvarianten

Alternativ kann das Kraftwerk netzdienlich betrieben werden, indem die Spitzenlastdifferenz der Residuallast minimiert und überschüssige erneuerbare Energie gespeichert wird. Die netzdienlichen Anwendungsfälle umfassen sowohl die Minimierung der Spitzenlastdifferenz als auch die Maximierung der gespeicherten Energie im Kompressorbetrieb als Ziel der Optimierung. Die Spitzenlastdifferenz kann bei aktueller EE-Einspeisung zwischen 9 und 19 % mit Anlagenvariante 1 reduziert werden, während mit Anlagenvariante 4B eine Reduktion von 32 bis 45 % möglich ist. Bei Anlagenvarianten mit Elektrolyse hängt die Spitzenlastdifferenz nicht nur von der Nennleistung ab, sondern auch von der Zeitreihe der Residuallast und davon, ob der Speicher in dem Moment, in dem die Spitzenlast ausgeglichen werden soll, vollständig geladen oder entladen ist. Die Menge der gespeicherten überschüssigen Energie variiert zwischen 189 und

658 GWh pro Jahr. Wird davon ausgegangen, dass die Versorgung von Niedersachsen zu 100 % aus erneuerbaren Energien gedeckt wird, kann Huntorf jährlich zwischen 463 und 2654 GWh speichern.

Neben dem mikro- und makroökonomischen Betrieb auf dem Day-Ahead- und Minutenreservemarkt sowie der Residuallastglättung kann das Kraftwerk in Huntorf Systemdienstleistungen wie Frequenzhaltung (im Kompressor- und Generatorbetrieb), Bereitstellung von Blindleistung und Schwarzstartkapazität anbieten. Mit der kontinuierlichen Stilllegung thermischer Kraftwerke, vor allem in den höheren Spannungsebenen, werden die Anbieter dieser Systemdienstleistungen im Verbundnetz knapper. Das Druckluftspeicherkraftwerk Huntorf kann weiterhin wichtige Systemdienstleistungen erbringen und bietet gleichzeitig neue netzdienliche und marktorientierte Betriebsweisen mit geringen bis keinen CO₂-Emissionen. Das Speicherkraftwerk Huntorf bietet außerdem große Vorteile hinsichtlich Nennleistung, Speicherkapazität und der hohen Spannungsebene gegenüber anderen Speichertechnologien, insbesondere in Kombination mit einem Hochleistungselektrolyseur und einer Salzkaverne zur Wasserstoffspeicherung. Die Weiterentwicklung des Kraftwerksstandorts Huntorf sowie die Einbindung in eine lokale Wasserstoffstrategie werden im Projekt H₂-ReNoWe am IEE weiter untersucht.

- Publikationen:**
- [1] Fries, A.-K. Kaiser, F. Beck, H.-P., Weber, R.: Huntorf 2020 - Improvement of Flexibility and Efficiency of a Compressed Air Energy Storage Plant based on Synthetic Hydrogen, Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems (NEIS), Hamburg, (2018)
 - [2] Fries, A.-K., Wehrmann, E.-A., Beck, H.-P.: Einsatzoptimierung des Druckluftspeicherkraftwerks Huntorf am Day-Ahead-Markt, Tagungsband: Kraftwerkstechnik 2019 Power Plant Technology, SAXONIA Verlag, ISBN 978-3-934409-93-4, (2019)
 - [3] Klaas, A.-K.; Beck, H.-P.: A MILP Model for Revenue Optimization of a Compressed Air Energy Storage Plant with Electrolysis. *Energies* 2021, 14, 6803. DOI: 10.3390/en14206803
 - [4] Weber, R., Beck, H.-P., Klaas, A.-K., Mancini, M., Krüger, U., Schwabauer, A., & Wehrmann, E.-A. (2021). Huntorf 2020 - Technologieentwicklung und Effizienzgewinn durch Neu-Konzipierung des Gesamtprozesses Druckluftspeicherkraftwerk Huntorf mit regenerativ erzeugtem Wasserstoff: Berichtszeitraum: 01.01.2018 bis 31.12.2020. Abschlussbericht. Technische Universität Clausthal.
-

- Projektpartner:**
- Uniper Kraftwerke GmbH
 - Forschungszentrum Energiespeichertechnologien der TU Clausthal,
vertreten durch:
 - Institut für Energieverfahrenstechnik und Brennstofftechnik
 - Institut für elektrische Energietechnik und Energiesysteme
- Projektlaufzeit:** 01.01.2018 - 31.12.2019 (verlängert bis 31.12.2020)
- Gefördert durch:** Das Projekt wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert.
- Bearbeiter:** Ann-Kathrin Klaas, M. Sc. (Tel.: 72-2593)
ann-kathrin.klaas@tu-clausthal.de
- Projektleiter:** Prof. Dr.-Ing. Roman Weber
info@ievb.tu-clausthal.de
- Teilprojektleiter** Prof. Dr.-Ing. H.-P. Beck (Tel.: 72-2570)
(Elektrischer Teil): sekretariat@iee.tu-clausthal.de

Projekt: H₂-ReNoWe – Neue Nutzungsperspektiven für das Druckluftspeicherwerk Huntorf durch Erforschung neuer Betriebskonzepte unter Einbindung einer Wasserstoffnutzungsstrategie

Problem: Die Energiewende, die den steten Ausbau erneuerbarer Energien und die Elektrifizierung der Sektoren Wärme, Verkehr und Industrie vorantreibt, führt zu einem vermehrten Bedarf an Stromspeichern. Einerseits werden CO₂-emissionsfreie Alternativen für die Regelleistungsbereitstellung benötigt, andererseits nehmen vor allem Langzeitspeicher aufgrund der reduzierten Kraftwerksreserven im mittel- und langfristigen Kontext an Bedeutung zu. Schon zum jetzigen Zeitpunkt können Speicherkraftwerke zur Integration von erneuerbaren Energien und zur Minimierung der CO₂-Emissionen beitragen.

Ziel: Ziel des Vorhabens ist die Weiterentwicklung des Kraftwerksstandorts Huntorf zu einem H₂-Speicherkraftwerk sowie die Konzeptionierung einer neuen, effizienten, hochflexiblen, CO₂-emissionsfreien Speicherkraftwerksgeneration basierend auf den Erkenntnissen der vorangegangenen Forschungsarbeiten zum bestehenden Kraftwerk in Huntorf. Die Entwicklung dieses Konzepts ist eng verzahnt mit der Entwicklung einer Wasserstoffstrategie für die Region Nord-West-Niedersachsen ausgehend vom Kraftwerksstandort Huntorf als Nukleus der zukünftigen Wasserstoffinfrastruktur.

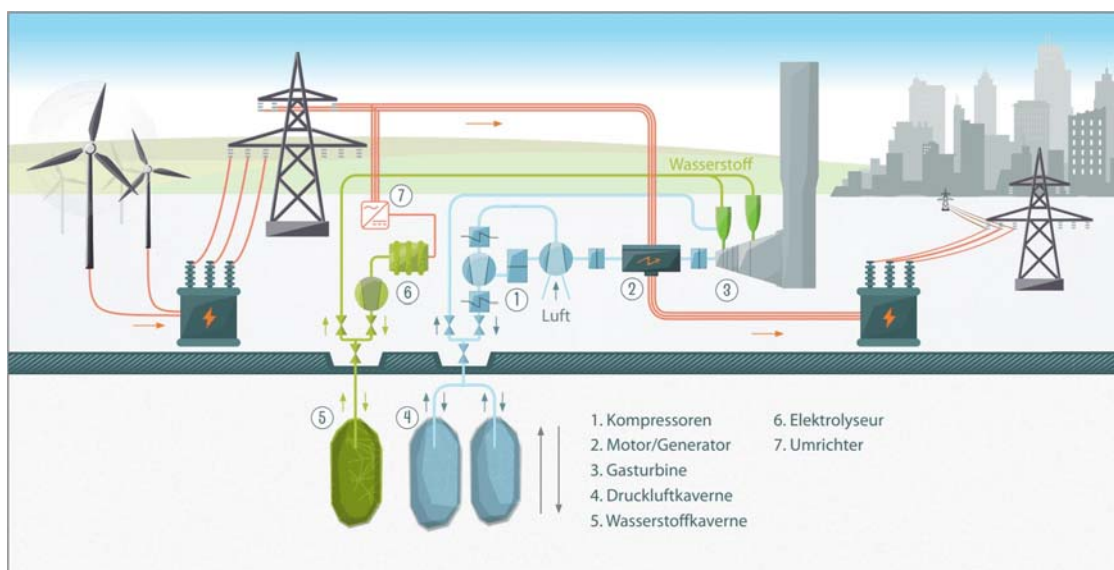


Abbildung 1: Übersicht des angestrebten Kraftwerkskonzepts für ein H₂-Druckluft-Speicherkraftwerk am Standort Huntorf

Das angestrebte Kraftwerkskonzept für das H₂-Druckluft-Speicherkraftwerk am Standort Huntorf ist in Abbildung 1 dargestellt. Erneuerbare Energien aus Wind und Sonneneinstrahlung werden über das Höchstspannungsnetz an den Standort Huntorf geleitet. Dort wird neben der Druckluft mittels Elektrolyse Wasserstoff erzeugt und in einer H₂-Kaverne am Standort gespeichert. Der Wasserstoff dient als Substitut für die Erwärmung der aus einer anderen Kaverne entnommenen Druckluft, um die vorhandene Gasturbine anzutreiben und elektrische Energie ins Verbundnetz einzuspeisen.

Stand der Technik: Für die Überführung des Druckluftspeicherkraftwerks Huntorf in ein flexibles, regeneratives Speicherkraftwerk müssen vielseitige Fragestellungen beantwortet werden. Kraftwerkstechnisch gehören dazu die Wasserstoffherzeugung durch ein Elektrolysesystem, die Wasserstoffspeicherung in einer Salzkaverne und die Wasserstoffverbrennung in den bestehenden Brennkammern. Deutschlandweit gibt es derzeit zahlreiche Forschungsansätze, die die allgemeinen Aspekte dieser Thematiken untersuchen. In diesem Forschungsvorhaben werden die Thematiken anwendungsnah anhand des einzigen Druckluftspeicherkraftwerks in Europa erforscht.

Lösungsweg: Im Hinblick auf die beschriebenen Zielsetzungen des Vorhabens werden drei zentrale Forschungspunkte adressiert. Hierzu gehört die Weiterentwicklung des Standorts Huntorf, die Entwicklung eines neuen Speicherkraftwerkskonzept sowie die Entwicklung von Standortstrategien für die Wasserstoffregion Nord-West-Niedersachsen. Bei der Weiterentwicklung des vorhandenen Kraftwerkskonzepts werden alle Komponenten des Kraftwerks (Elektrolyse, Wasserstoffspeicherung, Wasserstoffverbrennung, Netzanschluss) detailliert modelliert. Anhand der Forschungsergebnisse wird das Druckluftspeicherkraftwerk Huntorf als Gesamtsystem inkl. Elektrolyse simuliert und bezogen auf parametrisierte Betriebsszenarien analysiert. Die Betriebsszenarien werden mithilfe einer Netz- und Szenarienstudie zur regionalen energietechnischen Infrastruktur entwickelt. Die Arbeitsstruktur ist in Abbildung 2 dargestellt.

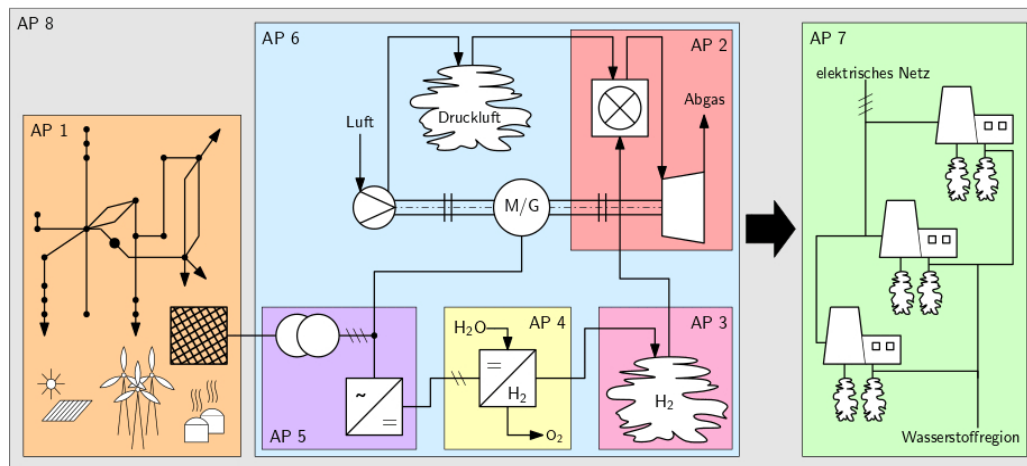


Abbildung 2: Arbeitspaketstruktur im Kontext des H₂-Druckluftspeicherkraftwerks Huntorf

Das IEE ist an den Arbeitspaketen 4, 5, 6 und 7 beteiligt. **Arbeitspaket 4** behandelt die Wasserstoffbereitstellung durch einen Elektrolyseur. Dabei steht für das IEE die Einbindung des Elektrolyseurs in das Speicherkraftwerk im Fokus. Auf Simulationsmodellen aufbauend werden das Hauptprodukt Wasserstoff sowie die Nebenprodukte Wärme und Sauerstoff bilanziert sowie der Gesamtwirkungsgrad des Elektrolysesystems berechnet. Das **Arbeitspaket 5** befasst sich mit dem Netzanschluss des Gesamtkraftwerks. Die Stromversorgung des Elektrolyseurs bietet durch einen fortschrittlichen Gleichrichter vielfältige Möglichkeiten zur Bereitstellung von Systemdienstleistungen einschließlich Momentanreserve und Blindleistungsbereitstellung und zur Verringerung von Netzzrückwirkungen. Als Regelmodell des Gleichrichters wird ein VISMA-Modell (Virtuelle Synchronmaschine), welches das Betriebsverhalten einer realen Synchronmaschine abbildet, eingesetzt und mit anderen netzgeführten Umrichtern verglichen. In **Arbeitspaket 6** werden die Ergebnisse der Arbeitspakete 1 bis 5 gebündelt und in das Gesamtmodell des Kraftwerks implementiert. Das vereinfachte Modell bildet das Betriebsverhalten des Gesamtkraftwerks ab und untersucht die Anwendungsmöglichkeiten im lokalen Energiekontext durch verschiedene Anwendungsszenarien. Das Betriebsverhalten wird anhand eines gemischt-ganzzahligen linearen Optimierungsmodells (MILP) untersucht. Um die Dynamik des Gesamtkraftwerks zu bewerten, werden außerdem Simulationsmodelle für alle wesentlichen Komponenten des Kraftwerks entwickelt, die die Dynamik hinreichend genau abbilden. Für **Arbeitspaket 7** werden die Ergebnisse aus den vorhergegangenen Arbeitspaketen auf ein Konzept für eine neuartige, regenerative Speicherkraftwerks-Generation übertragen. Es erfolgt eine Bewertung hinsichtlich der Betriebsstrategien, Wirtschaftlichkeit, Umsetzbarkeit und Netzdienlichkeit.

Projektstand: In AP 4 liegt der Fokus zunächst auf der Bilanzierung des spezifischen Arbeitsbedarfs der Peripheriegeräte. Dazu gehören u.a. Verdichter, Trockner und Wasserpumpe. Hierfür wurde ein Simulationsmodell auf Basis realer Fluide entwickelt, das beliebig parametrisiert werden kann. Die Ergebnisse können im nächsten Schritt mit Ergebnissen aus AP 6 in absolute Arbeitsbedarfe umgerechnet werden. Außerdem wird der Bedarf bzw. der Nutzen eines Wasserstoffpufferspeichers untersucht, da die Förderrate der Kaverne aus geomechanischer Sicht begrenzt ist.

AP 5 beschäftigt sich mit der Energieversorgung der Elektrolyseanlage, potentiellen Netzzrückwirkungen und der allgemeinen Systemdienstleistungsfähigkeit des Gesamtkraftwerks inklusive Elektrolyseanlage. Dazu werden seit Projektbeginn unterschiedliche Möglichkeiten zur Netzanbindung der Elektrolyseanlage untersucht. Der Fokus liegt hier auf dem Vergleich und der Dokumentation unterschiedlicher Umrichter- und Transformatortopologien, die eine zuverlässige Leistungsregelung der Elektrolyse mit geringen Netzzrückwirkungen realisieren. Erste Ergebnisse deuten darauf hin, dass mit dem vorgeschlagenen Umrichter-/Transformator-Konzept eine signifikante Kostenreduktion gegenüber derzeit gebräuchlichen Systemen bei gleichzeitiger Steigerung der Netzverträglichkeit von Elektrolyseanlagen im MW-Bereich erzielt werden kann.

Im weiteren Verlauf des Projekts werden in AP 5 die Systemdienstleistungsfähigkeit des Kraftwerksstandorts Huntorf betrachtet. Dazu wird ein detailliertes Simulationsmodell des Kraftwerks mit allen wesentlichen elektrischen Komponenten sowie der Elektrolyseanlage aufgebaut, die Systemdienstleistungsfähigkeit der vorhandenen elektrischen Infrastruktur bewertet und untersucht, ob sich durch den Einsatz eines elektrischen Kurzzeitspeichers die Systemdienstleistungsfähigkeit des Kraftwerks insgesamt steigern lässt.

In AP 6 wurde ein gemischt-ganzzahliges lineares Optimierungsmodell des Kraftwerks, das im vorgegangenen Projekt Huntorf 2020 entstanden ist, an die aktuelle Problemstellung angepasst. Das Modell unterstützt verschiedene Detailgrade in der Kraftwerksmodellierung sowie verschiedene Anwendungsfälle, die Multi-Use Untersuchungen ermöglichen. Mögliche Anwendungsfälle für das Kraftwerk sind die Teilnahme am Day-Ahead-Markt, die Bereitstellung von Regelleistung, die Speicherung von überschüssiger regenerativer Energie (Netzengpassmanagement), die Direktnutzung von Wind- oder PV-Energie durch Over-the-Counter-Verträge sowie der Verkauf von Wasserstoff an die Industrie. Erste Ergebnisse zeigen, dass ein wirtschaftlicher Betrieb unter aktuellen Bedingungen (Investitionskosten für Elektrolyseure, Stromgestehungskosten, Steuer und Abgabe) allein mit der Teilnahme am Day-Ahead-Markt kaum möglich ist.

Projekt: H₂-ReNoWe

Die Wirtschaftlichkeit verbessert sich deutlich, wenn weitere Anwendungsfälle kombiniert werden und die Investitionskosten für Elektrolyseure und die Steuer und Abgaben auf Strom zu Herstellung von Wasserstoff sinken.

Projektpartner:

- DLR Institut für Vernetzte Energiesysteme
- DLR Institut für Technische Thermodynamik
- TU Clausthal Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme
- TU Clausthal Institut für Energieverfahrenstechnik und Brennstofftechnik
- TU Clausthal Institut für Aufbereitung, Deponiertechnik u. Geomechanik
- Uniper Kraftwerke GmbH
- Uniper Energie Storage GmbH
- FEST Group

Projektlaufzeit: 01.05.2021 - 30.04.2024

Gefördert durch: Das Projekt wird durch das Niedersächsische Ministerium für Wissenschaft und Kultur gefördert.

Bearbeiter: Simon Breuer, M. Sc. (Tel.: 72-6341)
simon.breuer@cutec.de

Ann-Kathrin Klaas, M. Sc. (Tel.: 72-2593)
ann-kathrin.klaas@tu-clausthal.de

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

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

IEE

Projekt: Wind-Solar-Wärmepumpen-Quartier

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

Problem: Der Ausbau von Photovoltaik- und Windkraftanlagen schreitet immer weiter voran, sodass im Jahr 2021 mehr ca. 42 % des Stroms in Deutschland aus erneuerbaren Energien erzeugt wurden. Der Stromverbrauch hat in privaten Haushalten lediglich einen geringen Anteil am Endenergieverbrauch, da 83 % der Endenergie auf Raumwärme und Trinkwarmwassererzeugung entfallen. Der Anteil an erneuerbarer Wärme am Endenergieverbrauch in privaten Haushalten hat sich in den letzten Jahren dagegen kaum verändert und beträgt derzeit nur 14 %. Die Kopplung von Strom- und Wärmeverbrauch über eine effiziente, auf erneuerbar erzeugtem Strom basierende Wärmeversorgung bietet die Chance, diesen Anteil nachhaltig zu erhöhen.

Ziel: Das übergeordnete Ziel des Verbundprojekts war die Analyse der Primärenergieeinsparungen in Quartieren bei einem koordinierten Betrieb von Wärmepumpen und Speichern im Hinblick auf Wind- und Solarenergieerzeugung. Ziel des Teilvorhabens "Elektrische Verteilnetze für Wärmepumpenquartiere" war zum einen die Ermittlung zeitlich hochaufgelöster elektrischer Lastprofile von Wohngebäuden mit Wärmepumpen. Diese flossen im nächsten Schritt in die Ermittlung der Belastung des elektrischen Verteilnetzes in durch Wärmepumpen und EE-Anlagen geprägten Quartieren ein. Unter Einbeziehung verschiedener Wärmepumpenregelstrategien, innovativer Netzbetriebsmittel und Speicher wurden Auslegungsregeln für elektrische Verteilnetze abgeleitet.

Stand der Technik: Der immer weiter voranschreitende Ausbau von Photovoltaik- und Windkraftanlagen stellt neue Anforderungen an die Stromnetze. Aus diesem Grund, aber auch um den Einsatz fossiler Brennstoffe für Heizzwecke zu reduzieren, ist ein koordinierter Betrieb von Wärmepumpen und elektrischen bzw. thermischen Speichern mit Berücksichtigung der aktuellen Einspeisung aus lokalen erneuerbaren Energien anzustreben. Die Auswirkungen des Einsatzes von Wärmepumpen auf das elektrische Verteilnetz wurden bereits in verschiedenen Arbeiten untersucht. Häufig werden aus den erhaltenen Ergebnissen jedoch keine allgemeinen Aussagen bezüglich der Belastung des elektrischen Verteilnetzes durch den (koordinierten) Betrieb von Wärmepumpen abgeleitet.

Lösungsweg: Auf Basis von im Projekt erhobenen Messdaten aus zwei ausgewählten Quartieren wurden Modelle für den elektrischen und thermischen Bedarf in durch EE-Anlagen und Wärmepumpen geprägten Quartieren erstellt. Diese flossen in das Gesamtmodell ein, das die Gleichzeitigkeit des Bedarfs der Gebäude untereinander und mit der regenerativen Energieerzeugung berücksichtigt. Zusätzlich werden die Leistungsflüsse und somit die Spannungen im Verteilnetz durch eine Lastflussberechnung bestimmt. In Abbildung 1 sind die Komponenten des Quartiersmodells dargestellt.

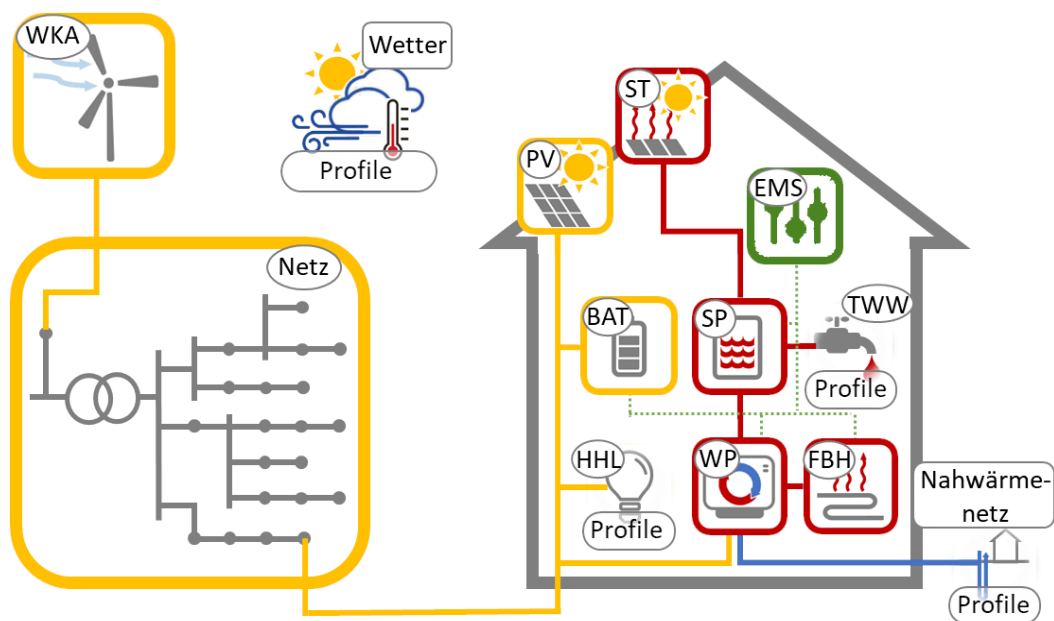


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Komponenten des Quartiersmodells (gelb: elektrisch, rot: thermisch, grün: regulierend) sowie der benötigten Eingangsprofile

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

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

Projekt: Wind-Solar-Wärmepumpen-Quartier

Projektstand: Die Ergebnisse des Gesamtvorhabens gliedern sich in vier Aspekte:

Monitoring in Quartieren: Grundlage für das Projekt bildete ein Monitoring in zwei reale Wärmepumpenquartiere, die sich im Wesentlichen in der Art der Wärmequelle und in ihrem Baujahr unterscheiden. Das energetische Monitoring der 20 Jahre alten, auf einem kalten Nahwärmenetz basierenden Wärmeversorgung im Quartier am Ohrberg zeigt, dass das Konzept auf Grund von technischen Defekten der alten Anlagentechnik und Betriebsfehlern mit einer durchschnittlichen Jahresarbeitszahl von 2,27 weit unter den Erwartungen zurückgeblieben ist. Die modernen invertergeregelten Luft-Wärmepumpen im Jahr 2016 errichteten Quartier Hügels-hart hingegen erreichten mit mittleren Jahresarbeitszahlen von 3,3 einen überdurchschnittlich effizienten Betrieb.

Simulationsmodell für Strom und Wärme in Quartieren: Im Projekt wurde ein Simulationsmodell entwickelt, das das thermische Verhalten der Gebäude, die Gebäudetechnik (Wärmepumpen, thermische und elektrische Speicher), Photovoltaik-, Solarthermie- und Windkraftanlagen, E-Mobilität sowie das elektrische Verteilnetz für ein Wohnquartier abbilden kann. Es kann mittels Parameterdateien für verschiedene Quartiersstrukturen verwendet werden um in 1-minütiger Auflösung alle Energieflüsse im Jahresverlauf zu modellieren. Durch eine Energiemanagement-Instanz können verschiedene Betriebsstrategien abgebildet werden. Das Modell wurde an Hand von Messdaten aus dem Quartier Ohrberg validiert.

Simulationsstudien zur erneuerbaren Energieversorgung von Wärmepumpen Quartieren: Anhand von Szenarien-Simulationen wurden einzelne Maßnahmen hinsichtlich ihrer Primärenergieeinsparung (PE-Einsparung) in Wohnquartieren bewertet. Der Einsatz von Windenergie- und PV-Anlagen in einem WP-Quartier erhöht bereits ohne Speicher die PE-Einsparung von ca. 50 % auf bis zu 80 % gegenüber Gas-Heizsystemen. Durch den Einsatz von Energiemanagementsystemen für Wärmepumpen in Kombination mit optimierter Heizanlagentechnik, wie invertergeregelten Wärmepumpen und thermischen Speichern, können weitere 15 % Primärenergie eingespart werden. Batteriespeicher führen zu weiteren 7 bis 9 % Primärenergie-Einsparung. Wird der Betrieb der einzelnen Wärmepumpen zusätzlich quartiersweit koordiniert, können bis zu weitere 4 % des Gesamtstrombedarfs im Quartier erneuerbar gedeckt werden. Insgesamt können bei Einsatz marktverfügbarer Technologien unter Verwendung lokalen Wind- und Photovoltaik-Stroms mehr als 90 % Primärenergie gegenüber einem Quartier mit Gas-Heizsystemen eingespart werden.

Elektrische Verteilnetze in Wärmepumpenquartieren: Bei der Umsetzung von Wärmepumpen-Quartieren mit hohem Anteil erneuerbarer Energieerzeugungsanlagen ergeben sich besondere Anforderungen an die elektrischen Verteilnetze, die auf Basis von Messdaten und Simulationen im Teilvorhaben des IEE ermittelt wurden. So hängen die Lastprofile der Wärme-

pumpen von der Regelstrategie und den Sperrzeiten des Netzbetreibers ab. Wärmebedarfsgeführte Wärmepumpen haben häufig einen erhöhten Strombezug in den frühen Morgenstunden, wohingegen eigenverbrauchsgeführte Wärmepumpen in Verbindung mit Photovoltaik-Anlagen vermehrt in den Mittagsstunden in Betrieb gehen. Verfolgen alle Wärmepumpen die gleiche Betriebsstrategie bzw. die gleiche Zielgröße, führt dies zu einer höheren Gleichzeitigkeit der Wärmepumpen.

Auch die Wahl der Wärmequelle der Wärmepumpe hat bereits Einfluss auf die Netzbelastung: Luft-Wärmepumpen führen in kalten Monaten zu einer höheren Netzbelastung als Wärmepumpen, die an einem kalten Nahwärmenetz angebunden sind oder Erdwärme nutzen. Auf Grund der besonders im Winter niedrigeren Lufttemperaturen im Vergleich zu Erd- und Nahwärmenetztemperaturen kann es an sehr kalten Tagen zum vermehrten Einsatz der elektrischen Zusatzheizung und entsprechend zu einer höheren Netzbelastung kommen.

In erneuerbar betriebenen Wärmepumpenquartieren tragen in den betrachteten Extrem-Szenarien die Photovoltaik-Anlagen den höchsten Beitrag zur Höchstbelastung im elektrischen Verteilnetz bei. Bei einer großen Anzahl an Photovoltaik-Anlagen im Quartier werden vermehrt kritische Netzzustände verzeichnet. Luft-Wärmepumpen und Elektrofahrzeuge tragen zu gleichen Teilen zur Netzbelastung bei, da Wallboxen von E-Autos zwar eine höhere Anschlussleistung im Vergleich zu Wärmepumpen haben, jedoch deren Gleichzeitigkeit geringer als bei Wärmepumpen ist.

Ob und in welchem Maße Stromspeicher zur Netzentlastung beitragen können, hängt von der Höhe und der Dauer der Belastung sowie von der Größe und Platzierung der Stromspeicher ab. Zur Reduzierung der maximalen Knotenspannungsabweichung eignen sich dezentrale Stromspeicher, die an den Strangenden platziert werden, besser als zentrale Speicher, die an die Sammelschiene des Ortsnetztransformators angeschlossen sind. Die maximalen Strangströme lassen sich nur durch dezentrale Speicher reduzieren. Für die Reduzierung der Scheinleistung am Ortsnetztransformator eignen sich zentrale Stromspeicher besser. Allerdings hängt die Höhe der Reduzierung immer von der Leistung des Speichers ab und ob der Speicher zum kritischen Zeitpunkt entsprechende Speicherkapazität zur Verfügung hat. Die Auslastung der Stromspeicher ist in allen drei Anwendungsfällen gering, wodurch die Praktikabilität infrage gestellt wird.

Publikationen: [1] Ohrdes, T., Knoop, M., Schneider, E., Spielmann, V., Bast, O., Franzen, L., Behnisch, J.: EnEff:Stadt Verbundvorhaben: Wind-Solar-Wärmepumpen-Quartier - Erneuerbar betriebene Wärmepumpen zur Minimierung des Primärenergiebedarfs, 4. Dialogplattform Power-to-Heat (11. – 12. Juni 2018)

Projekt: Wind-Solar-Wärmepumpen-Quartier

- [2] Ohrdes, T., Knoop, M., Schneider, E., Spielmann, V., Bast, O., Franzen, L., Behnisch, J.: Wind-Solar-Wärmepumpen-Quartier: Dynamische Modellierung und messtechnische Evaluation der Strom- und Wärmeversorgung im Quartier, 5. Dialogplattform Power-to-Heat, (12. – 13. September 2019)
- [3] Ohrdes, T., Schneider, E., Kastner, P., Knoop, M., Bast, O., Hagemeyer, J., Darnauer, N., Klaas, A.-K., Spielmann, V., Wehrmann, E.-A., & Beck, H.-P.: Wind-Solar-Wärmepumpenquartiere. Praxiserfahrungen und Planungshilfen für den erneuerbaren Betrieb von Wärmepumpenquartieren mit minimiertem Primärenergiebedarf. Emmerthal 2021. Institut für Solarenergieforschung GmbH. DOI: 10.21268/20211110-0
- [4] Ohrdes, T., Schneider, E., Kastner, P., Knoop, M., Bast, O., Hagemeyer, J., Darnauer, N., Klaas, A.-K., Spielmann, V., Wehrmann, E.-A., & Beck, H.-P. (2021). EnEff:Stadt Verbundvorhaben: Wind-Solar-Wärmepumpen-Quartier - Erneuerbar betriebene Wärmepumpen zur Minimierung des Primärenergiebedarfs (WPuQ) : Abschlussbericht : Laufzeit des Vorhabens: 15.08.2017-28.02.2021. Institut für Solarenergieforschung GmbH.
- [5] Klaas, A., Spielmann, V., Ohrdes, T., Schneider, E., Knoop, M., Bast, O., Hagemeyer, J., Darnauer, N.: Belastung von elektrische Niederspannungsnetze in Wärmepumpen-Quartieren, 7. Dialogplattform Power-to-Heat, (29. – 30.November 2021)

Projektpartner:

Am Verbundprojekt sind folgende Institute und Unternehmen beteiligt:

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

Projektlaufzeit:

15.08.2017 - 14.08.2020 (verlängert bis 28.02.2021)

<u>Gefördert durch:</u>	Das Projekt wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert.	
<u>Bearbeiter:</u>	Ann-Kathrin Klaas, M. Sc. ann-kathrin.klaas@tu-clausthal.de	(Tel.: 72-2593)
	Dipl.-Ing. Verena Spielmann (bis August 2019)	
<u>Projektleiter:</u>	Prof. Dr.-Ing. H.-P. Beck sekretariat@iee.tu-clausthal.de	(Tel.: 72-2570)

Projekt: Transformation des Hüttenwerks der Salzgitter Flachstahl GmbH im Rahmen des Projekts SALCOS®

Problem: Die Salzgitter AG steht vor einem umfangreichen Transformationsprozess: Obwohl ihre Tochter, die Salzgitter Flachstahl, zu den weltweit energieeffizientesten Stahlherstellern gehört, fallen dennoch bei der Stahlproduktion im integrierten Hüttenwerk jährlich rund acht Millionen Tonnen CO₂ an, die zu den gegebenen technischen Bedingungen prozessbedingt unvermeidbar sind. Zur Erreichung der europäischen Klimaschutzziele ist die direkte Vermeidung von CO₂-Emissionen durch eine grundlegende Umstellung des Produktionsprozesses notwendig.

Zukünftig sollen erneuerbarer Wasserstoff und übergangsweise Erdgas als Reduktionsmittel bei der Eisengewinnung und erneuerbarer Strom bei der Stahlproduktion eingesetzt werden. Im Projekt SALCOS® -Salzgitter Low CO₂ Steelmaking sollen in den nächsten Jahren die Hochöfen und Stahlwerkskonverter durch Direktreduktionsanlagen und Elektrolichtbogenöfen ersetzt werden. Dies ermöglicht am Ende der Transformation eine Senkung der CO₂-Emissionen um über 95 %. Diese Carbon Direct Avoidance Strategie ist besonders nachhaltig und soll bei der Salzgitter AG bereits bis 2033 abgeschlossen sein. Allerdings steigt dadurch schon in der ersten Ausbaustufe der Fremdstrombedarf der SZAG von derzeit 100 GWh auf 2 TWh pro Jahr. Auch der Erdgasbedarf wird vorerst deutlich ansteigen.

Ziel: In Kooperation mit der Salzgitter Flachstahl GmbH werden die Energieprozesse des bestehenden und zukünftigen Hüttenwerks in einem Energiesystemmodell abgebildet. So können verschiedene Szenarien der Transformation untersucht und verglichen werden. Der Fokus liegt dabei auf der Minimierung der Erdgas- und Stromverbräuche durch den optimierten Einsatz der noch übergangsweise vorhandenen Kuppelgase im Kraftwerk sowie der Optimierung des Wärmeverbunds im integrierten Hüttenwerk. Des Weiteren sollen Flexibilitätsoptionen analysiert und so die Integration in das übergeordnete, zukünftig von Erneuerbaren Energien dominierte Energiesystem verbessert werden.

Stand der Technik: Derzeit erfolgt die Untersuchung und Auslegung der ersten SALCOS-Ausbaustufe noch statisch auf der Basis von Jahresbilanzen. Damit können die grundlegenden Bedarfe beziffert und die benötigte Elektrolysekapazität sowie eine Wasserstoffpipeline ausgelegt werden. Erste dynamische Modellierungen des Kraftwerks zeigen, dass durch eine Kraftwerkseinsatzoptimierung der zukünftige Energieinput ins Hüttenwerk (Strom, Wasserstoff, Erdgas) minimiert werden kann.

Lösungsweg: Die Optimierung erfolgt im Rahmen einer Energiesystemmodellierung des Ist- und Soll-Zustands vorerst in der ersten Ausbaustufe. Der abzubildende Bilanzkreis umfasst das Kraftwerk und die Komponenten des Hüttenwerks. Basierend auf den Energieflüssen erfolgt die Dimensionierung der Komponenten sowie die Abschätzung der Flexibilitäten und Untersuchung möglicher Optimierungen. Durch die Entwicklung eines hinreichend genauen und gleichzeitig reduzierten, zeitreihen-basierten Energiemodells können anschließend grundlegende Zusammenhänge untersucht wie auch notwendige Modelldetails und mögliche Vereinfachungen identifiziert werden.

Aufbauend auf dem dynamischen Modell des Kraftwerks werden die Bilanzgrenzen nach außen verschoben und die Komponenten des Hüttenwerks modelliert und in die Optimierung integriert. Anschließend werden die Elektrolyse, die Direktreduktionsanlage sowie die Elektrolichtbogenöfen hinzugefügt. Die alten und neuen Komponenten des Hüttenwerks werden als Grey-Box-Modelle abgebildet, wobei die grundlegenden Zusammenhänge mit linearen Gleichungen angenähert werden. So werden ausgehend von der zu produzierenden Menge Koks, Roheisen, direktreduziertes Eisen, Rohstahl und Walzstahl die nicht zu optimierenden Brennstoff- und Strombedarfe sowie -erzeugung berechnet und anschließend im Rahmen einer gemischt ganzzahligen Optimierung die Bilanzen für die Optimierung des Brennstoffeinsatzes aufgestellt.

Somit kann der Ist- und Soll-Zustand des Kraftwerks in verschiedenen Szenarien untersucht und optimiert sowie aus dem Modell ein Planungs- und Prognosetool entwickelt werden.

Im zweiten Schritt wird die technische und wirtschaftliche Systemintegration des Hüttenwerks als zentraler Knoten im Energiesystem untersucht. Dafür wird zum einen das Modell des Hüttenwerks vereinfacht, um die Rechendauer der Simulationen zu verkürzen. Zum anderen wird das überregionale Energiesystem auf zentrale Knoten vereinfacht, die die erneuerbare Stromerzeugung in für das Hüttenwerk relevanten Regionen Deutschlands zeitreihenbasiert abbilden. Darüber hinaus werden an diesen Knoten Großelektrolysen und Speicher modelliert, welche sowohl zentrale als auch dezentrale Anlagen zusammenfassen. In verschiedenen Szenarien werden dann Größen wie die Stromerzeugung, die Dimensionen der Elektrolysen und Speicher, die Übertragungskapazität der Netze sowie die Flexibilität des Hüttenwerks variiert, um das Potential eines systemdienlichen Betriebs des Hüttenwerks abzuschätzen.

Projekt: Transformation des Hüttenwerks der Salzgitter Flachstahl GmbH im Rahmen des Projekts SALCOS®

Projektstand: Derzeit wird das Modell des Hüttenwerks in Python erstellt und validiert. Des Weiteren werden die Eingangsdaten und Zielfunktionen der zu untersuchenden Szenarien definiert. Erste Ergebnisse werden zeitnah veröffentlicht.

Projektpartner: Salzgitter Flachstahl GmbH

Projektlaufzeit: 01.01.2022 - 31.12.2023

Bearbeiter: Nils Kreth, M. Sc. (Tel.: 72-3597)
nils.kreth@tu-clausthal.de

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

IEE

Projektübersicht

Abteilung Leistungsmechatronik / Antriebe

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

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. 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. Simulation und Erprobung konventioneller und neuer Umrichterregelungen im Verbundbetrieb
3. Erweiterung der VISMA-Funktionalität zur Nutzung als unterbrechungsfreie Stromversorgung
4. Überprüfen verschiedener Materialien hinsichtlich ihrer magnetischen Eigenschaften und Aufbau eines geeigneten Messplatzes
5. Entwicklung einer Antriebsstrangregelung für ein Bohrgestänge unter Berücksichtigung spezieller Reibungseigenschaften

Aktuelle Projekte:

- **Verbundprojekt CoNDyNet II - Kollektive Nichtlineare Dynamik Komplexer Stromnetze**

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

Bearbeiterin: Steven Reineke, M. Sc.

Projektkoordinator: Dr.-Ing. Dirk Turschner

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Beck

- **INZELL - Netzstützung und Systemdienstleistungserbringung durch eine Industriezelle mit Inselnetzfähigkeit und Erneuerbaren Energien**

Teilvorhaben: Hochdynamische Stabilitätsbetrachtungen der transienten Vorgänge im Inselnetzbetrieb

Das übergeordnete Ziel des Projektes ist die Entwicklung eines Netzmanagers für die Anlageneinsatzplanung und Regelung eines Industrienetzes für den Inselnetzbetrieb. Dazu soll am Beispiel des Industrienetzes der Firmengruppe Max Bögl am Standort Sengenthal ein Konzept erarbeitet werden, mit dem ein Betrieb mit einer Vielzahl an EE-Anlagen im Schwarzfall regelkonform und sicher vom Netz getrennt und im Inselnetzbetrieb weiterversorgt werden kann.

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Anja Ufkes

Projektkoordinator: Dr.-Ing. Dirk Turschner

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Beck

- **Aktive Dämpfung von Torsionsschwingungen bei langen sowie schwer zugänglichen Antriebswellen mit prozessbegleitender, adaptiver Nachführung dynamischer Lasteingangsfunktionen am Beispiel der Stribeck-Kurve (DäToNa)**

Ziel des geplanten Projekts ist es, eine aktive Dämpfung von Torsionsschwingungen zu entwickeln, welche infolge des Stick-Slip-Effektes aufgrund einer negativen Steigung der Lasteingangsfunktion bei langen sowie schwer zugänglichen Antriebswellen in Erscheinung treten und zu erheblichen Schäden am Antriebsstrang führen.

Bearbeiter: Daniel Alexander Piontek, M. Sc.

Projektkoordinator: Dr.-Ing. Dirk Turschner

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Beck, Dr.-Ing. Dirk Turschner

Projektübersicht

- **Entwicklung eines magnetisch leitfähigen Elastomers**

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

Bearbeiter: Dr.-Ing. Dirk Turschner

Projektleiter: Dr.-Ing. Dirk Turschner

IEE

Projekt: Verbundprojekt CoNDyNet II - Kollektive Nichtlineare Dynamik
Komplexer Stromnetze

Projekt: Verbundprojekt CoNDyNet II - Kollektive Nichtlineare Dynamik Komplexer Stromnetze

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

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

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

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

Ziel: Das Projektziel ist die Untersuchung verschiedener Regelkonzepte und verschiedener Umrichtersysteme im Netzparallelbetrieb und im Inselnetz (Microgrid). Dies wird zunächst in der Simulation und anschließend in mehreren Versuchsnetzen im Labor durchgeführt. Hierbei ist insbesondere das stationäre und dynamische Verhalten von besonderem Interesse. Gegenstand der Untersuchung ist das Zusammenspiel unterschiedlich geregelter Dreiphasen-Vierleiter-Wechselrichtersysteme (ermöglichen unsymmetrische Einspeisung) in einem bis zu 100 % stromrichterdominierten Netz. Die Untersuchung der Netzstabilitätskriterien für Spannung, Frequenz, Ober- und Unterschwingungen etc. steht dabei im Vordergrund.

Stand der Technik: Die zuverlässige Funktion von elektrischen Netzen erfordert nicht nur die Einspeisung ausreichender Energiemengen, sondern auch die Erbringung einer Reihe von Systemdienstleistungen. Zu diesen gehören u. a. Aufgaben wie Spannungshaltung, Frequenzhaltung, Vorhaltung von Blindleistung, Bereitstellung von Momentanreserve und die Möglichkeit, nach einem Stromausfall den Versorgungswiederaufbau zu gewährleisten. Diese Leistungen werden bisher noch überwiegend durch konventionelle Kraftwerke erbracht, die deshalb immer mit einer Mindestkapazität am Netz betrieben werden müssen. Einige dieser Aufgaben liegen im Verantwortungsbereich des Netzbetreibers, andere erfordern einen umfangreichen Datenaustausch zwischen den unterschiedlichen Netzbetreibern, den Kraftwerksbetreibern und zukünftig den Verbrauchern. Für die Bereitstellung von Momentanreserve sind derzeit ausschließlich die zentralen Großkraftwerke verantwortlich. Einen wesentlichen Beitrag zur Stabilisierung des Netzes haben diese Kraftwerkseinheiten, die vorwiegend aus Synchronmaschinen bestehen. Durch den zunehmenden Anteil an erneuerbaren Energien nimmt die Energie, die über leistungselektronische Wechselrichter ins Netz eingespeist wird, stetig zu. Bei steigendem Anteil erneuerbarer Energien entstehen dadurch große Herausforderungen für die Kontrolle und Steuerung der Netzdynamik. Ein wesentliches Problem ist, dass durch den sinkenden Anteil konventioneller Generatoren die Momentanreserve im Netz verringert wird, was einen negativen Einfluss auf die Frequenzstabilität hat. Studien zeigen, dass es bei bestimmten Anteilen von wechsellrichterbasierten Quellen im Netz Kipppunkte gibt, an denen das gesamte System instabil wird. Die Ursache hierfür ist, dass die heute verwendeten Wechselrichter eine „netzfolgende“ Dynamik haben, d. h. der Netzfrequenz folgen und z. B. nach der in der VDE-AR-N 4105 definierten Kennlinie einspeisen. Um den Anteil erneuerbarer Energiequellen im Netz langfristig steigern zu können, werden daher „netzbildende“ Wechselrichter benötigt.

Lösungsweg: Zunächst werden die in der Praxis relevanten Umrichterkonzepte und Umrichterregelungen in der Simulation implementiert und hinsichtlich ihrer Eignung zur Bereitstellung von Systemdienstleistungen überprüft. Dazu werden sowohl Einzelsysteme als auch ein Verbundbetrieb von Einzelsystemen näher untersucht. Nach der analytischen Betrachtung werden die Ergebnisse der Simulation im Labor validiert. Dabei wird vor allem ein Augenmerk auf den Fehlerfall und die daraus resultierende Systemstabilität gelegt, sowohl für Standardregelverfahren als auch für die am Institut entwickelte Reglerstruktur der virtuellen Synchronmaschine (VISMA).

Zur Erprobung der theoretischen Ergebnisse stehen im Verteilnetzlabor des Instituts vier eigens entwickelte und frei parametrierbare Dreiphasen-Vierleiter-Wechselrichter zur Verfügung, die

Projekt: Verbundprojekt CoNDyNet II - Kollektive Nichtlineare Dynamik
Komplexer Stromnetze

mit Phasenstromreglern ausgestattet sind. Diese weisen eine besonders hohe Robustheit, gerade auch bei der Verwendung mit der VISMA, auf. Neben diesen Wechselrichtern sind zwei auf dem Markt verfügbare Standardwechselrichter angeschafft worden. Ein Zweilevel-Umrichter, reiner Einspeisewechselrichter für PV-Anlagen, und ein Dreilevel-Umrichter mit Notstromstromversorgung (inselnetzbildend). Zur Emulation von Netzereignissen steht im Labor ein Netzsimulator (ACQS) zur Verfügung. Die unterschiedlichen Komponenten des Versuchsnetzes lassen sich über Netzersatzelemente, die verschiedene Leitungslängen nachbilden, zu der gewünschten Netztopologie zusammenschalten. Ein beispielhaftes Versuchsnetz aus der Netznachbildung, einem Wechselrichter mit VISMA-Funktion und einem PV-Einspeisewechselrichter zur Versorgung einer ohmschen Last ohne Berücksichtigung von Leitungslängen zwischen den verschiedenen Komponenten zeigt die folgende Abbildung. Der Netzausfall wird durch Öffnen des Kuppelschalters K1 nachgebildet.

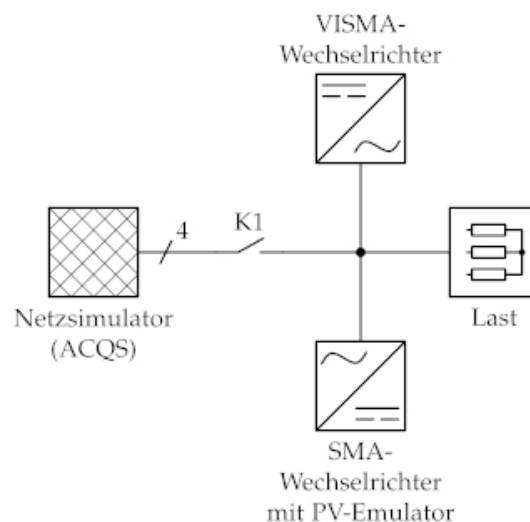


Abbildung 1: Mögliches Versuchsnetz zur Untersuchung eines Ausfalls des vorgelagerten Netzes (Trennung des Netzsimulators vom Versuchsnetz über Kuppelschalter K1) und der stabilisierenden Wirkung und Versorgungsaufrechterhaltung der VISMA im Netz in Verbindung mit einem PV-Wechselrichter.

Mittels der gesammelten Ergebnisse sind neue Reglerkonzepte für Wechselrichter, die in der Literatur beschrieben werden, zu erproben und in unterschiedlichen Netztopologien zu testen. Abschließend ist noch zu untersuchen, wie sich die Einspeisung von fluktuierenden Energien mit den unterschiedlichen entwickelten und untersuchten Reglerkonzepten netzschonender gestalten lässt und die Systemstabilität zu jedem Zeitpunkt aufrechterhalten werden kann.

Projektstand: Nach der Fertigstellung der durch das Institut gebauten frei parametrierbaren Wechselrichter (vgl. Abbildung 2) und der Anschaffung der auf dem Markt verfügbaren Wechselrichter ist die Versuchsumgebung schrittweise in Betrieb genommen worden. Dazu wurden kleine Teilversuche durchfahren, die einen Grundstein für die folgenden Versuchsnetze gebildet haben und sicherstellten, dass ein sicherer Laborbetrieb mit sämtlichen Komponenten möglich ist. Nach erfolgreicher Inbetriebnahme sind die in der Simulation gesammelten Ergebnisse im Prüffeld validiert worden.

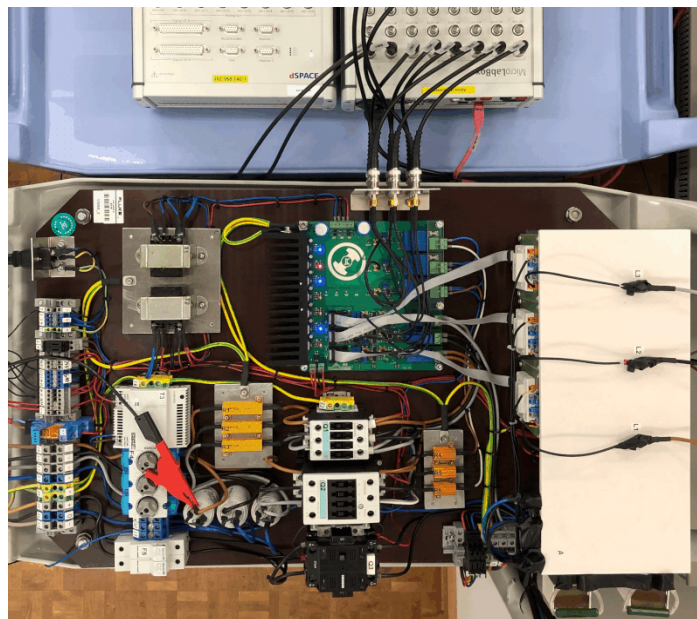


Abbildung 2: Eigens entwickelter frei parametrierbarer Wechselrichter mit Phasenstromregler. Die Ansteuerung erfolgt über eine MicroLabBox der Firma dSPACE (oben Mitte) und die Impulsgenerierung für das Leistungsteil (Zweilevel-B6-Topologie) über die Phasenstromregler, die gemeinsam mit der Messinfrastruktur, auf dem PCB (Leiterplatte) untergebracht sind.

In einem der ersten Versuche sind die Auswirkungen eines Netzausfalls in einem Verteilnetz mit einem reinen Einspeisenumrichter untersucht worden. Dazu ist mit dem Netzsimulator (ACQS) zunächst ein gewöhnliches Drehstromnetz vorgegeben worden, an dem ein PV-Wechselrichter mit einer PV-Nachbildung und eine Last angeschlossen ist (s. Abbildung 1, jedoch ohne den VISMA-Wechselrichter). Der Wechselrichter hat entsprechend die von der simulierten PV-Anlage verfügbare Leistung eingespeist. Somit ist eine typische Situation im Verteilnetz nachgebildet worden. Über einen Kuppelschalter ist während des Versuchs die Netznachbildung vom Versuchsnetz getrennt worden, um den Netzausfall zu simulieren. Wie zu erwarten war ist

Projekt: Verbundprojekt CoNDyNet II - Kollektive Nichtlineare Dynamik
Komplexer Stromnetze

das Netz im Versuch sofort zusammengebrochen, da der Wechselrichter keine netzstützende Wirkung zeigt. Die Messergebnisse sind in Abbildung 3 zu sehen. Dies liegt vor allem an der Regelungsstruktur, die ein Außernetz als Bezug vorsieht. Fehlt dieser Bezug, so kann die Regelung dahinter nicht arbeiten und der Wechselrichter wird in einen Fehlerzustand überführt. Dieser Fehlerzustand wird im Übrigen schon bei der geringsten Verletzung der definierten Grenzwerte von Spannung und Frequenz erreicht. Ein Gegensteuern zur Vermeidung von Grenzwertverletzungen ist ebenfalls nicht möglich (unidirektionaler Leistungsfluss).

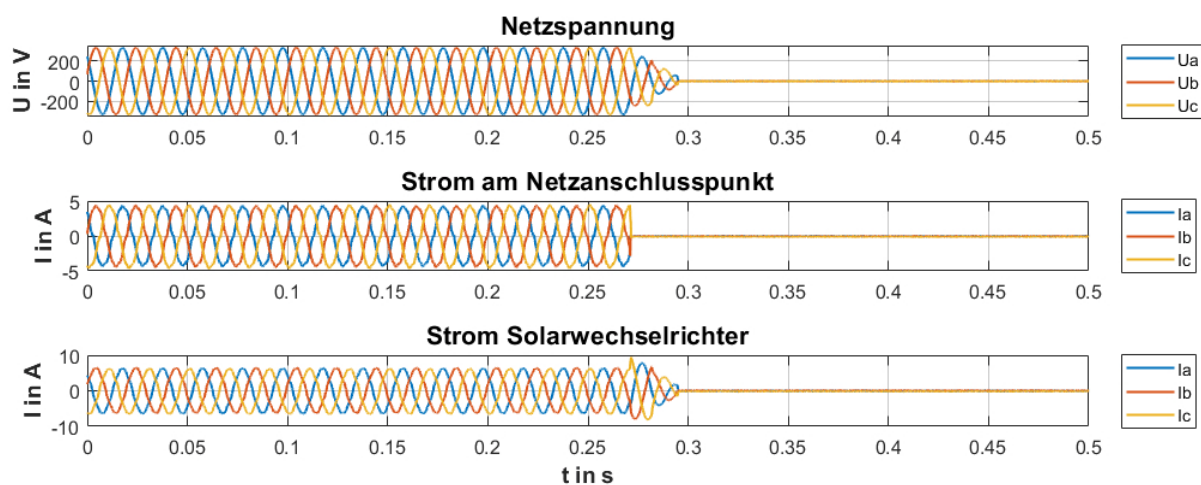


Abbildung 3: Verhalten eines PV-Einspeisewechselrichters bei einem Netzausfall, simuliert durch Öffnen des Koppelschalters im Versuchsnetz beim Zeitpunkt $t \approx 0,27$ s.

Im weiteren Projektverlauf ist der Einfluss der VISMA in einem solchen Verteilnetz untersucht worden. Dazu ist das gleiche Versuchsnetz aufgebaut worden, wobei ein zusätzlicher Wechselrichter mit VISMA-Funktionalität an die Sammelschiene angeschlossen wurde (s. Abbildung 1). Der Netzausfall ist wiederum durch Öffnen des Kuppelschalters nachgebildet. Die Ergebnisse dieser Versuche zeigen, dass das Netz nicht zusammenbricht und der Solarwechselrichter weiter in das Netz einspeisen kann.

In dem Versuch selbst hat die VISMA keine vorgelagerten Regler gehabt und trotzdem ist das Netz soweit stabil geblieben. Die Systemstabilisierung ist ausschließlich auf die rotierende Masse der VISMA zurückzuführen. Die Drehzahl des Schwungrades kann sich nicht sprunghaft ändern, stattdessen wird das Schwungrad langsam abgebremst, die Netzfrequenz sinkt langsam und die Bremsenergie wird in Form von Wirkleistung in das Netz eingespeist. Ein vorgelagerter Regler kann nun aktiviert werden, der die Nenngrößen des Netzes wiederherstellt.

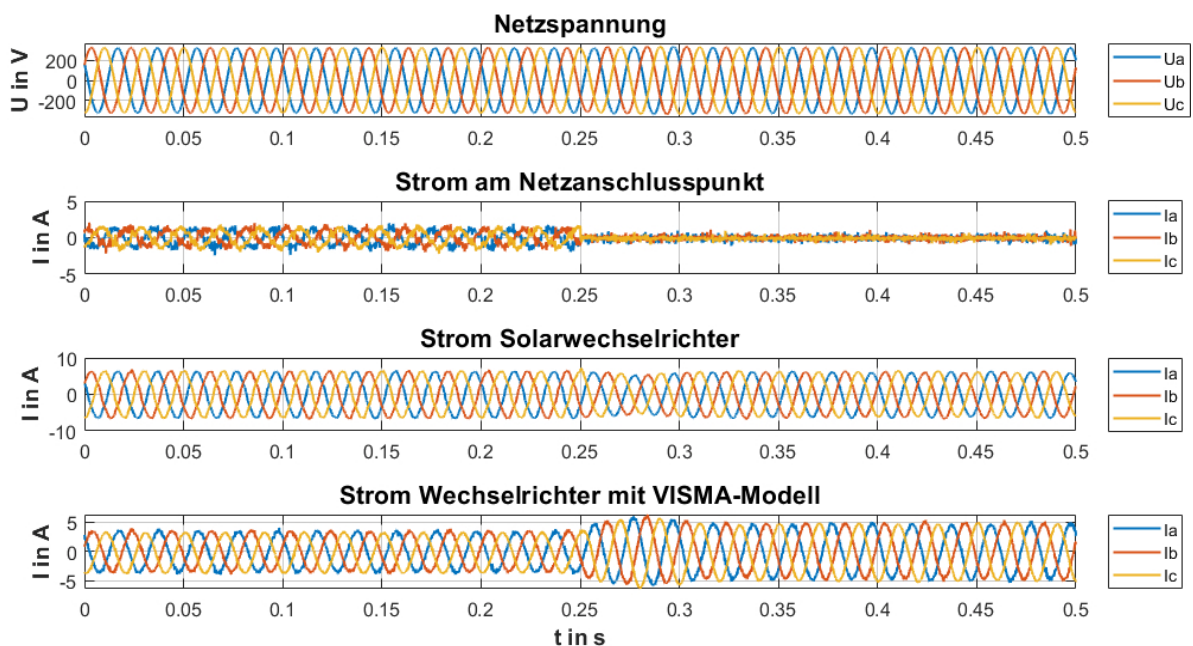


Abbildung 4: Netzstützende Wirkung der VISMA in einem Versuchsnetz gemeinsam mit einem PV-Einspeisewechselrichter bei einem Netzausfall, simuliert durch das Öffnen des Koppelschalters bei Zeitpunkt $t = 0,25s$. Die VISMA hat zu diesem Zeitpunkt keine vorgelagerten Regler zur Netzstützung aktiviert.

Es konnte ebenfalls bisher gezeigt werden, dass die VISMA mit einer entsprechenden Regelung in der Lage ist ein Inselnetz aufzubauen und zu stabilisieren. Ausreichend schnell arbeitende Regler können die Betriebsparameter der virtuellen Synchronmaschine so schnell nachführen, dass ein Versuchsnetz auch bei großen Lastschwankungen innerhalb kürzester Zeit in den nominellen Systemzustand zurückgeführt werden kann. Bisherige Versuche mit zwei Systemen sind erfolgreich abgeschlossen, ein Multi-VISMA-Netz mit bis zu vier Systemen steht noch aus.

Projektpartner:

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

Projekt: Verbundprojekt CoNDyNet II - Kollektive Nichtlineare Dynamik
Komplexer Stromnetze

Projektlaufzeit: Januar 2019 - Juni 2022

Gefördert durch: Bundesministerium für Bildung und Forschung

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

Projektleiter: Prof. Dr. Dr. h. c. J. Kurths (PIK)
juergen.kurths@pik-potsdam.de

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

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

IEE

Projekt: INZELL

Projekt: INZELL – Netzstützung und Systemdienstleistungserbringung durch eine Industriezelle mit Inselnetzfähigkeit und Erneuerbaren Energien

Teilvorhaben: Hochdynamische Stabilitätsbetrachtungen der transienten Vorgänge im Inselnetzbetrieb

Problem: Auf Seiten der Industriebetriebe erfordern die zunehmend kostensensitiven Fertigungsprozesse eine hohe Zuverlässigkeit der Stromversorgung. Hingegen entstehen durch die Verdrängung von Großkraftwerken offene Flanken im Bereich der Systemsicherheit, insbesondere bei der Blindleistung im Übertragungsnetz, der Momentanreserve, die nicht mehr systemimmanent in vielen Erzeugungs- und Bezugsanlagen vorhanden ist und dem Netzwiederaufbau, der bislang mittels Großkraftwerken geplant ist.

Viele Betriebe verfügen bereits über Eigenerzeugungsanlagen, um unabhängiger von Strombezugskosten zu sein. Bedeutender wird auch der Aspekt der Eigenabsicherung bzw. der höheren Versorgungsqualität werden, da sowohl länger andauernde Versorgungsausfälle als auch Spannungseinbrüche des öffentlichen Versorgungsnetzes zu hohen Kosten durch Produktionsstillstand und Schäden führen können.

Ziel: Das übergeordnete Ziel des Projektes ist die Entwicklung eines Netzmanagers für die Anlageneinsatzplanung und Regelung eines Industrienetzes für den Inselnetzbetrieb. Dazu soll am Beispiel des Industrienetzes der Firmengruppe Max Bögl am Standort Sengenthal ein Konzept erarbeitet werden, mit dem ein Betrieb mit einer Vielzahl an EE-Anlagen im Schwarzfall regelkonform und sicher vom Netz getrennt und im Inselnetzbetrieb weiterversorgt werden kann. Weiterhin soll das Potential von Systemdienstleistungen im Netzparallelbetrieb untersucht werden. Es ist geplant, das entwickelte Konzept im Rahmen eines Feldversuchs im Werksnetz der Firma Max Bögl zu testen.

Stand der Technik: Durch die Transformation von wenigen großen Stromerzeugern auf der höchsten Spannungsebene zu vielen kleineren, hauptsächlich auf den niedrigen Spannungsebenen, bieten sich vermehrt Möglichkeiten zur Bildung von Inselnetzen. In den meisten Fällen sind diese unerwünscht und werden verhindert, um das Netz in einem sicheren Zustand zu halten. Es zeigt sich jedoch vermehrt, dass Inselnetze neben Risiken auch Chancen bieten. Es ergeben sich Möglichkeiten zur Weiterversorgung eines Netzabschnitts auch bei Ausfall des übergeordneten Netzes mit damit verbundener Erhöhung der Versorgungssicherheit einzelner Verbraucher. Außerdem können Inselnetze beim Wiederaufbau des Gesamtnetzes helfen, indem mehrere von ihnen verbunden werden. Dies alles setzt eine sichere und stabile Regelung des

Inselnetzes voraus.

Der stabile Betrieb von Inselnetzen wird in mehreren Forschungsprojekten untersucht. Ein großer Erzeuger bzw. ein Kraftwerk oder auch ein Batteriespeicher mit ausreichender Leistung dient der Netzbildung und -führung. INZELL hebt sich im Konzept von diesem Ansatz ab, da keine der vorhandenen Erzeugungseinheiten alleine den Energiebedarf decken kann, es ist eine Kombination mehrerer Erzeuger nötig. Dieser Umstand verlangt ein Konzept der Anlageneinsatzplanung, Regelung und Laststeuerung.

Ein Großteil der Erzeugungsanlagen im Werksnetz der Firma Max Bögl (siehe Abbildung 1) ist über Umrichter mit dem Netz verbunden. D. h. die fehlenden Synchronmaschinen und damit fehlende dämpfende Wirkung der rotierenden Massen führt womöglich zu Stabilitätsproblemen im Inselnetz.

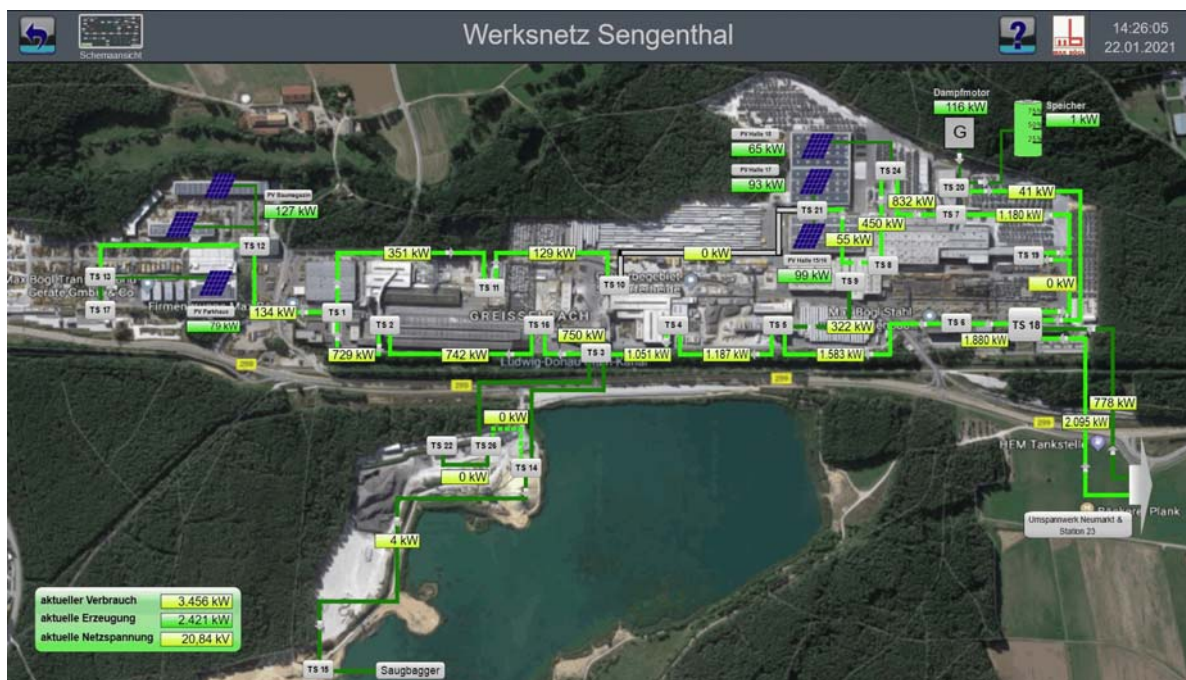


Abbildung 1: Luftaufnahme des Industriegeländes der Firma Max Bögl in Sengenthal mit überlagerten Leistungsflüssen innerhalb des Werksnetzes (Quelle: Firma Max Bögl)

Lösungsweg: Als übergeordnete Einheit wird ein Netzmanager entwickelt, der die Planung und Regelung für den Inselnetzbetrieb koordiniert. Mithilfe von verschiedenen Eingangsdaten, wie

Projekt: INZELL

z. B. Wetterdaten, Lastprofilen, Historie, etc. wird das Verhalten der Erzeugungs- und Verbrauchsanlagen prognostiziert und in einer entsprechenden Anlageneinsatzplanung verwendet. Unter Berücksichtigung von Vorgaben, beispielsweise zur gewünschten Mindesteigenversorgungsdauer und Priorisierung der Lasten, werden Fahrpläne erstellt und über den Netzmanager den Komponenten übergeben. Zusätzlich zu dieser zentralen Regelung stabilisieren die Bezugs- und Erzeugungsanlagen über dezentrale Regelungen das Netz, insbesondere im Kurzzeitbereich. Somit werden Momentanreserve und Primärregelung dezentral zur Verfügung gestellt, der Netzmanager agiert mit seiner Anlageneinsatzplanung als Sekundär-/Tertiärregelung.

Im Rahmen der Bearbeitung wird ein Simulationsmodell zur Nachbildung des Werksnetzes aufgebaut. Darin werden Netzzustände nachgestellt und die Auswirkungen auf die Stabilität untersucht, um Aussagen über Reglerparametrierungen sowie Vorgaben für die Anlageneinsatzplanung treffen zu können. Im Inselnetz liegt der Fokus auf hochdynamischen Effekten, Winkelstabilität, Leistungspendelungen und Momentanreserve. Zusätzlich wird im Modell eine virtuelle Synchronmaschine (VISMA) ergänzt, um durch die dämpfenden Eigenschaften Verbesserungen im Inselnetz untersuchen zu können.

Projektstand: Die inhaltliche Bearbeitung konnte nach Abschluss der Kooperationsvereinbarung zwischen den Partnern Ende 2020 deutlich verzögert beginnen. Zum jetzigen Zeitpunkt wird an der Konzeptionierung des Inselnetzbetriebs gearbeitet. Die einzelnen Teilaspekte betreffen die Netztrennung, den Aufbau des Inselnetzes, Spannungs- und Frequenzregelung im Inselnetzbetrieb sowie die Resynchronisation mit dem übergelagerten Netz.

Unter den aktuell gültigen normativen Bestimmungen ist ein unterbrechungsfreier Übergang in ein Inselnetz nicht möglich. Die Erzeuger erkennen das fehlende Netz und schalten sich ab. Im Inselnetz ist es nötig, dass mindestens ein Erzeuger die Netzführung übernimmt, also Spannungs- und Frequenzvorgaben macht. Diese Aufgabe kann vom Batteriespeicher übernommen werden, da dessen Umrichter spannungsgeführt arbeiten können. Um den Energiebedarf der Verbraucher decken zu können, müssen die Windkraft- und Photovoltaikanlagen, sowie der Dampfmotor unterstützen. Jeder dieser Erzeuger speist entsprechend seiner $P(f)$ - bzw. $Q(U)$ -Kennlinien und aktuellen Verfügbarkeit ein.

Die meisten der Erzeuger speisen über Umrichter in das Werksnetz ein. Die dadurch entstehenden Einflüsse auf die Stabilität des Inselnetzes sollen in einem Simulationsmodell untersucht werden. Dieses befindet sich aktuell im Aufbau. Umrichter reagieren deutlich schneller auf Änderungen des Netzzustandes als klassische rotierende Maschinen. Deshalb werden schwerpunktmäßig die Eigenschaften und Regelungen der Umrichter nachgebildet. Durch die fehlende Dämpfung in Form von rotierender Masse ist mit Einbußen in der Stabilität zu rechnen.

Simulativ werden einem der drei Umrichter des Batteriespeichers VISMA-Fähigkeiten verliehen, um Verbesserungen zu erzielen.

Projektpartner:

- Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg, Forschungsstelle Energienetze und Energiespeicher (FENES)
- Technische Universität München
- Zentrum für Angewandte Energieforschung Bayern e. V.
- Max Bögl Bauservice GmbH und Co. KG
- INTILION GmbH
- Bayernwerk Netz GmbH
- Bredenoord BV
- Siemens Gamesa Renewable Energy GmbH & Co. KG
- OMICRON electronics GmbH

Projektlaufzeit: 01.06.2020 - 31.05.2023

Gefördert durch: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

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

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

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

Projekt: DäToNa (geplantes DFG-Vorhaben)

Projekt: Aktive Dämpfung von Torsionsschwingungen bei langen sowie schwer zugänglichen Antriebswellen mit prozessbegleitender, adaptiver Nachführung dynamischer Lasteingangsfunktionen am Beispiel der Stribeck-Kurve (DäToNa)

Problem: Antriebswellen sind während des Betriebs mechanischen Belastungen in Form von Schwingungen aufgrund dynamisch wirkender Kräfte ausgesetzt. Erfahrungen aus den Bereichen der Tiefbohrtechnik zur Erschließung von Erdöl-, Erdgas- und Geothermiefeldern sowie aus dem Einsatz langer, mechanischer Wellen in der Turbinen-, Kompressor- und Schiffsantriebstechnik zeigen, dass sich die relevanten Schwingungsmoden in ihren jeweiligen Ausbreitungsrichtungen voneinander abgrenzen. Hierbei sind die lateralen („Whirl“), longitudinalen („Bit-Bounce“) sowie torsionalen Schwingungen („Stick-Slip“, „HFTO“) zu nennen [1, 2], wobei vor allem der Stick-Slip-Effekt im Bereich geringer

Rotationsgeschwindigkeiten maßgeblich zur Beeinflussung des zur Verfügung stehenden Drehmomentes beiträgt [3]. High-frequency torsional oscillations, kurz HFTO, stellen Torsionsschwingungen mit Frequenzen von 450 . . . 500 Hz bei Beschleunigungen von bis zu 150 g dar, wohingegen der Stick-Slip-Effekt bei geringen Frequenzen (0,1 . . . 5 Hz) auftritt [4, S. 5]. Bezogen auf die Tiefbohrtechnik werden Stick-Slip-Schwingungen in Schwingungen unterteilt, welche durch den Kontakt zwischen dem Bohrkopf und der gegenüberliegenden Gesteinsformation sowie durch den Kontakt zwischen dem Bohrstrang und der umgebenden Gesteinsformation induziert werden [5, S. 1, 6, S. 2]. Im Zustand der Haftreibung (Stick) rotiert die Welle nicht, wohingegen im Zustand der Gleitreibung (Slip) die Welle aufgrund der Torsionsbelastung schlagartig „durchrutscht“ und dadurch deutlich schneller rotiert als die Antriebsmaschine. Derartige Torsionsschwingungen können hinsichtlich des resultierenden Verschleißes der Wellenkomponenten zu erheblichen Schäden am Antriebsstrang führen. Da die tribologischen Zusammenhänge nichtlinear sind und von zahlreichen, oftmals unbekanntem Parametern abhängen, gestaltet sich eine Regelung zudem als entsprechend kompliziert.

Ziel: Ziel des geplanten Projekts ist es, eine aktive Dämpfung von Torsionsschwingungen zu entwickeln, welche infolge des Stick-Slip-Effektes aufgrund einer negativen Steigung der Lasteingangsfunktion bei langen sowie schwer zugänglichen Antriebswellen in Erscheinung treten und zu erheblichen Schäden am Antriebsstrang führen. Hierbei liegt der Fokus auf insgesamt drei Hauptaspekten, namentlich:

- (1.) Grundlagenorientierte Entwicklung eines prozessbegleitenden Modells zur Berechnung des dynamischen Reibmoments sowie zur adaptiven Nachführung nichtlinearer Lasteingangsfunktionen am Beispiel der Stribeck-Kurve basierend auf einer erstellten Parameter-

Datenbank

- (2.) Entwurf eines selbststellenden Reglers im Rahmen schwer zugänglicher Antriebswellen für Mehrmassenschwinger (MMS)-Systeme höherer Ordnung im Zustandsraum entsprechend der Regelkreis-Stabilität anhand der Führungs- und Störgrößenübertragungsfunktion
- (3.) Erprobung des Reglers und der adaptiven Nachführung zur Validierung der theoretischen Untersuchungen am Prüfstand

Stand der Technik: Torsionsschwingungen, welche infolge des Stick-Slip-Effektes auftreten, werden im Zuge der Berechnung des auf die Welle wirkenden Lastmoments anhand von zwei Reibungsmodellen nachgebildet. Das Stribeck-Modell stellt als statisches Reibungsmodell, ausgehend von einer konstanten, relativen Reibgeschwindigkeiten, die Grundlage für die dynamische Berechnung über das LuGre-Modell dar, welches nach [7] die Kontaktstelle anhand von mikroskopisch kleinen, mechanischen Federn abbildet. Verschiedene Arbeiten am IEE haben sich in der Vergangenheit mit analytischen Regelungen im Bereich der Drehzahlregelung zur aktiven Schwingungsdämpfung beschäftigt. In [8] wird hierzu ein Standard-Drehzahlregelverfahren vorgestellt, welches zur Verbesserung des dynamischen Verhaltens den einschleifigen PI-Regler um einen Zustandsregler erweitert. Die Voraussetzung für die PI-Zustandsregelung nach [8, S. 29] ist die Messung / Rekonstruktion aller Zustandsgrößen, was messtechnisch jedoch nur für die Antriebsdrehzahl und das Luftspaltmoment realisierbar ist [9], sodass ein geeigneter Zustandsbeobachter einzusetzen ist.

Lösungsweg: Das Projekt gliedert sich in insgesamt drei Arbeitsschritte: in einem ersten Schritt erfolgt die Berechnung des dynamischen Reibmoments hinsichtlich des Bohrkopf-induzierten Stick-Slip-Effekts für geringe Rotationsgeschwindigkeiten bei Frequenzen < 5 Hz unter Vernachlässigung der hochfrequenten Torsionsschwingungen (HFTO). Unterstützt wird die analytische Berechnung des Reibmoments durch die Katalogisierung relevanter Lasteingangsfunktionen (hier der Stribeck-Kurven) für verschiedene metallisch-nichtmetallische Materialpaarungen im Kontaktstellenbereich. Hierzu verfügt die TUC am Clausthaler Zentrum für Materialtechnik (CZM) über einen experimentellen Teststand in Form eines herunterskalierten Bohrstrangs in vertikaler Anordnung (s. Abbildung 1).

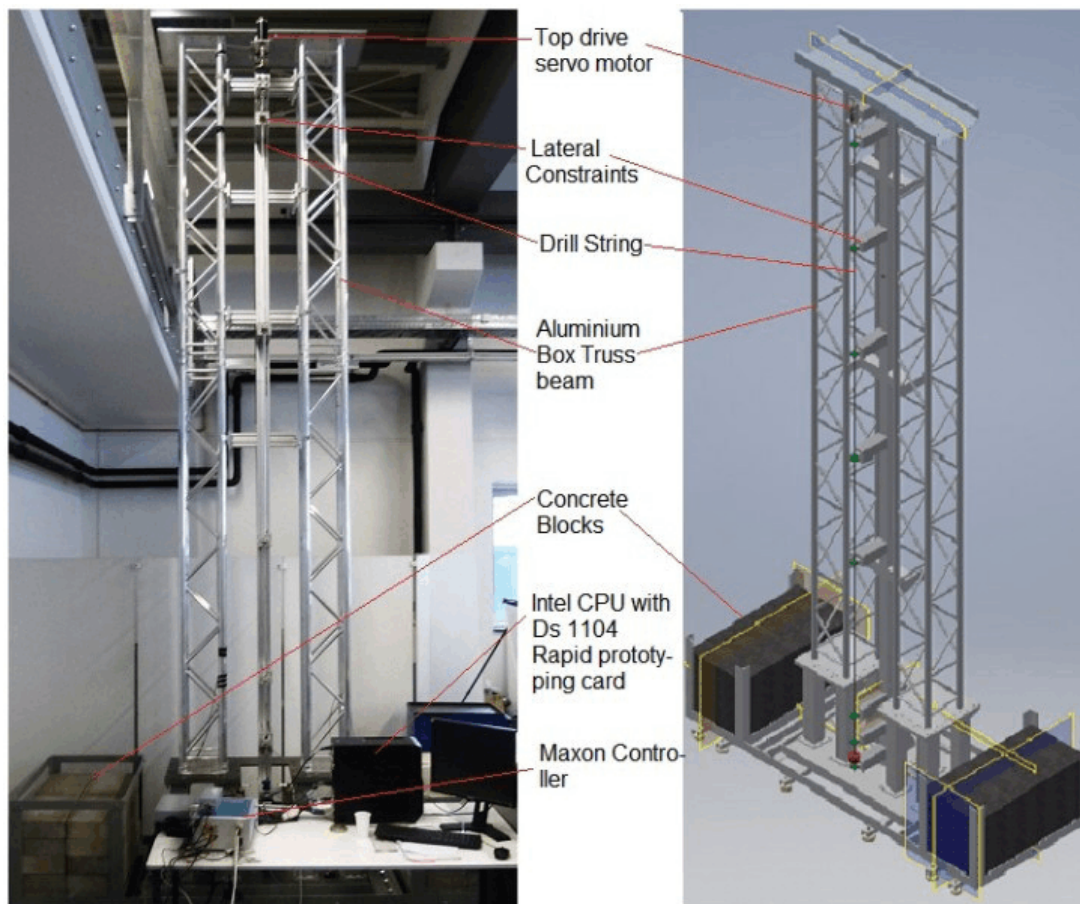


Abbildung 1: Experimenteller Teststand in Form eines vertikal angeordneten Borhstrangs am CZM [4, S. 28]

Im Anschluss erfolgt die Entwicklung der adaptiven Nachführung nichtlinearer Lasteingangsfunktionen, wobei die Ergebnisse aus der zuvor durchgeführten Berechnung des dynamischen Reibmoments sowie der Katalogisierung relevanter Lasteingangsfunktionen genutzt werden.

In einem zweiten Schritt wird eine selbsteinstellende Regelung für Mehrmassenschwinger (MMS)-Systeme höherer Ordnung, hier $n \geq 3$ entworfen, da in der gängigen Literatur zumeist eine Ordnungsreduktion der Systeme auf zwei Massen angestrebt wird [8, S. 122, 10, S. 21, 11, S. 34]. Eine entsprechende Ordnungsreduktion erzielt zwar einen im Vergleich verringerten Berechnungsaufwand, jedoch sind auch Dynamikverluste und eventuell auftretende Instabilitäten des Reglers die Folge.

Der Entwurf des Reglers geschieht hierbei, ausgehend von der modellierten Regelstrecke, im Zustandsraum hinsichtlich der Regelkreis-Stabilität, wozu auf die Ergebnisse und Erfahrungen

aus vorherigen Arbeiten am IEE im Bereich der Antriebstechnik zurückgegriffen wird ([8, 9, 10]). Des Weiteren wird die Wurzelortskurve als graphische Darstellung der Lage der Pol- und Nullstellen herangezogen, sodass über die Lage der Pole in der komplexen Ebene die Dämpfung der mechanischen Resonanzfrequenzen eingestellt werden kann.

Über den Beobachter lässt sich weiterhin die Lastdrehzahl, hier die Bohrkopfdrehzahl, erfassen, sodass mit der Einführung einer „Pseudo-Rotationsachse“ die Differenzbildung der Drehzahlen (hier: Bohrkopf, Antrieb) im Zuge einer Regelung ermöglicht wird. In Kombination mit dem Wurzelortkurvenverfahren (WOK) ergibt sich somit eine selbsteinstellende Regelung, welche in der Lage sein soll, präzise auf sich verändernde Randbedingungen in Tiefbohrprozessen zu reagieren.

Abschließend ist die Validierung des entwickelten Reglers zur adaptiven Lastnachführung geplant, wozu das IEE über einen geeigneten Motorenprüfstand verfügt. Dieser weist zwei Asynchronmotoren auf, welche mithilfe von zwei Planetengetrieben über eine torsionsweiche Welle miteinander verbunden sind und die Antriebs- / Lastseite nachbilden (s. Abbildung 2).

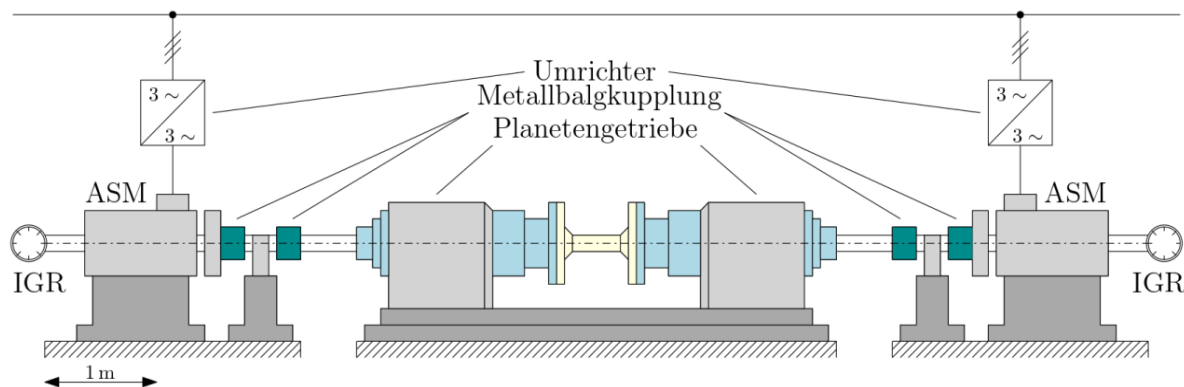


Abbildung 2: Seitenansicht des verfügbaren Motorenprüfstands am IEE inkl. der wesentlichen Komponenten

Da die derzeit verwendeten Umrichter nicht für eine Drehmomentregelung ausgelegt sind, ist die Beantragung neuer Geräte in Form von zwei Umrichtern zur Ergänzung des Prüfstands erforderlich. Hierzu wird der Motorenprüfstand derzeit wieder in Betrieb genommen und mit entsprechender Messtechnik zur Erfassung der Drehzahlen und Drehmomente ausgestattet.

Projektstand: Das Projekt befindet sich in der Antragsphase zur Förderung durch die DFG.

Projekt: DäToNa (geplantes DFG-Vorhaben)

- Publikationen:**
- [1] Alsaffar, Y. et al.: “Band Gap Characteristics of Nonrotating Passive Periodic Drill String”. In: Journal of Vibration and Acoustics 140.2 (2018). doi: 10.1115/1.4037851.
 - [2] Leine, R. I. et al.: “Stick-slip Whirl Interaction in Drillstring Dynamics”. In: Journal of Vibration and Acoustics 124.2 (2002). doi: 10.1115/1.1452745.
 - [3] Tang, L. et al.: “Study of the influences of rotary table speed on stick-slip vibration of the drilling system”. In: Petroleum 1.4 (2015). doi: 10.1016/j.petlm.2015.10.004
 - [4] Ullah, F. K.: “Control of friction-induced torsional vibrations in drilling”. Dissertation. Clausthal-Zellerfeld: TU Clausthal, 2019.
 - [5] Hohl, A. et al.: “The Nature of the Interaction Between Stick/Slip and High-Frequency Torsional Oscillations”. In: IADC/SPE International Drilling Conference and Exhibition SPE-199642-MS (2020). doi: 10.2118/199642-MS.
 - [6] Hohl, A. et al.: “Best Practices for Operations in HFTO Prone Applications”. In: SPE Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition SPE-202342-MS (2020). doi: 10.2118/202342-MS.
 - [7] Krämer, A. et al.: “Modellierung und Simulation von nichtlinearen Reibungseffekten bei der Lageregelung von Servomotoren”. In: FHWS SCIENCE JOURNAL 1.2 (2013).
 - [8] Goslar, Marius: “Ein Beitrag zur anwendungsorientierten Zustandsregelung elektrischer Hochleistungsantriebe”. Dissertation. Clausthal-Zellerfeld: TU Clausthal, 1998-08-14
 - [9] Beck H.-P.; Engel, B. (Hrsg.): New Control Concept for Overload Minimized Traction Drives. 6th European Conference on Power Electronics and Applications. Proceedings Traction (I). 1995.
 - [10] Engel, Bernd: “Verschleißmindernde Kraftschlußregelung mit Zustandsregler für elektrische Traktionsantriebe”. Dissertation. Clausthal-Zellerfeld: TU Clausthal, 1996-03-15.
 - [11] Faßnacht, Jochen: “Schwingungsbedämpfung in Servosystemen mit der direkten Drehmomentmittelwertregelung”. Dissertation. Darmstadt: TU Darmstadt, 2002-11-06

Projektlaufzeit: Die vorgesehene Projektlaufzeit beträgt 3 Jahre

<u>Gefördert durch:</u>	Das Projekt wird durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft gefördert.	
<u>Bearbeiter:</u>	Daniel Alexander Piontek, M. Sc. daniel.alexander.piontek@tu-clausthal.de	(Tel.: 72-2938)
<u>Projektleiter:</u>	Dr.-Ing. Dirk Turschner turschner@iee.tu-clausthal.de	(Tel.: 72-2592)

Projekt: Entwicklung eines magnetisch Leitfähigen Elastomers

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

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

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

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

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

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

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

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

Projektstand: Ein Messplatz zur Überprüfung der magnetischen Leitfähigkeit der Proben wurde eingerichtet. Hierbei wurden zwei unterschiedliche Messmethoden angewendet:

Messanordnung zur Messung der Permeabilität μ_r mit Hilfe eines einfachen Laboraufbaus (Eisenkreis, Bestimmung des magnetischen Widerstandes) - Methode 1

Zur Messung der magnetischen Permeabilität verschiedener Proben wurde im Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme der TU Clausthal ein Eisenkreis aufgebaut (Abbildung 1a)). Dieser Eisenkreis besteht aus einem U-förmigen, geblechten Eisenkern mit dem Schenkelquerschnitt 29x30mm. Über einen zusätzlichen Eisenkern (Anker), ebenfalls mit dem Querschnitt 29x30mm, kann der Eisenkreis geschlossen werden. Der U-förmige Eisenkern kann eine Spule aufnehmen. Für die Versuche wurde eine Spule mit 300 Windungen und einer maximalen Stromstärke von 4 A verwendet. Die zu untersuchenden Proben mussten zunächst auf das passende Maß gebracht werden, so dass sich diese in den Magnetkreis einsetzen lassen. Dabei war das Ziel, diese auf das Maß 29x30 des Eisenquerschnitts zu bringen. Außerdem sollte die Dicke der Probe möglichst 5mm nicht übersteigen um die Streuung des Feldes möglichst gering zu halten. Zusätzlich wurde in die Probe eine Nut mit einer Breite von 5 mm und einer Tiefe von 0,5 mm eingebracht. Da es sich bei der Probe um ein weiches, elastisches Polymer handelt, gestaltet sich die Bearbeitung schwierig. Die Nut hat die Aufgabe, die äußerst dünne und hochflexible Messsonde des Gaußmeters BGM 101 der Firma Brockhaus aufzunehmen. Die Messsonde selber darf beim Einbau in den Magnetkreis keinerlei Druck erfahren, da sie sonst beschädigt werden könnte. Das Gaußmeter ermöglicht die Messung des magnetischen Feldes durch Verwendung des Hall-Messprinzips.

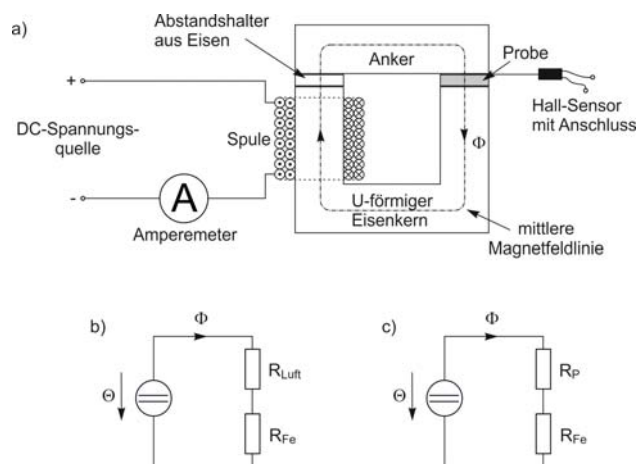


Abbildung 1: a) Versuchsaufbau zur Vermessung der Proben. b) Elektrisches Ersatzschaltbild des magnetischen Kreises mit Luftspalt. c) Elektrisches Ersatzschaltbild des magnetischen Kreises mit eingesetzter Probe

Der Magnetkreis wird zunächst mit der zu messenden Probe aufgebaut. Da die Proben unterschiedliche Dicken aufweisen, wird der Abstand zwischen U-förmigem Eisen und Anker auf einer der beiden Seiten mit dünnen Blechen gefüllt. Zur Bestimmung der magnetischen Widerstände wird nun zunächst die Probe wieder entfernt. Zurück bleibt der Eisenkreis mit Luftspalt. An der Spule wird über ein Netzteil ein konstanter Strom eingestellt und gemessen. Gleichzeitig erfolgt die Messung der Flussdichte B über das Gaußmeter im Luftspalt. Hierbei ist zu beachten, dass das Eisen nicht gesättigt wird. Über die Analogie des magnetischen Kreises zum elektrischen Stromkreis lassen sich jetzt die entsprechenden magnetischen Widerstände des Eisens und des Luftspalts ermitteln (Abbildung 1b)). Der magnetische Widerstand des Eisens ist $R_{Fe} = l_m / (\mu_0 \mu_r A_{Fe})$, der der Luft $R_{Luft} = l_{Luft} / (\mu_0 A_{Luft})$. l_m ist die mittlere Länge des Eisenkreises, l_{Luft} die Dicke des Luftspaltes. A_{Fe} und A_{Luft} ist der Querschnitt des Eisenkreises. Die Durchflutung $\Theta = N \cdot I$ lässt sich nun berechnen. Sie entspricht im elektrischen Stromkreis der Spannung. Der Fluss $\phi = B \cdot A$, der im elektrischen Kreis dem Strom entspricht, kann nach Messung der Flussdichte B berechnet werden. In Analogie zum Ohmschen Gesetz und den Kirchhoffschen Regeln (Maschengleichung) kann jetzt folgende Beziehung aufgestellt werden: $\Theta = \phi \cdot R_{Fe} + \phi \cdot R_{Luft}$. Umstellen der Gleichung liefert die Rechenvorschrift für den magnetischen Widerstand des Eisens: $R_{Fe} = \Theta / \phi - R_{Luft}$.

R_{Luft} lässt sich über die geometrischen Abmessungen bestimmen. Ist R_{Fe} nun bekannt, wird die Probe eingesetzt und die Messung wiederholt. Bei gleicher Stromstärke verändert sich nun der Fluss, wenn die Permeabilität der Probe größer als die von Luft ist, also größer als die Permeabilität von Luft. Aus dem magnetischen Widerstand der Probe R_p kann dann die relative Permeabilität μ_r ermittelt werden (Abbildung 1c)). Für den Magnetkreis mit Probe gilt nun folgende Gleichung: $\Theta = \phi \cdot R_{Fe} + \phi \cdot R_p$. Sie lässt sich nach R_p umstellen: $R_p = \Theta / \phi - R_{Fe}$. Der Wert für R_p ergibt sich aus der Messung und dem vorher bestimmten Eisenwiderstand R_{Fe} . Für den magnetischen Widerstand der Probe gilt $R_p = l_p / (\mu_0 \mu_r A_p)$. Aufgelöst nach μ_r ergibt sich die gesuchte Größe $\mu_r = l_p / (\mu_0 R_p A_p)$.

Die größte Schwierigkeit ist die mechanische Nachbearbeitung der Probe. Die Probe sollte möglichst dünn sein, um die Streuung zu reduzieren. Zusätzlich muss eine Nut zur Aufnahme der Messsonde ins Material eingebracht werden. Diese Nut verändert die Materialdicke und verfälscht die Messung. Im weiteren Verlauf des Projektes wurde daher eine weitere Messanordnung der Firma Brockhaus auf ihre Eignung hin überprüft. Beide Messverfahren werden gegenübergestellt. Nachteile der neuen Messmethode sind die relativ hohen Anschaffungskosten. Beschreibung der Messanordnung zur Messung der Permeabilität μ_r mit Hilfe einer Helmholtz-Spule über Bestimmung der magnetischen Polarisation – Methode 2

Die Messanordnung besteht aus den Komponenten Helmholtzspule mit einem mittleren

Durchmesser von 200 mm, dem Gaussmeter BGM 101 zur Messung der magnetischen Flussdichte B und dem Fluxmeter F10 zur Messung des magnetischen Momentes M . Abbildung 2 zeigt die Messanordnung.



Abbildung 2: Messplatz zur Messung der magnetischen Leitfähigkeit, bestehend aus Gaußmeter, Flussmeter und Helmholtz-Spule. Während der Versuchsdurchführung wird innerhalb einer Helmholtzspule das magnetische Moment M ermittelt.

Die Streuung bei Methode 2 gegenüber Methode 1 fällt deutlich geringer aus. Die Unterschiede zu Methode 2 sind insgesamt gering, allerdings lassen sich die Ergebnisse bei Methode 2 leichter reproduzieren. Die Messergebnisse wurden mehrfach wiederholt und mit gelegentlichen Abweichungen der dritten Nachkommastelle bestätigt. Die gewünschte Permeabilität von 100 konnte leider in keiner Probe erreicht werden. Die Ergebnisse lagen deutlich darunter.

Die Abbildung 3 zeigt eine makroskopische Aufnahme der Oberfläche von Probe 4. Die Eisenspäne zeichnen sich deutlich vom umgebenden Polymer ab. Die Untersuchung mehrerer Proben zeigte, dass der Flächenanteil der eingeschlossenen Partikel etwa 4 bis 7 % der Gesamtfläche ausmachte. Auch wenn man von der Fläche nicht auf das Volumen schließen kann, so wird wohl der geringe Flächenanteil hauptverantwortlich für die schlechten Ergebnisse sein.

Projekt: Entwicklung eines magnetisch Leitfähigen Elastomers

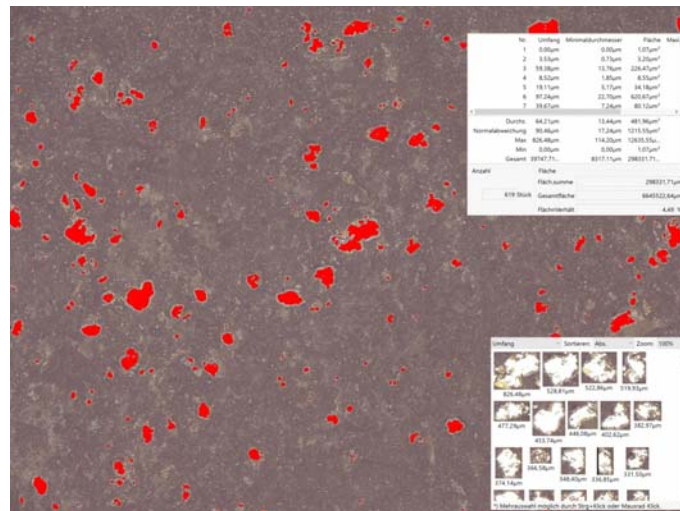


Abbildung 3: Vergrößerung der Oberfläche von Probe 4. Deutlich sichtbar heben sich die rot eingefärbten Eisenspäne vom umgebenden Polymer ab.

Die weichmagnetischen Partikel besitzen einen Flächeninhalt von 4,5 % an der Gesamtfläche.

Projektpartner:

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

Projektlaufzeit:

2018 - 2020

Gefördert durch:

Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) , BMWi

Bearbeiter:

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

Projektleiter:

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

IEE

Projektübersicht

Abteilung Elektrische Energiespeichersysteme, Forschungszentrum für Energiespeichertechnologien (EST)

Abteilungsleiter: Dr.-Ing. Ralf Benger
Tel.: +49-5321-3816-8067
E-Mail: ralf.benger@tu-clausthal.de
Wiss. Betreuung: Prof. Dr.-Ing. H. -P. Beck

Forschungsschwerpunkte und Projekte

Die Jahre 2020 und 2021 in der Arbeitsgruppe Energiespeichersysteme waren geprägt durch das Auslaufen der vom BMWi geförderten Verbundprojekte ReserveBatt und MoBat und den sich thematisch anschließenden neuen Projekten GridBatt und RiskBatt, dem weiteren Auf- und Ausbau der Prüfkapazitäten und des Batterietestzentrums am Standort des Forschungszentrums Energiespeichertechnologien (EST) in Goslar und der damit einhergehenden wissenschaftlichen Fokussierung auf das sicherheitstechnische Verhalten von Lithium-Ionen-Batterien. Die weite Durchdringung von Lithium-Ionen-Batterien in den verschiedensten Anwendungen, die stark steigenden Zulassungszahlen bei Elektrofahrzeugen und die öffentlichkeitswirksame Berichterstattung über Batterieunfälle führen zu einer gestiegenen Sensibilisierung in Bezug auf sicherheitstechnische Fragestellungen.

Die mit ReserveBatt begonnene Charakterisierung von elektrochemischen Systemen auf Laborzellebene und die Untersuchung des Halbzellverhaltens wird in den kommenden Arbeiten fortgesetzt. Auch Dank einer Finanzierung aus dem Forschungspool der TUC ist Ende 2021 die Beschaffung eines temperaturgeregelten Testsystems für Laborzellen in die Wege geleitet worden. Zu Beginn 2022 stehen dann zusätzliche 16 Testkanäle einschließlich Potentiostaten und Elektrochemischer Impedanzspektroskopie für Laborzellen zur Verfügung. Hiermit werden zukünftig auch Material- und Charakterisierungsversuche mit Aluminium-Ionen-Batterien im Rahmen von GridBatt durchgeführt werden.

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

Systemintegration

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

Aus wissenschaftlicher Sicht ist daher insbes. die Weiterentwicklung von Batteriemodellen für den hochdynamischen Einsatz und die Auswirkungen großer Leistungsgradienten auf das elektrische und thermische Verhalten allgemein und auf die Lebensdauer von Batterien im Speziellen von großem Interesse. Dieses spiegelt sich insbesondere in den neu begonnenen Projekten GridBatt und LiBatt wider.

Batteriezuverlässigkeit und -sicherheit

Mit immer größer werdenden spezifischen Energie- und Leistungsdichten beherbergen insbesondere elektrochemische Speicher auch ein wachsendes (latentes) Gefahrenpotential. Die Einführung neuer Materialkombinationen und immer größer werdende Anforderungen an die Speichersysteme bei gleichzeitigem Kostendruck erfordern daher sowohl für mobile als auch stationäre Anwendungen Forschungsarbeiten zur sicheren und zuverlässigen Anwendung von Batterien auf Zell-, Modul- und Systemebene. Dementsprechend sind ausgehend von kleinen Halbzellen bis hin zu großen Batteriesystemen die elektrochemischen, elektrophysikalischen und thermodynamischen Vorgänge zu erkennen, zu verstehen und spezifische Handhabungsregeln zu erstellen. Mit mehreren Studien zu Stabilitätskriterien und Erkennungsmöglichkeiten kritischer Zustände von Lithium-Ionen-Batterien für den europäischen Automobilherstellerverband ACEA und dem hieraus entwickelten Projekt RiskBatt wurden und werden die Kompetenzen der Arbeitsgruppe weiter ausgebaut.

Projektübersicht

Projektübersicht

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

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

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

Projektkoordinator: Dr. Benger

Projektleiter: Prof. Beck

- **Momentanreserve mit Hochleistungsbatterien (ReserveBatt)**

Wie sich eine Hochleistungsbatterie zur Erbringung von Momentanreserve zur Netzstabilisierung verhält und wie sich die Belastungen aus den zu erbringenden Systemdienstleistungen auf das Alterungsverhalten auswirken, wurde in diesem vom BMWi geförderten Projekt untersucht. Dabei wurden insbesondere die Auswirkungen von dynamischen Belastungen und sog. Mikrozyklen im Subsekundenbereich auf die Degradation eines Lithium-Ionen-Batteriespeichers betrachtet sowie die Rückwirkungen auf das Gesamtsystemverhalten einschließlich der netzstabilisierenden Wirkung betrachtet. Ein entsprechendes Demonstratorsystem in nennenswerter Leistungsklasse (400kVA) bestehend aus Lithium-Ionen-Batteriesystem und Umrichter (nach dem Prinzip der Virtuellen Synchronmaschine) wurde in zwei Entwicklungsstufen am Batterietestzentrum in Goslar aufgebaut und erfolgreich getestet.

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

Dipl.-Ing. Eric Tchoupou Lando

Projektkoordinator: Dr. Benger

Projektleiter: Prof. Beck

- **Batterietechnologien zur Sicherstellung eines stabilen Netzbetriebs (GridBatt)**

Wie bereits aus „ReserveBatt“ erkennbar, bestehen oftmals Unklarheiten bzgl. der Auslegung und Dimensionierung eines Speichersystems, wenn eine im Vergleich zum Energieinhalt hohe oder sehr hohe Leistung benötigt wird. Idealerweise stellt ein Speicher über einen möglichst großen Zeit- (μs bis Stunden) bzw. Frequenzbereich (mHz bis kHz) eine hohe Leistung zur Verfügung. Immer leistungsfähigere Lithium-Ionen-Batterien haben den Einsatzbereich elektrochemischer Speicher stark aufgeweitet, so dass sie bereits heute in Konkurrenz zu klassischen Leistungsspeichern wie Kondensatoren, Doppelschichtkondensatoren (DSK) und Schwungmassenspeichern (SMS) treten können. Es gibt jedoch immer noch Anwendungen, in denen Kondensatoren, DSK, SMS eine zu geringe Energiedichte (spezifisch bezogen auf Masse oder Kosten) aufweisen, Batterien auf Grund zu kleiner Leistungsdichten diese Anforderungen aber ebenso wenig erfüllen können und entsprechend überdimensioniert werden müssten. So zeigte sich beispielsweise im Projekt „ReserveBatt“, dass ein Speicher zur Erbringung von Momentanreserve ein Leistungs- zu Energieverhältnis von $200/1 \text{ h}^{-1}$ ($400\text{kW}/2\text{kWh}$) haben sollte, wenn das System (leistungsbezogen) ideal auslegt ist. Hierfür fehlt der „ideale“ Speicher. Aluminium-Ionen-Batterien könnten nach jetzigem Stand der Technik diese Lücke schließen. Um das Potential von Aluminium-Ionen-Batterien für diese hohen dynamischen Anforderungen zu evaluieren, werden diese in GridBatt entsprechend untersucht und charakterisiert, ihre elektrochemischen Eigenschaften ermittelt und hiermit Modelle zur Beschreibung des (dynamischen) Strom-Spannungsverhaltens erstellt.

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Frank Deblon, Jacob Klink, M. Sc.

Projektkoordinator: Dr. Bengler

Projektleiter: Prof. Beck

- **Risikoanalyse für lithiumionenbasierte Energiespeichersysteme im sicherheitskritischen Havariefall unter besonderer Berücksichtigung der dabei freigesetzten toxischen und explosiven Schadgase (RiskBatt)**

Aus der Verwendung Lithiums in Batteriesystemen resultiert eine gewünscht hohe spezifische Energiedichte, aber mit der hohen Reaktivität des Lithiums auch ein potentiell gefährliches Zellsystem. Insbesondere im Schadensfall, z. B. durch mechanische Beschädigung oder dem Betrieb außerhalb der Betriebsgrenzen, kommt es immer wieder zu sicherheitskritischen Zuständen und der einhergehenden Gefährdung für Mensch und Umwelt. Im Fall eines thermischen Durchgehens (Thermal Runaway) können große Wärme-

Projektübersicht

mengen und z.T. giftige Substanzen schlagartig freigesetzt werden. Daher ist es erstrebenswert, Lösungsansätze zur Risikobewertung und zur Schadensminimierung von Lithium-Ionen-Batterien zu erarbeiten. Die Entwicklung von präventiven Maßnahmen, frühzeitigen Detektionsmöglichkeiten und geeigneter Schutzausrüstung für Rettungskräfte sind hierbei wichtige Ansätze. Übergeordnet für alle Maßnahmen steht das Verständnis für die Entwicklung und Ausprägung von sicherheitskritischen Zuständen. So werden im RiskBatt-Projekt eine Vielzahl verschiedener Batteriefehler initiiert, charakteristische Größen aufgezeichnet und bewertet sowie in einer Datenbank abgelegt.

Bearbeiter: Jens Grabow, M. Sc., Nury Orazov, M. Sc.

Wiss. Betreuung: Prof. Dr.-Ing. H.-P. Beck

Projektleiter: Dr. Bengler

- **Entwicklung einer Messumgebung zur Magnetfeld- und Stromdichtemessung an Lithium-Ionen-Batterien (LiBat)**

Derzeit steigt die Nachfrage nach Hochleistungsbatteriesystemen für mobile oder stationäre Anwendungen. Die hierfür erforderlichen hohen Stromraten stellen gesteigerte Ansprüche an das Zelldesign und deren Kontaktierung, um Lebensdauer- und Sicherheitsanforderungen zu genügen. Es bestehen wenige Methoden zur ex-situ-Charakterisierung der Alterung und Sicherheit von Batteriezellen. Eine vielsprechende Methode ist die Bestimmung der Stromdichteverteilung innerhalb der Zelle. Die zu entwickelnde Messumgebung ermöglicht die bisher einmalige kontaktlose Bestimmung von Stromstärke und -richtung mittels flächiger Magnetvektorfeldanalyse und bietet somit eine orts aufgelöste Übersicht von Stromdichte und resultierendem Magnetfeld. Hiermit können voraussichtlich limitierende Strompfade, fehlerhafte Kontaktierungen oder auch sich anbahnende interne Kurzschlüsse detektiert werden. Ebenso ist die Analyse von ggf. auftretenden Stromverdrängungseffekten bei hochdynamischen Belastungen möglich. Der aktuelle Stand der Technik erlaubt lediglich punktuelle Messungen ohne Visualisierung, so dass durch die Entwicklung die Forschungs- und Analysemöglichkeiten grundlegend ausgebaut werden.

Bearbeiter: Marcel Thiele, M. Sc.

Wiss. Betreuung: Prof. Dr.-Ing. H.-P. Beck

Projektleiter: Dr. Bengler

IEE

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

Ziel: Das Projekt „MoBat“ (Modulare Hochleistungsbatteriesysteme in Verbindung mit sicherer Schnellladetechnik) wurde Anfang 2021 abgeschlossen. Ziel war die Entwicklung eines modularen Hochleistungsbatteriesystems, welches durch Skalierbarkeit für verschiedenste Anwendungen genutzt werden kann. Voraussetzung für einen praktischen Einsatz ist die Bereitstellung von Schnellladesystemen bestehend aus Hochleistungsbatterien mit kompatibler Ladetechnik. Des Weiteren sind für Schnellladungen hohe Stromstärken erforderlich. Zum einen bestanden die Herausforderungen im Bereitstellen hoher elektrischer Leistungen mit einer neu entwickelten, angepassten Ladetechnik, zum anderen in den mit Schnellladungen verbundenen extremen elektrischen und thermischen Belastungen der verwendeten Batterien. Darüber hinaus waren die damit einhergehende Sicherheits- und Lebensdaueroptimierung Bestandteil der Arbeiten. Vorrangig wurde das Zusammenwirken von vergleichsweise kleinen, aber besonders leistungsstarken Lithium-Batterien und effizienter Ladetechnik optimiert. Dadurch ließen sich gezielt die Vorteile für den Einsatz einer Schnellladestrategie in Hochleistungsanwendungen, zum Beispiel für Elektrobusse und andere Heavy-Duty-Anwendungen, herausarbeiten.



Abbildung 1: Während der Projektlaufzeit entwickelter Prototyp des modularen Hochleistungsbatteriesystem [Quelle: AKASOL GmbH]

Projektstand: Im ersten Arbeitspaket war vor allem die konzeptionelle Entwicklung der Batteriemodule und -tröge, welche unter Beteiligung von vier Projektpartnern vorgenommen wurde, von Bedeutung. Die Umsetzung des erarbeiteten Konzeptes fand dabei unter besonderer Beachtung des Brandschutzes statt. Dabei wurden grundlegend zwei Linien durch den Hersteller der Batterietröge, die AKASOL AG, verfolgt. Eine konventionelle Lösung, die während der Projektlaufzeit innovativ verbessert wurde und eine Vorstudie mit einem Rundzellenmodul. Die Umsetzung erfolgte an der konventionellen Lösung, deren Energieinhalt und Leistungsfähigkeit

durch die Nutzung neuer Zellen im herkömmlichen Format erhöht werden konnten. Um den damit einhergehenden Verlust an Sicherheit kompensieren zu können, war die Einbringung von Brandschutzlösungen auf allen Systemebenen wichtig. Für die Überwachung zentraler Betriebsdaten mittels des Einsatzes faseroptischer Sensoren wurden die Voraussetzungen diskutiert und geschaffen. Beides hatte unmittelbare Folgen für die Fertigung der Systeme. Während der Fertigungsphase wurden nützliche Brandschutzkonzepte, wie die Verwendung von EneX-Zwischenlagen und Schadgasfiltern in das System eingebracht. Die Fertigung der Prototypen für die experimentelle Anwendung wurde von drei Projektpartnern in Zusammenarbeit durchgeführt. Am Standort in Goslar erfolgten zum Projektende letzte Abstimmungsarbeiten zur Integration in die experimentelle Umgebung, sodass ein fertiges modulares Batteriesystem, bestehend aus zwei Batterietrögen, für Testreihen zur Verfügung stand. Zur Auslegung solcher modularen Batteriesysteme wurden Kriterien identifiziert, welche die technischen und ökonomischen Restriktionen von Anwendungen berücksichtigen. Diese wurden in ein Planungstool überführt.

Um den stabilen und langfristigen Betrieb des faseroptischen Batteriemanagementsystems sicherstellen zu können, wurde innerhalb der Projektlaufzeit die Abstimmung der Datenauswertung auf die Sensortechnik verbessert. Ergebnis der Arbeiten ist ein geringeres Rauschniveau bei der Aufzeichnung der Signale. Weiterhin wurde eine Anpassung der Leistungsfähigkeit für die Datenaufzeichnung der wesentlichen Messwerte im Betrieb vorgenommen. Damit wurde ein photonisches Messsystem zur Verfügung gestellt, welches hinsichtlich der Messqualität der elektrischen Technologie ebenbürtig ist. Durch den Einsatz kleinerer Bauteile und die Einsparung des optischen Schalters konnten entscheidende Verbesserungen in Bezug auf die Größe der Messeinheit erreicht werden. Dabei stand die Anpassung des Systems an die Anforderungen aus dem Betrieb im Vordergrund der Arbeiten. Eine Validierung des faseroptischen Managementsystems fand in Leistungsversuchen statt. Die Ergebnisse aus den folgenden Abuse-Versuchen wurden entsprechend eingeordnet. Als Ergebnis steht ein parallel zur konventionell verwendeten Technik laufendes System zur Überwachung von Temperatur und Dehnung zur Verfügung, welches mit dem konventionellen BMS gekoppelt ist und bei sicherheitskritischen Zuständen das gesamte System abschalten kann.

Im Rahmen von Versuchen wurden auf verschiedenen Ebenen des Batteriesystems Vermutungen aufgestellt und überprüft sowie in einem zweiten Schritt auf die anderen Ebenen des Systems skaliert. Diese Skalierung wurde in praktischen Versuchen verifiziert oder nach Auswertung von Messergebnissen an die jeweilige Ebene so angepasst, dass nutzbringende Ergebnisse erzielt werden konnten. Die Evaluation der Ladealgorithmen fand in einer ersten Stufe an zwei unterschiedlichen Zellformaten statt, die beide für die Verwendung im Projekt in

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

Frage kamen. So konnten Risiken, die bei Anwendung von innovativen Ladeverfahren entstehen können, durch die Größe der getesteten Einheiten reduziert werden.

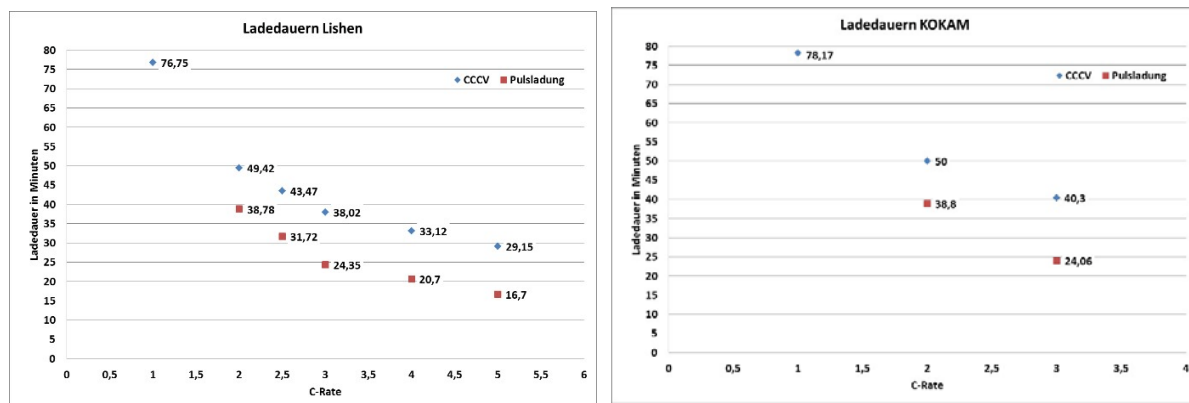


Abbildung 2: Vergleich der Ladedauern über C-Rate zwischen Standard- und Puls-ladeverfahren für die LISHEN-Zelle (links) und die KOKAM-Zelle (rechts)

Darüber hinaus waren auf diesem Weg lokale Phänomene überprüfbar. Aus dem Vergleich der beiden Ladeverfahren, klassische CCCV-Ladung und Pulsladung, ging das Puls-ladeverfahren unter dem Aspekt der Schnellladung zur Reduktion der Ladedauer als am besten geeignet hervor. Mit entsprechend hoher Stromrate (5C) konnte die Ladezeit für eine vollständige Ladung der Zelle auf unter 17 Minuten reduziert werden (Abbildung 2). Das ausgewählte Ladeverfahren wurde im Anschluss auf die Modul- und Batterieebene skaliert. In den folgenden Testreihen wurde die Homogenität des Verhaltens der Einzelzellen im Modul und auf Batterieebene betrachtet. Die Ergebnisse belegen eine homogene Verteilung der Temperaturen in der Batterie. Dabei kommt es zu Abweichungen von maximal 4K zwischen den Zellen bei höchster getesteter Ladeleistung bei Verwendung der Flüssigkeitskühlung. Durch die schrittweise Erhöhung der Laderate auf 2,5C für das gesamte Batteriesystem konnte die Ladedauer um mehr als 30 % auf 25 Minuten gesenkt werden. Somit wurde das Projektziel einer Ladedauer für eine vollständige Ladung von unter 30 Minuten deutlich unterschritten. Darüber hinaus wurde für den Fall des Zwischenladens (oppertunity charging) eine Reduktion der Ladedauer von 60 % für das SOC-Fenster von 80 bis 100 % erreicht.

Ein zentrales Arbeitspaket war die Überprüfung der Modulsicherheit im Fehlerfall. Zur Erfüllung des Arbeitspaketes wurden im Forschungszentrum Energiespeichertechnologien (EST) verschiedene Arbeiten zur Planung der Versuche vorgenommen. Darüber hinaus hatte das EST in diesem Arbeitspaket eine koordinierende sowie unterstützende Funktion inne. Diese erstreckt sich auf die Vorschläge zur Durchführung, Bereitstellung der Testinfrastruktur im Batterietest-

zentrum der TU Clausthal (BSTZ), Begleitung der Tests sowie die Vor- und Nachbereitung der Tests im BSTZ. Die Abuseversuche im BSTZ waren auf die Modulebene beschränkt und hatten zur Aufgabe, die Wirksamkeit von Zwischenlagen aus einem bestimmten Brandschutzmaterial in Bezug auf die thermische Propagation im Modul nachzuweisen. Ähnliche Versuche, die das gleiche Ziel auf Ebene der Systeme (Tröge) verfolgten, wurden parallel von der AKASOL AG durchgeführt. In beiden Fällen konnte die thermische Ausbreitung zumindest verzögert werden. Im Fall des Moduls wurde die Propagation komplett gestoppt.

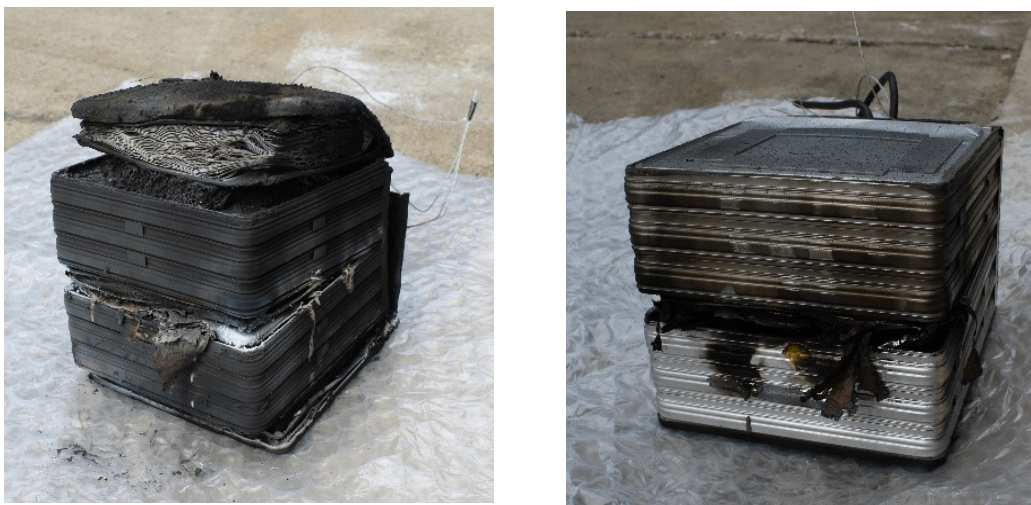


Abbildung 3: Modul ohne Brandschutzlagen (links) mit Brandschutzlagen (rechts) nach Abuse-Test mit Initialisierung durch das gezielte Überladen einer Zelle im mittleren Bi-Pack

Demnach kann durch das Brandschutzmaterial bei entsprechender Einbringung einer ausreichenden Menge die thermische Ausbreitung und somit das Havarieverhalten von Batteriesystemen gezielt beeinflusst werden (vgl. Abbildung 3). Anschließend wurden die Ergebnisse mit den beteiligten Partnern diskutiert und veröffentlicht. Durch das von der Firma Stöbich technology GmbH verwendete Filtermaterial konnte die Schadstofflast in der Umgebung von havarierten Modulen deutlich reduziert werden, sodass die IDHLWerte (Immediately Dangerous to Life and Health) eingehalten werden konnten. Dies wurde auf Ebene von Zellen und Modulen in verschiedenen Versuchen nachgewiesen. Nach Bewertung aller Versuche ist ein kombiniertes Konzept aus Brandschutzlagen, Brandschotten und Schadgasfiltern zur optimalen Absicherung der Batterien geeignet. Verbesserungen an einzelnen Bestandteilen des Konzeptes, wie beispielsweise am Schadgasfilter, konnten durch entsprechende Versuche mit eigens entwickelter Testumgebung nachgewiesen werden.

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

Nach der Ermittlung des Arbeitsbedarfs durch eine Analyse der Anforderungen an die Ladetechnik, die sich aus der Anwendung ergeben, erfolgte der Abgleich dieser Anforderung für den Pantographen mit zwei bestehenden Lösungen der Schunk Transit Systems GmbH. Die Analyse ergab, dass der Dachladestromabnehmer besser für eine Anpassung an die Anforderungen geeignet ist. Deshalb wurde diese Variante als Lösung innerhalb des Projektes favorisiert. Der Abnehmer stellt die zentrale Komponente zur Leistungsübertragung dar. Nach Erfüllung der technischen Voraussetzung trat die Reduktion von Kosten innerhalb von Fertigung und Montage in das Zentrum der Arbeiten. Dieses Ziel wurde durch ein verbessertes fertigungs- und montagegerechtes Design erreicht. Beispiele dafür sind die Reduktion der Kontaktflächen und der Einsatz von verschiedenen Beschichtungsmaterialien. Die Auswirkungen dieser Designanpassung auf Ergebnisse der Belastungstests wurden ebenfalls dokumentiert.

Federführend wurde die Installation des Demonstrator-Systems in eine Testumgebung vom EST bearbeitet. Die Errichtung der Anlage war Voraussetzung für die Stromtragfähigkeitstests des Dachladestromabnehmers und die Ladetests am Batteriesystem. In Zusammenarbeit mit den Projektpartnern Schunk Transit Systems GmbH und AKASOL AG wurde ein Demonstrator im BSTZ aufgebaut, der aus einem Hochleistungs-ladesystem, einer modular aufgebauten Batterie mit entsprechenden Kommunikations- und Sicherheitseinrichtungen, besteht.

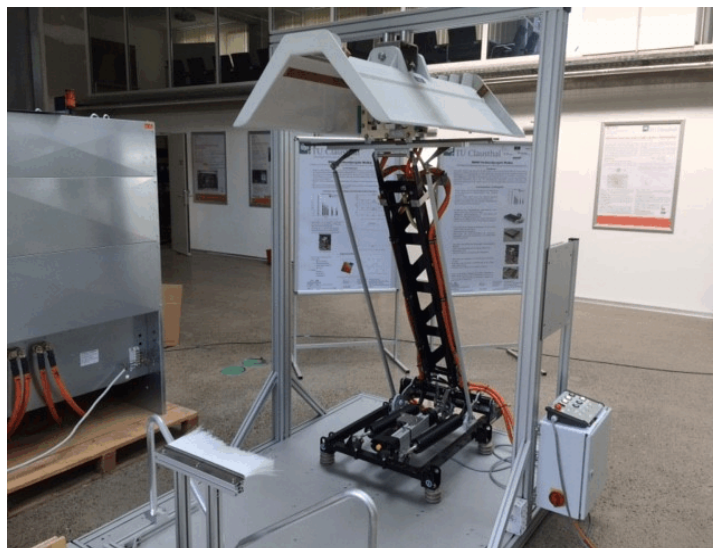


Abbildung 4: Gesamtsystem im Batteriezentrum

Durch zahlreiche Versuche in dieser Testumgebung konnten viele Erkenntnisse für die Schnellladung des Batteriesystems und die Stromtragfähigkeit des Dachladestromabnehmers über die vorher geplanten höchsten Ladeleistungen hinaus gesammelt werden. Während der Projektlaufzeit stiegen die Anforderungen immer weiter hin zu höheren Leistungen. Um die

geforderte Leistung erbringen zu können, wurde ein Prüfstand mit einer maximalen Leistung von bis zu 1,2 MW verwendet. Dieser wurde während der Projektlaufzeit so angepasst, dass im Demonstrator-System eine Leistung von 600 kW für die Versuche zur Stromtragfähigkeit des gesamten Konzeptes verwendet werden konnte. Damit wurde die im Antrag angestrebte Leistung für den Demonstrator nicht nur erreicht, sondern verdoppelt. Die Testreihe endete mit einem sehr positiven Ergebnis und der Bestätigung, dass das im Projekt aufgebaute und weiterentwickelte Ladesystem alle Anforderungen bei einer maximalen Ladeleistung von bis zu 600 kW erfüllt. Ein weiteres Ergebnis der Arbeiten aus dem Projekt ist neben den erfolgreichen Tests eine Anforderungsliste, welche sich aus dem Zusammenspiel von Aktivitäten in der Normungsgruppe durch die Schunk Transit Systems GmbH und den Resultaten aus dem Testfeld ergaben.

Zentral für das letzte Arbeitspaket des Projektes waren die Lebensdaueruntersuchungen. Dabei wurden die Langzeituntersuchungen auf Ebene der Einzelzellen mit verschiedenen Ladeverfahren durchgeführt und ausgewertet. Anschließend wurden die Ergebnisse auf die Batteriemodule und -systeme übertragen. Die Übertragbarkeit bezüglich der Lebensdauer wurde durch die Verwendungen von Batteriemodellen hinsichtlich der Veränderungen von elektrochemischen Eigenschaften gestützt.

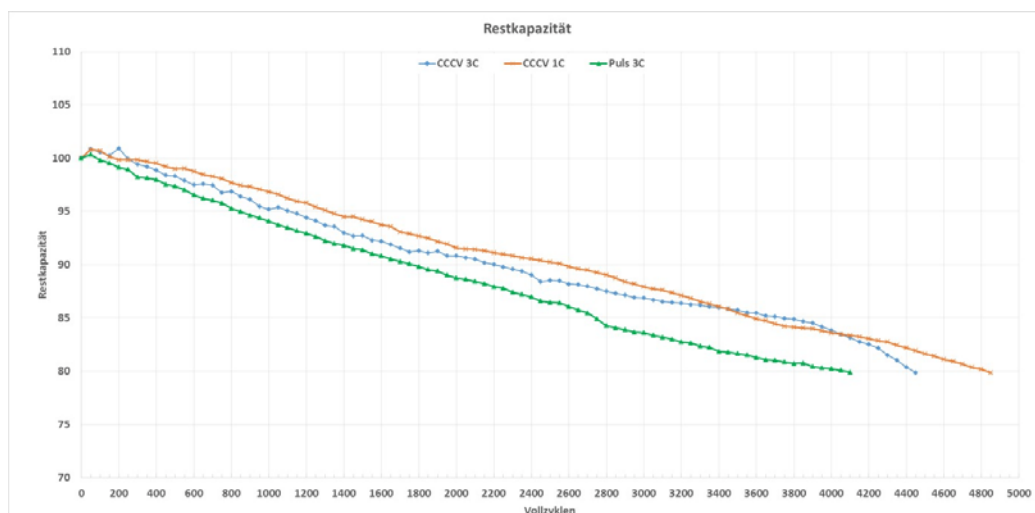


Abbildung 5: Darstellung des Kapazitätsverlusts verschiedener Ladeverfahren über die durchlaufenen Vollzyklen

Projektpartner:

- AKASOL AG
- Schunk Bahn- und Industrietechnik GmbH
- Wolfsburg AG

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

- Fraunhofer HHI
- Stöbich technology GmbH

Projektlaufzeit: 01.11.2016 - 30.04.2020

Projektträger: Forschungszentrum Jülich GmbH

Gefördert durch: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

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

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

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

IEE

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

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

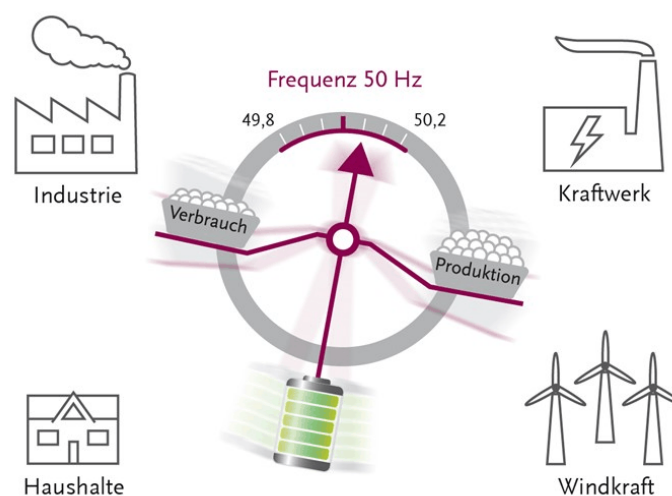


Abbildung 1: Darstellung des Gleichgewichts im elektrischen Energieversorgungssystem zwischen fluktuierender Erzeugung und Verbrauch

Ziel: Die Ziele des Gesamtprojekts sind die Konzeption und der Aufbau eines Demonstrators zur Erbringung von Momentanreserve als Systemdienstleistung nach dem vom IEE patentierten Verfahren der Virtuellen Synchronmaschine – kurz VISMA - für Betreiber von Energieversorgungsnetzen sowie die Erforschung seines Verhaltens in der Praxis und dessen Bewertung in Bezug auf den vorgesehenen späteren Einsatzbereich. Abgerundet wird das Projekt durch den Entwurf und die Evaluierung von Verwertungsmöglichkeiten und möglichen Geschäftsmodellen für die Erbringung von Systemdienstleistungen. Der Demonstrator enthält als Kernkomponente einen sogenannten Stack-Wechselrichter, der im Rahmen des Projekts konzipiert und aufgebaut werden soll. Der Stack-Wechselrichter koppelt eine Lithium-Ionen-Hochleistungsbatterie mit dem Versorgungsnetz und steuert den Energiefluss zwischen beiden Systemen. Der Demonstrator soll im Leistungsbereich von 400 kVA mit einem Batteriespeicher bei einem Energieinhalt von etwa 50 kWh ausgelegt werden.

Projektstand: Im Mai 2021 konnte das Projekt erfolgreich abgeschlossen werden. Der im Projekt aufgebaute 400 kVA-Batterie-Wechselrichter-Demonstrator wurde dazu in die Feldumgebung des Energiecampus in Goslar integriert und getestet. Die folgende Abb. 2 zeigt das am Energiecampus installierte Demonstratorsystem der Integrationsstufe Pilot 1, mit welchem die wesentlichen Projektergebnisse gewonnen werden konnten.

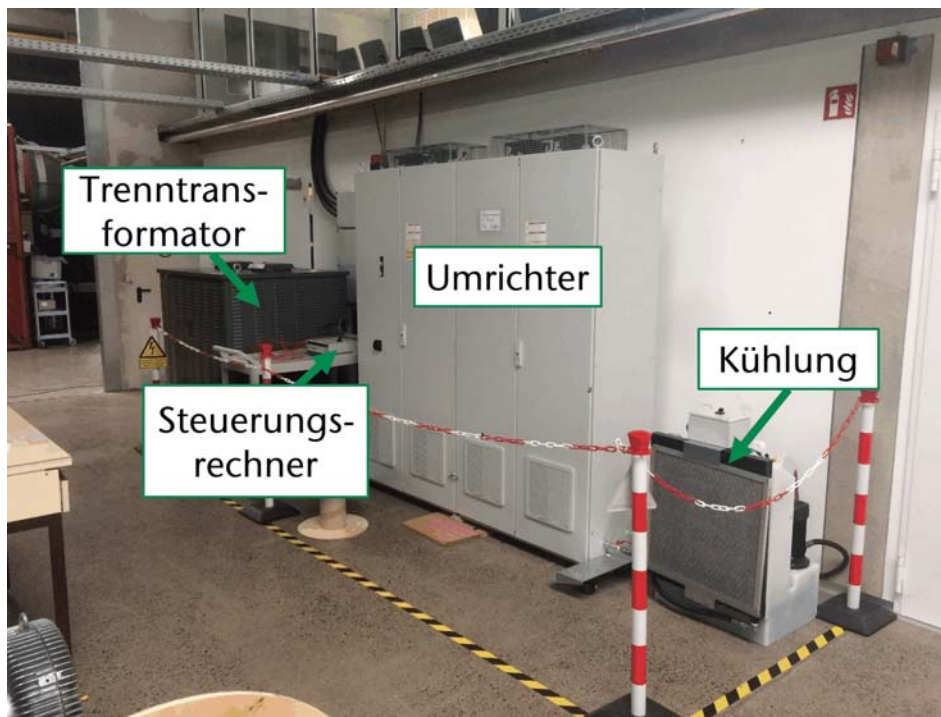


Abbildung 2: Integriertes 400 kVA-ReserveBatt-Umrichtersystem Pilot 1 am Energiecampus

Mithilfe des 400 kVA-Demonstratorsystems konnte gezeigt werden, dass Momentanreserve im großen Stil auf Niederspannungsebene bereitgestellt werden kann. Wesentlich sind dabei die Erkenntnisse wie das Virtuelle Synchronmaschinen-Modell ideal parametrisiert werden kann, um das volle Leistungspotential des Wechselrichters auszunutzen. Auch konnte im Projekt gezeigt werden, dass im Wesentlichen alle betrachteten Speichersysteme bis hin zum SuperCap, sofern für die Leistung und die benötigte Energie entsprechend dimensioniert, im Prinzip in der Lage sind, Momentanreserve bereitzustellen. Dabei zeigt sich, dass die Systeme weniger durch ihre thermische Belastungsgrenze, sondern im Wesentlichen durch deren Kurzzeitpulsleistung begrenzt sind. Für Lithium-Ionen-Batteriespeichersysteme sind dabei insbesondere die Aspekte der symmetrischen Leistungsbereitstellung, des Energiemanagements (Ladezustand) sowie die Zustandsschätzung des Ladezustands und der bidirektionalen, dynamischen Leistungsbereit-

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

stellung von hoher Relevanz. Durch die geringen Ladehübe (Depth of Discharge, DOD) ist die zyklische Belastung der Speichersysteme relativ gering, so dass für den alleinigen Momentanreservebetrieb die kalendarische Alterung dominant ist. Dennoch zeigen die wirtschaftlichen Betrachtungen, dass Lithium-Ionen-Batteriesysteme mit einem hohen Verhältnis von Leistung zu Energiegehalt besonders wirtschaftlich für die alleinige Bereitstellung von Momentanreserve geeignet sind. Für das betrachtete netzbildende Wechselrichtersystem zeigt sich, dass das dazugehörige stromprägende netzparallele Regelverhalten vermutlich für heutige Netze ausreichend ist und durch die eingestellte aperiodische Grenzfall-Parametrierung der VISMA stets ein „gutmütiges“ ist und somit eine günstige Stabilisierung realisiert werden kann. Auch das dynamische Stromregelverhalten des verwendeten, serienmäßigen Industriewechselrichters war im Verhältnis zur Stromsollwertvorgabe der VISMA ausreichend schnell und spielte keine Limitierung im Gesamtregelverhalten.

Projektpartner:

- Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut, Faseroptische Sensorsysteme (HHI-FS)
- AKASOL AG
- Infineon Technologies AG
- Stöbich technology GmbH
- LTI Motion GmbH
- TenneT TSO GmbH, Harz Energie Netz GmbH (assoziiert)

Projektlaufzeit: 01.06.2017 - 31.05.2021

Gefördert durch: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Frank Deblon (Tel.: 05321/3816-8063)
frank.deblon@tu-clausthal.de

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

Jens Grabow, M. Sc. (Tel.: 05321/3816-8065)
jens.grabow@tu-clausthal.de

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

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

Projekt: GridBatt - Batterietechnologien zur Sicherstellung eines stabilen Netzbetriebs

Problem: Auf Grund hoher Dynamik und Wirkungsgrade sowie geringe Ruheverluste sind Batteriespeicher technisch dazu prädestiniert, die Versorgungssicherheit und -qualität der elektrischen Netze in unterschiedlichen Anwendungen zu unterstützen [1]. Mit bereits heute erreichbaren spezifischen Energie- und Leistungsdichten sowie hohen Lebensdauern und Zyklenzahlen zu immer wirtschaftlicheren Betriebs- und Investitionskosten sind Batteriespeicher zur Erbringung von Systemdienstleistungen wie Frequenz- und Spannungshaltung, Betriebsführung und Versorgungswiederaufbau aber auch Eigenverbrauchsoptimierung und Energievermarktung am Spotmarkt [1,2] gut geeignet. Aktuell werden Batteriespeicher in den elektrischen Netzen hauptsächlich zur Erbringung von Primärregelleistung, im privaten Bereich als PV-Speicherkombination oder zur Notstromversorgung eingesetzt. Vor dem Hintergrund abnehmender rotierender Massen im elektrischen Netz durch das Abschalten konventioneller Kraftwerke müssen darüber hinaus mittelfristig Alternativen zur Bereitstellung der Momentanreserve geschaffen werden, für die Batteriespeicher grundsätzlich in Frage kommen [3-6].

Zur Sicherstellung eines stabilen Netzbetriebes mit Hilfe elektrischer Speichersysteme - hier im Speziellen Batteriespeicher - ist es essentiell, die anwendungsspezifischen Anforderungen eindeutig zu formulieren, um den Speicher schon beim Entwurf (Auswahl Zellchemie, Technologie, Geometrie, Umgebungsbedingungen, etc.) an diese anzupassen, optimal zu dimensionieren und auszulegen sowie dessen Betriebsführung zu optimieren. Nur eine ganzheitliche Betrachtung von der Zellchemie über die Schnittstelle (üblicherweise der Umrichter) zum System, den Systemanforderungen und den jeweiligen Rückkopplungen ermöglicht es, das volle Potential von Batterien auszuschöpfen.

Dabei ist maßgeblich zu berücksichtigen, dass die elektrischen Belastungen in vielen Systemen hoch dynamisch sind und neben der Gleichstrom- häufig eine Wechselstrom- bzw. Mischstromkomponente umfassen [7]. Im Rahmen des Vorhabens **GridBatt** soll daher gezeigt werden, dass für hohe dynamische Netzanforderungen - z.B. die Momentanreserve und schnelle Spannungs- und Frequenzregelung betreffend - eine technologische Lücke sowohl aus Netzsicht als auch aus den erforderlichen Speichereigenschaften vorliegt, die u.a. aus ökopolitischen Gründen sehr zeitnah geschlossen werden muss.

Ziel: Das EST hat zum Ziel, ausgehend von den Anforderungen an Speicher im elektrischen Netz mit der Charakterisierung aktuell eingesetzter (elektrischer und elektrochemischer) Leistungsspeicher bzgl. ihrer dynamischen Eigenschaften einen Benchmark zum Stand der Technik zu erstellen. Die Untersuchungen erfolgen auf Zellebene, werden aber abgeleitet aus den Anforderungen aus dem Netz, welche vom Magdeburger IESY erarbeitet werden. Darüber hinaus verfügt das EST mit verschiedenen Batterie-Umrichtersystemen über die notwendige

Infrastruktur verschiedene Netzsituationen nachzustellen und die Rückwirkungen auf den Gleichspannungs-Zwischenkreis zu messen und auszuwerten. Ein Teilziel ist daher die Erstellung der Übertragungsfunktion zwischen Netz und Batterie über den Umrichter (siehe auch Abbildung 4).

Um das Potential von Aluminium-Ionen-Batterien für hohe dynamische Anforderungen zu evaluieren, werden diese entsprechend untersucht und charakterisiert, ihre elektrochemischen Eigenschaften ermittelt und hiermit Modelle zur Beschreibung des (dynamischen) Strom-Spannungsverhaltens erstellt. Auf Basis des entwickelten Zellmodells erfolgt ein Hochskalieren auf Systemebene, um in der Gesamtsimulation das Verhalten des Aluminium-Ionen-Speichers am Netz zu beurteilen.

Stand der Technik: Werden Energiespeicher mit einer im Vergleich zum Energieinhalt hohen oder sehr hohen Leistung benötigt, bestehen oftmals Unklarheiten bzgl. der Auslegung und Dimensionierung des Speichersystems, da Zielkonflikte bestehen. Idealerweise stellt ein Speicher über einen möglichst großen Zeit- (μs bis Stunden) bzw. Frequenzbereich (mHz bis kHz) eine hohe Leistung zur Verfügung.

Klassischer Weise dominieren den dynamischen Frequenzbereich Kondensatoren, Doppelschichtkondensatoren (DSK) und Schwungmassenspeicher (SMS). Immer leistungsfähigere Lithium-Ionen-Batterien haben aber den Einsatzbereich elektrochemischer Speicher stark aufgeweitet, so dass sie bereits heute oftmals in Konkurrenz treten können. Es gibt jedoch immer noch Anwendungen, in denen Kondensatoren, DSK, SMS eine zu geringe Energiedichte (spezifisch bezogen auf Masse oder Kosten) aufweisen, Batterien auf Grund zu kleiner Leistungsdichten diese Anforderungen aber ebenso wenig erfüllen können. So zeigte sich beispielsweise im EST-Projekt „ReserveBatt“ [5,6], dass ein Speicher zur Erbringung von Momentanreserve ein Leistungs- zu Energieverhältnis von $200/1 \text{ h}^{-1}$ ($400 \text{ kW}/2\text{kWh}$) haben sollte, wenn das System (leistungsbezogen) ideal auslegt ist. Hierfür fehlt der „ideale“ Speicher (siehe Abbildung 1).

Projekt: GridBatt - Batterietechnologien zur Sicherstellung eines stabilen Netzbetriebs

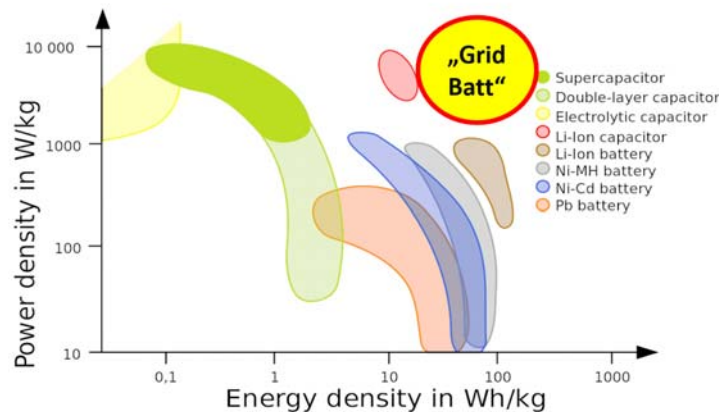


Abbildung 1: Prinzipielle Einordnung des dynamischen Netzspeichers “GridBatt” im Ragone Diagramm (nach [8])

Vielversprechend für Speicher zur Netzstabilisierung mit sehr hohen Leistungs- zu Energieverhältnissen sind Ansätze mit Aluminium-Ionen-Batterien (AIB) mit Aluminium und Graphit als Elektrodenmaterial, für die Laderaten von 100C und eine Zyklenstabilitäten von 500.000 Zyklen gezeigt werden konnten [9]. Inwieweit AIB den Anforderungen genügen, wird im Projekt ausgehend von den Materialeigenschaften bis hin zur Systemebene untersucht. Bisher finden die Anforderungen an den Speicher aus der Anwendung nur unzureichend Berücksichtigung in der Material- und Zellentwicklung (Top-Down) oder umgekehrt (Bottom-Up); damit existiert kein Optimum und keine anwendungsfallsspezifische Auslegung und Betriebsführung z.B. unter Berücksichtigung von Alterungseffekten, von Umrichterwirkungsgraden in Teillast oder von der Abhängigkeit der verfügbaren Kapazität vom Entladestrom.

Lösungsweg: In GridBatt wird deshalb versucht, über einen möglichst systemischen Ansatz und der skalenübergreifenden Betrachtung von den Anforderungen aus der Anwendung (Netz) über die Systemschnittstelle (Wechselrichter) zur Speichertechnologie und deren Rückkopplung einen optimalen Speicher für dynamische (Netz-)Anwendungen zu finden. So können in einer ganzheitlichen Simulation die Auswirkungen von Parameteränderungen (z. B. Spannungsantwort in Abhängigkeit der Batterieperformance bei geänderter Auslegung des Umrichters) direkt erkannt werden.

Das Gesamtprojekt ist in drei Teilprojekte der drei kooperierenden Einrichtungen aufgeteilt, siehe Abbildung 2. Die Arbeitspakete kann man entweder als Top Down-Ansatz von den Anforderungen aus dem Netz auf den Speicher und von dort weiter auf die Material- und Zellentwicklung betrachten oder als Bottom Up, also von den Materialeigenschaften auf das elektrochemische Systemverhalten und von dort auf das Verhalten am Netz.

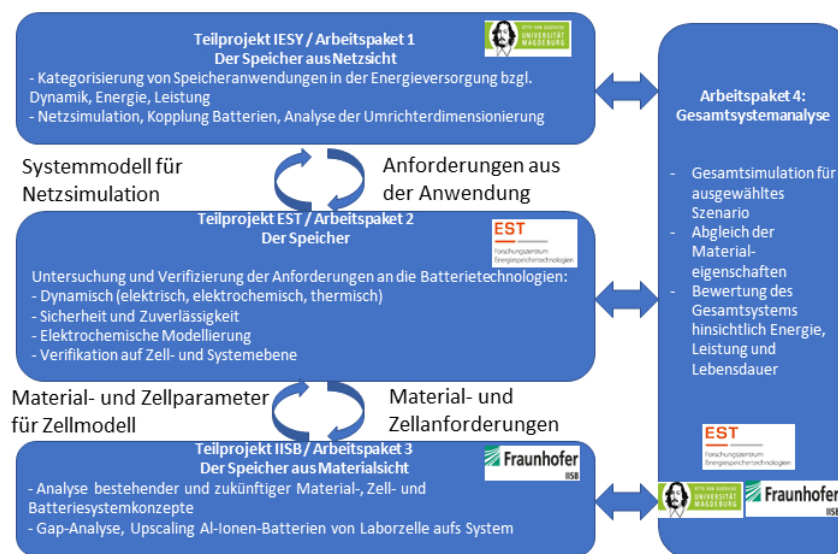


Abbildung 2: Projektstruktur mit den Teilprojekten Netz (IESY), Speicher (EST) und Zelle (IISB). Das Arbeitspaket 4 bildet mit der Gesamtsimulation die Klammer um die Teilprojekte

Im Arbeitspaket 1 analysieren die Forscher und Forscherinnen aus Magdeburg die Anforderungen, die sich an einen Speicher für die dynamische Netzstabilisierung ergeben und erstellen ein dynamisches Netzmodell. Darüber hinaus wird zur Kopplung zwischen Speicher und Netz der leistungselektronische Umrichter nachgebildet. Abbildung 3 zeigt das prinzipielle Zusammenwirken von Batterie, Leistungselektronik und Netz.

Projekt: GridBatt - Batterietechnologien zur Sicherstellung eines stabilen Netzbetriebs

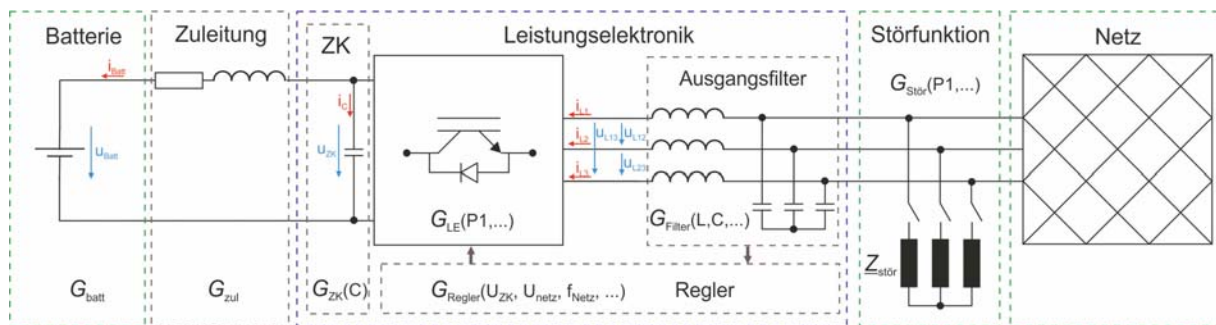


Abbildung 3: Prinzipdarstellung des Batterie-Umrichtersystems zur Netzstützung zur Untersuchung der Auswirkungen eines Ereignisses auf der Netzseite (Störfunktion) auf das Gesamtsystem. Die einzelnen Übertragungsfunktionen G_i werden in den Teilprojekten entsprechend modelliert und in die Gesamtsimulation implementiert.

In Arbeitspaket 3, für welches das IISB hauptverantwortlich ist, wird zunächst eine Analyse bestehender und zukünftiger Material-, Zell- und Batteriesystemkonzepte durchgeführt und die Lücke zwischen Energie- und Leistungsspeichern identifiziert („Gap-Analyse“).

Projektstand: Für die Betrachtung der Auswirkungen des Batterieverhaltens auf das Gesamtsystem (siehe Abbildung 3) ist für die Batterie ein Batteriemodell zu erstellen, welches das dynamische Verhalten korrekt wiedergibt (Arbeitspaket 2 des EST). Hierbei sind bestehende Modellvorstellungen zu erweitern, um das elektrochemische und elektrophysikalische in Grenzbereichen abzubilden. Da Datenblattangaben typischerweise das hochdynamische Verhalten nicht abbilden können, sind für verschiedene Technologien Messmethoden zur Überprüfung der netzstabilisierenden Wirkung einzuführen.

Es gilt zu prüfen, wie weit die Grenzstrombelastungen in Bezug auf das thermische, elektrochemische und elektrische Verhalten ausgereizt werden können, ohne die Batterie zu stark zu schädigen. Aus der Literatur sind hierzu verschiedene theoretische [11,14] und experimentelle Ansätze bekannt [10-13, 15], die sich jedoch ausschließlich mit hohen Entladeraten und auf Laborzellenebene beschäftigen. Die Übertragbarkeit auf die Laderichtung und auf industriell relevante Zellgrößen wird mit Hilfe von Konstantstrombelastungen (sog. Rate Capability Tests) und Spannungssprüngen (Chronoamperometry) derzeit überprüft (siehe Abbildung 4). Zur weiteren Charakterisierung werden Impedanzmessungen und Strompulsmessungen durchgeführt. Ein Ziel der Untersuchungen ist die Entwicklung und Validierung einer schnellen und allgemein anwendbaren Parametrisierungsmethode für Hochleistungsanwendungen. Dazu

werden zurzeit Messungen an verschiedenen Lithium-Ionen- und ersten Aluminium-Ionen-Batterien, die vom IISB hergestellt wurden, durchgeführt. Wie Abbildung 4 zeigt, ist eine sehr gute Übereinstimmung zwischen der Chronoamperometrie und den Konstantstromentladungen erkennbar. Bei der Ermittlung der stromratenabhängigen Kapazität ist durch Anwendung der CA eine deutliche Versuchsverkürzung erreichbar, da quasi alle Raten in der Kurve enthalten sind.

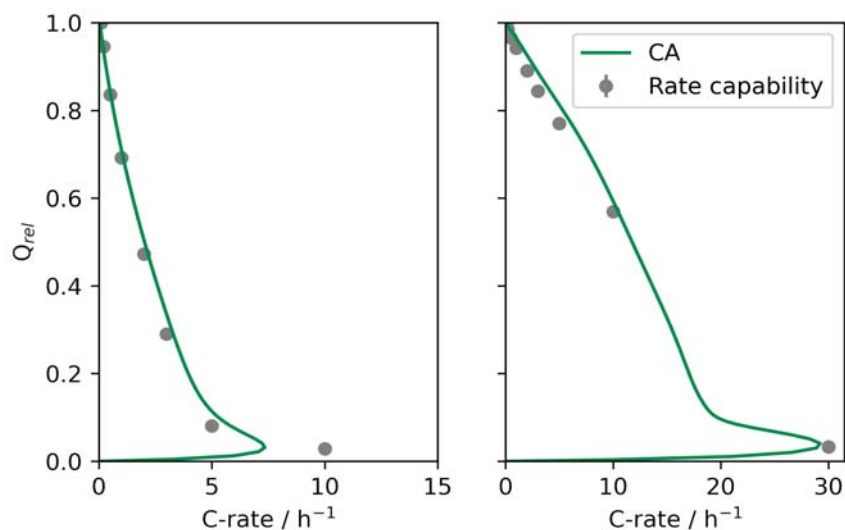


Abbildung 4: Chronoamperometrie einer Lithium-Ionen-Zelle (Pouch NMC/C, 5Ah) bei einem Spannungssprung von 0,25V (links) und 0,75V (rechts) und die dazugehörigen Kapazitäten Q_{rel} (bezogen auf die Kapazität bei 0,1C und 0,25V bzw. 0,75V Spannungsdifferenz) bei verschiedenen Konstant-Entladeraten. Die C-Rate ist dabei der auf die Nennkapazität bezogene Strom.

Vergleich von Speichertechnologien

In Zusammenarbeit mit dem IISB ist vom EST ein erweitertes Ragone-Diagramm entwickelt worden, siehe Abbildung 5, welches auf einer breiten Datenbasis fußt und vor allem um die Laderichtung erweitert wurde, da diese typischerweise für viele Technologien begrenzt ist. Da die Darstellung im Ragone-Diagramm von vollständigen Lade- und Entladezyklen ausgeht und keine Aussagen zur (zeitabhängigen) Pulsbelastbarkeit macht, werden derzeit weitere Darstellungsformen entwickelt, die insbesondere den Hochleistungsbereich adressieren.

Projekt: GridBatt - Batterietechnologien zur Sicherstellung eines stabilen Netzbetriebs

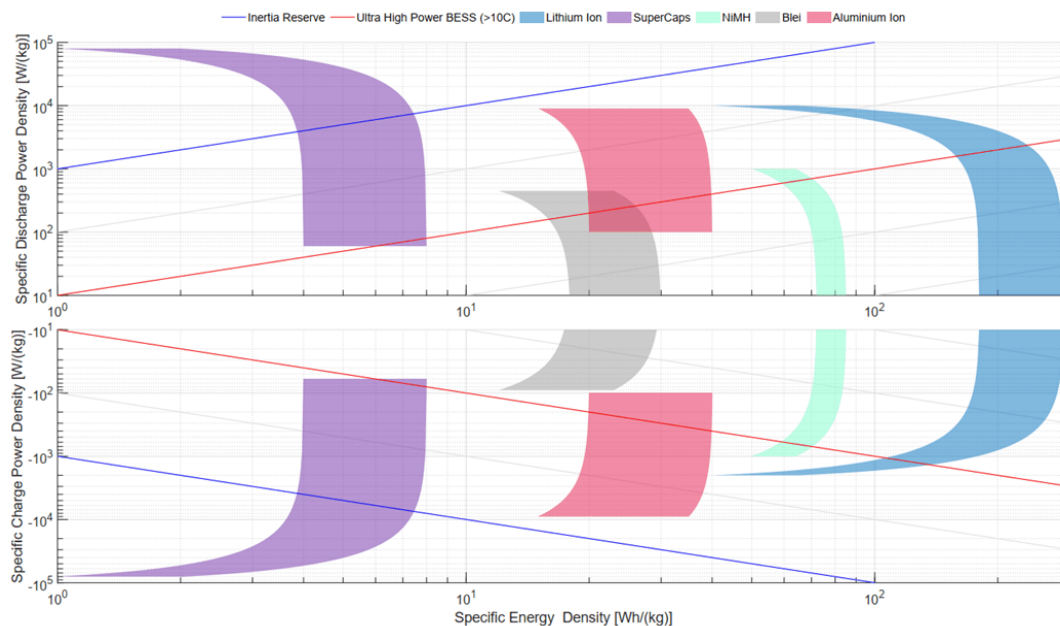


Abbildung 5: Erweitertes Ragone-Diagramm zur Einordnung relevanter elektrochemischer Speichertechnologien bzgl. spezifischer Leistung- und Energiedichte. Im Gegensatz zu üblichen Darstellungen ist im unteren Diagramm die Laderichtung abgebildet, da diese typischerweise für viele Technologien begrenzt wird. Für AIB (rote Fläche) sind diese Beschränkungen in Laderichtung nicht gegeben. Für pulsformige Belastungen wird erwartet, dass die Anforderungen zur Erbringung von Momentanreserve (blaue Gerade) erfüllt werden können.

- Publikationen:**
- [1] Schriftenreihe des EFZN, Band 13: Eignung von Speichertechnologien zum Erhalt der Systemsicherheit", 2013 - ISBN 978-3-95404-439-9
 - [2] Hesse, H. et al: Lithium-Ion Battery Storage for the Grid – A Review of Stationary Battery Storage Systems Tailored for Applications in modern Power Grids, *Energies*, 10, 2017
 - [3] Gollenstede, Beushausen, Benger, Beck, Schael, Kruschel, Ulbrich, Schmies: Design of a High-Performance Battery Converter System for Providing Synthetic Inertia at Distribution Net-work Level, 20th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'18 ECCE Europe), 2018

-
- [4] Beushausen, L., Benger, R., Gollenstede, J., Werther, B., Beck, H.-P.: Dynamic requirements on LFP batteries used for providing Virtual inertia, in NEIS Conference 2016 “Nachhaltige Energieversorgung und Integration von Speichern”, Schulz, Detlef (Hrsg.) ISBN 978-3-658-15029-7, Hamburg 2016
 - [5] BMWI: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/innovation-durch-forschung-2018.pdf?__blob=publicationFile&v=17, Seite 76, 2018
 - [6] Deblon, Beck, Benger, Kruschel, Reineke, Schael, Turschner, Werther: Implementation and evaluation of a high-performance battery converter system for providing synthetic inertia at distribution network level, 23rd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'21 ECCE Europe), 2021
 - [7] Benger, R.: Dynamik von umrichter gespeisten Energiespeichersystemen, Dissertation TU Clausthal, ISBN 978-3-95404-371-2, 2013
 - [8] <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Energiespeicher3.svg>
 - [9] Elia et al: An Aluminum/Graphite Battery with Ultra-High Rate Capability, Batteries Supercaps vol. 2, 2019
 - [10] Heubner et al: Comparison of chronoamperometric response and rate-performance of porous insertion electrodes: Towards an accelerated rate capability test, Journal of Power Sources , 397, 2018
 - [11] Tian et al: Quantifying the factors limiting rate performance in battery electrodes, Nature Communications, 2019
 - [12] Heubner et al: Diffusion-Limited C-Rate: A Fundamental Principle Quantifying the Intrinsic Limits of Li-Ion Batteries, Adv. Energy Materials, 10, 2020
 - [13] Tian et al: Using chronoamperometry to rapidly measure and quantitatively analyse rate-performance in battery electrodes, Journal of Power Sources , 468, 2020
 - [14] Lain, Kendrick: Understanding the limitations of lithium ion batteries at high rates, Journal of Power Sources 493, 2021
 - [15] Bridgewater et al: A Comparison of Lithium-Ion Cell Performance across Three Different Cell Formats, Batteries 7,38, 2021

Projekt: GridBatt - Batterietechnologien zur Sicherstellung eines stabilen Netzbetriebs

Projektpartner:

- Forschungszentrum Energiespeichertechnologien TU Clausthal
- Institut für Elektrische Energiesysteme (IESY), Ott-von-Guericke-Universität Magdeburg
- Fraunhofer Institut für Integrierte Halbleiter und Bauelemente (IISB), Technologiezentrum Halbleitermaterialien THM

Projektlaufzeit: 01.10.2020 - 30.09.2023

Gefördert durch: Bundesministerium für Bildung und Forschung

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Frank Deblon (Tel.: 05321/3816-8063)
frank.deblon@tu-clausthal.de

Jacob Klink, M. Sc. (Tel.: 05321/3816-8077)
jacob.klink@tu-clausthal.de

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

IEE

Projekt: RiskBatt

Projekt: RiskBatt (Risikoanalyse für lithiumionenbasierte Energiespeichersysteme im sicherheitskritischen Havariefall unter besonderer Berücksichtigung der dabei freigesetzten toxischen und explosiven Schadgase)

Problem: Lithium-Ionen-Batterien stellen für eine Vielzahl von Anwendungen, wie z. B. Mobiltelefone, Power-Tools oder Elektrofahrzeuge auch mittelfristig einen konkurrenzlosen Energiespeicher dar. Aus der Verwendung von Lithium resultiert eine gewünscht hohe Energiedichte, aber auch aufgrund der hohen Reaktivität des Lithiums ein potentiell gefährliches Zellsystem. Insbesondere im Schadensfall, z. B. durch mechanische Beschädigung oder dem Betrieb außerhalb der Betriebsgrenzen, kommt es in der Praxis immer wieder zu sicherheitskritischen Zuständen und der einhergehenden Gefährdung für Mensch und Umwelt. Im schlimmsten Fall eines thermischen Durchgehens (Thermal Runaway) werden große Wärmemengen und z.T. giftige Substanzen schlagartig freigesetzt.

Ziel: Aufgrund der Sicherheitsproblematik der Lithium-Ionen-Technologie ist es erstrebenswert, Lösungsansätze zur Risikobewertung sowie zur Schadensminimierung zu erarbeiten. Die Entwicklung von präventiven Maßnahmen, frühzeitigen Detektionsmöglichkeiten und geeigneter Schutzausrüstung für Rettungskräfte sind hierbei wichtige Ansätze. Übergeordnet für alle Maßnahmen steht jedoch das Verständnis für die Entwicklung und Ausprägung von sicherheitskritischen Zuständen. So werden im RiskBatt-Projekt eine Vielzahl verschiedener Batteriefehler initiiert, charakteristische Größen aufgezeichnet und in einer Datenbank abgelegt.

Stand der Technik: Es ist bekannt, dass Lithium-Ionen-Batterien durch verschiedenste Fehlerszenarien in einen sicherheitskritischen Zustand mit katastrophalen Folgen gebracht werden können. Somit werden zur Sicherheitsbetrachtung und Zertifizierung verschiedene sogenannte Abuse-Szenarien durchgeführt, deren Parameter in Normen definiert sind. In diesen Normen sind jedoch nicht alle Versuchsparameter definiert und nicht zwangsweise praxisrelevante Fehlerszenarien abgebildet. So bestehen derzeit Forschungsfragen bezüglich einer geeigneten Nachbildung von praxisnahen Fehlerszenarien und der Charakterisierung von potentiell sicherheitskritischen Zellen.

Lösungsweg: Neben den verschiedenen Triggermechanismen (mechanisch, thermisch, elektrisch) zum Auslösen von Fehlerzuständen in Lithium-Ionen-Batterien hat auch der Zustand der Zelle selbst (z.B. Ladezustand, Starttemperatur, Alterungszustand) einen signifikanten Einfluss auf das Zellverhalten. Des Weiteren gibt es aufgrund variierender Bauformen und Zellchemien

viele unterschiedliche Zelltypen, die sich in ihren Sicherheitseigenschaften unterscheiden. So werden im Projekt RiskBatt insgesamt über 200 Abuse-Tests zur Bewertung des Havarieverhaltens durchgeführt. Ein Teil dieser Zellen wird zuvor zyklisch belastet, um den Einfluss unterschiedlicher Alterungsprozesse auf den Sicherheitszustand zu untersuchen. Die Versuchsdefinition, die Durchführung der Alterungstests sowie die elektrochemische und thermische Charakterisierung des Abuse-Ereignisses werden vom EST durchgeführt. Sofern es während des Abuse-Ereignisses nicht zum Bersten der Zelle kommt, sollen einige Zellen vom EST elektrochemisch nachcharakterisiert werden, um den Sicherheitszustand von ungeöffneten Zellen besser bestimmen zu können. Sowohl die zeitlich während des Abuse-Ereignisses aufgezeichneten Messgrößen, als auch die Nachcharakterisierung werden vom EST zur Definition verschiedener Kennzahlen für eine Risikobewertung herangezogen. Der Versuchsaufbau und die Gasmessung mittels FTIR und FID werden vom Clausthaler Umwelttechnik Forschungszentrum CUTEC betreut. Auf Basis der detektierten Gase wird vom CUTEC eine Bewertung der chemischen Risiken durchgeführt. Das ebenfalls in Goslar am EnergieCampus ansässige Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut als weiterer Projektpartner stattet einige Zellen zur Dehnungsmessung mit faseroptischer Sensorik aus und nutzt die in der Datenbank hinterlegten Abuse-Ergebnisse zum Aufbau eines Systems zur Havarievorhersage.

Projektstand: Als Ergebnis einer Recherche zu den in den aktuellen Normen definierten Testparametern stellte sich unter anderem heraus, dass in vielen Normen keine Angaben zu dem Verspannkonzentration der Zellen gegeben sind. Somit wurden in der ersten Versuchsreihe jeweils zwei 53Ah NMC Kokam Pouchzellen mit verschiedenen thermischen Konfigurationen extern kurzgeschlossen. Aus Abbildung 1 wird ersichtlich, dass die Versuchsergebnisse des externen Kurzschlusses reproduzierbar sind. Es ist zu entnehmen, dass erwartungsgemäß die isolierte und verspannte Zelle die höchste Zelltemperatur während des externen Kurzschlusses erreicht und somit als Worst-Case-Szenario herangezogen werden kann. Der auffällige Abfall des Kurzschlussstroms bei der Zelle (verspannt und isoliert) nach dem Erreichen der maximalen Temperatur von 140°C ist durch die Porenverschließung des Separators zu erklären und ist ein Indiz für das erhöhte Sicherheitsrisiko dieser Zellen. Zur Erzeugung untereinander vergleichbarer Ergebnissen wurde festgelegt, dass alle weiteren Abuse-Tests in der verspannten und isolierten Konfiguration getestet werden.

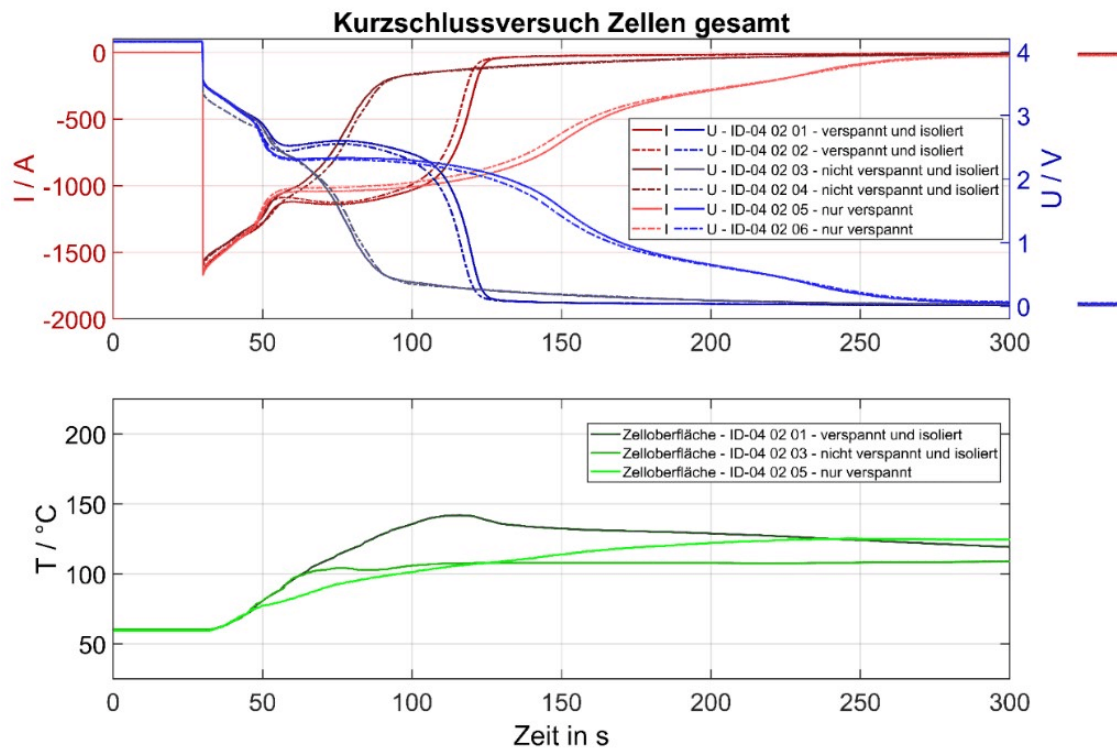


Abbildung 2: Externer Kurzschluss von 53 Ah Kokam Pouch-Zellen nach der Norm UN 38.3 mit verschiedenen „thermischen“ Konfigurationen.

Als Testumgebung wurde eine Messhaube, welche es ermöglicht, die emittierten Gase beim Abuse aufzufangen, konstruiert und im Brandofen implementiert (Abbildung 2). Die Gase werden hierbei in der Messstrecke zur Analyse abgegriffen. Mit diesem Setup konnten bereits verschiedene Zellen unter Einfluss unterschiedlicher Trigger getestet werden. In einer Testreihe wurden sechs 10 Ah NMC Kokam Pouchzellen mit einem 3 mm dicken Edelstahl Nagel, in Anlehnung an die Norm SAE J2464, penetriert.



Abbildung 2: Messhaube mit Anpassungen an der Luftführung. Hier dargestelltes Setup für Nagelpenetration.

Die Nagelpenetration verursacht durch den erzeugten internen Kurzschluss einen abrupten Spannungsabfall (Abbildung 3). Der Spannungsabfall setzt lokal eine hohe Menge an Joulescher Wärme frei, wodurch exotherme Nebenreaktionen gestartet werden. Des Weiteren kommt es zur massiven Gasfreisetzung, jedoch zu keiner Entzündung der Havariegase. Insgesamt hat die Zelle nach dem Abuse ca 36% (78 g) an Gewicht verloren. Da die herkömmliche, in den Normen definierte Nagelpenetration für eine geringe Reproduzierbarkeit bekannt ist und praxisnahe Fehlerfälle nur in geringem Maße nachbildet, entwickelt das EST eine neuartige Methodik zur Erzeugung von internen Kurzschlüssen.

Projekt: RiskBatt

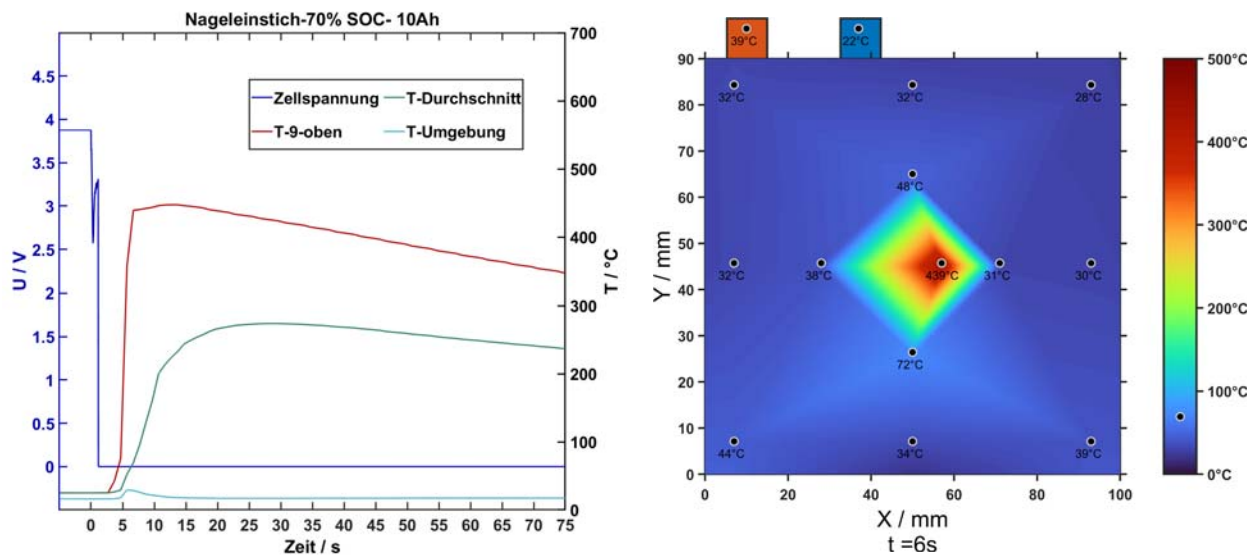


Abbildung 3: Abuse-Ergebnisse einer Nagelpenetration mit einem 3mm Edelstahl Nagel.
Links: zeitlicher Spannungs- und Temperaturverlauf nach der Penetration.
Rechts: Mit Hilfe der Messdaten nachgebildetes Temperaturfeld der Zelle acht Sekunden nach der Penetration.

Projektpartner:

- TU Clausthal (EST und CUTEC)
- Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut, Faseroptische Sensorsysteme (HHI-FS)
- AKASOL AG

Assoziiert:

- Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse (BG ETEM) / Fachbereich Feuerwehren, Hilfeleistungen, Brandschutz (FB FHB) der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV)
- Stöbich technology GmbH

Projektlaufzeit:

01.04.20-31.03.23

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

Bearbeiter:

Jens Grabow, M. Sc.
jens.grabow@tu-clausthal.de

(Tel.: 05321/3816-8065)

	Nury Orazov, M. Sc. nury.orazov@tu-clausthal.de	(Tel.: 05321/3816-8065)
<u>Wiss. Betreuung:</u>	Prof. Dr.-Ing. H.-P. Beck sekretariat@iee.tu-clausthal.de	(Tel.: 72-2570)
<u>Projektleiter:</u>	Dr.-Ing. Ralf Bengler ralf.bengler@tu-clausthal.de	(Tel.: 05321/3816-8067)

Projekt: Stromdichtmessung zur Detektion sicherheitsrelevanter Fehler bei Lithium-Ionen-Batterien - LiBatt

Ziel: Die DENKweit GmbH hat mit ihren B-Tech-Produkten bereits Messmöglichkeiten geschaffen, um Rückschlüsse auf die Stromdichteverteilung von PV-Anwendungen zu ziehen. Im Bereich der Batterietechnik bestehen wenige Methoden zur ex-situ-Charakterisierung hinsichtlich Alterung und Sicherheit. Eine vielversprechende Methode ist die Bestimmung der Stromdichteverteilung innerhalb der Zelle, weshalb innerhalb des Projekts „LiBatt“ eine auf die spezifischen Anforderungen der Batterietechnik abgestimmte Messtechnik entwickelt wird. Die Entwicklung beinhaltet dabei die nötige Erweiterung der Messmöglichkeiten (Dynamik, Messfläche, Auflösung, etc.), aber auch die Implementierung einer neu konstruierten Messumgebung, welche die Temperierung von Batteriezellen und deren Rotation zulässt.

Die Kenntnis über die Stromdichteverteilung innerhalb einer Batterie kann einen großen Schritt zur in-operando-Analyse von elektrochemischen Speichern während des Betriebs beitragen. Hieraus lassen sich dann Aspekte wie der Ausnutzungsgrad einzelner Zell- oder Modulbereiche bestimmen, so dass Rückschlüsse auf den Kapazitätsverlust oder die Erhöhung des Innenwiderstands gegenüber dem ursprünglichen Zustand in unterschiedlichen Arealen der betrachteten Speichereinheit möglich sind. Die Messergebnisse sollen weiterhin der Detektion fertigungs-, alterungs-, oder betriebsbedingter Sicherheitsmängel dienen. Hieraus können im Anschluss Richtlinien für die Fertigung (Qualitätsmanagement) und den Betrieb von Lithium-Ionen-Batterien abgeleitet bzw. die Auswirkungen von Einsatz und Betrieb auf Lebensdauer und Sicherheit besser nachvollzogen werden. Ziel ist es somit, dass vor allem äußerlich unversehrte Batteriezellen und -module durch Analyse der Messdaten hinsichtlich Alterung und Sicherheit bewertet werden können. Ebenso soll es anhand der Daten möglich werden, interne Zellkurzschlüsse und Micro-Kurzschlüsse zu detektieren. Durch die aktuellen Funktionalitäten eines BMS ist dies bisher nicht oder nur unter besonderen Voraussetzungen möglich.

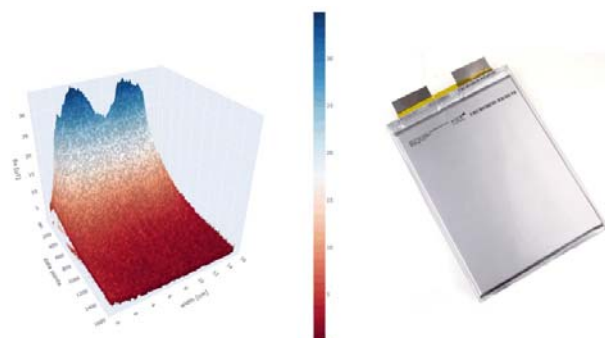


Abbildung 1: Die Abbildung zeigt das resultierende Magnetfeld einer Lithium-Eisenphosphat-Pouchzelle in z-Richtung, wobei die Zelle mit 1C (20 A) belastet wurde. Die Analyse verdeutlicht den deutlichen Stromfluss im oberen Bereich der Zelle.

Projektstand: Ziel des ersten Arbeitspaketes war die Analyse des aktuellen Stands der Messtechnik hinsichtlich Dynamik, Auflösung und verfügbarer / darstellbarer Messfläche und die Dokumentation des für Batterien erforderlichen Funktionsumfangs. Hieraus wurde ein Lastenheft erstellt, bei welchem in zwingend notwendige und optionale Anforderungen unterschieden wurde. Alle zwingend nötigen Anforderungen wurden bereits durch den Projektpartner umgesetzt. Die optionalen Anforderungen werden durch kontinuierliche Updates zusätzlich bearbeitet. Durch die vollständige Umsetzung des Lastenhefts konnte der Funktionsumfang des Messgeräts deutlich erhöht werden, wodurch sich weitere Messmethoden zur Batterieanalyse ergeben haben.

Zusätzlich dazu wurden bereits unterschiedlich stark gealterte Lithium-Eisen-Phosphat-Rundzellen (Typ 18650) vermessen. Diese wurden ausgehend von einem Ladezustand 0% vollständig aufgeladen und bei mehreren Ladezuständen vermessen. Es sollte überprüft werden, ob sich die bekannten Gesundheitszustände im Magnetfeld niederschlagen, bzw. ob diese quantifizierbar sind. Die folgende Abbildung zeigt zunächst eine Rundzelle mit einem hohen Gesundheitszustand (SOH) von 96 % bei unterschiedlichen Ladezuständen.

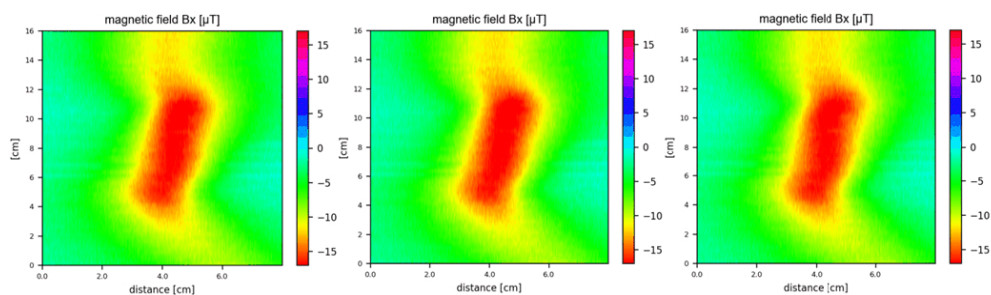


Abbildung 2: Lithium-Eisenphosphat-Rundzelle mit einem SOH von 96 %, Ladezustände 0 % (links), 30 % (Mitte), 54 % (rechts)

In Abbildung 2 ist zu erkennen, dass das Magnetfeld bei einer neuen oder wenig gealterten Zelle über den gesamten Ladezustandsbereich nahezu identisch und homogen bleibt. Im Gegensatz dazu verdeutlicht Abbildung 3, dass ein hoher Alterungszustand zu einer detektierbaren Feldverschiebung führt. Je höher der Ladezustand, desto inhomogener stellt sich das messbare Feld dar. Bei mehreren Zellen war zudem ab einem mittleren Ladezustand nur noch ein geringes Feld messbar. Dies resultierte daraus, dass die Zellen auf Grund des Alterungszustandes während der Ladung bereits die maximal zulässige Zellspannung erreichten und somit den Ladestrom reduzierten. Mit den ermittelten Erkenntnissen können anhand der Messmethode bereits zuverlässig Aussagen zum Alterungszustand getroffen werden.

Projekt: Stromdichtmessung zur Detektion sicherheitsrelevanter Fehler bei Lithium-Ionen-Batterien - LiBatt

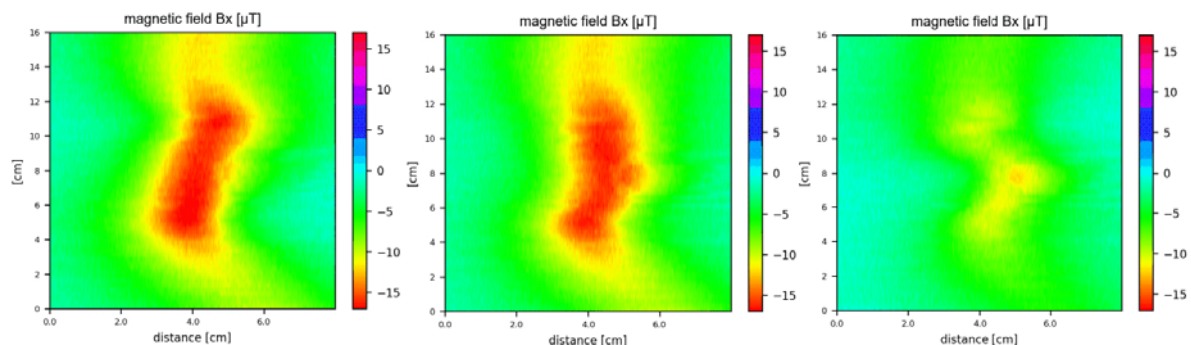


Abbildung 2: LFP-Rundzelle mit einem SOH von 69 %, Ladezustände 0 % (links), 30 % (Mitte), 54 % (rechts)

Im weiteren Projektverlauf sollen die Ergebnisse der Zelltests auf die Modulebene übertragen werden. Dabei soll geprüft werden, ob die sich im Modul überlagernden Magnetfelder weiterhin eine Analyse des Alterungszustands zulassen. Des Weiteren sollen zudem mit Hilfe der Magnetfeldanalyse die Zellkontaktierungen auf Fehler geprüft werden.

Projektpartner: DENKwelt GmbH

Projektlaufzeit: 01.10.2020 - 31.07.2022

Gefördert durch: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

Projektträger: Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand ZIM

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

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

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

IEE

Projektübersicht

Abteilung Energiesystemintegration CUTEC Forschungszentrum

Abteilungsleiter: Dr.-Ing. Jens zum Hingst
Tel.: +49-5321-3816-8054
E-Mail: zum.hingst@cutec.de
Wiss. Betreuung: Prof. Dr.-Ing. H. -P. Beck

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

Das CUTEC Forschungszentrum besteht aus 6 Fachabteilungen. Die Fachabteilungen des CUTEC Forschungszentrums arbeiten dabei eng mit den entsprechenden Instituten der TU Clausthal zusammen. Die Abteilung Energiesystemintegration ist vor diesem Hintergrund dem Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme zugeordnet. Neben der technischen Umsetzung dieser gekoppelten Energiesysteme in Form von Modellanlagen wie dem „Energiepark Clausthal“, werden in der Abteilung Energiesystemintegration theoretische Betrachtungen in Form von Energieszenarien durchgeführt, um die Anforderungen zukünftiger Energiesysteme zu analysieren und Lösungen zur Integration von Erzeugungsanlagen und Speichersystemen zu erarbeiten. Zur Bewertung der Nachhaltigkeit sowie zum Vergleich verschiedener Ausgestaltungen derartiger Energiesysteme erfolgt eine Bilanzierung der resultierenden Treibhausgasemissionen (über den gesamten Lebensweg).

Aktuelle Projekte:

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

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

Das Modellsystem Energie ist die Weiterentwicklung und Erweiterung des am CUTEC angesiedelten Energieparks Clausthal, an dem seit über zehn Jahren experimentelle Untersuchungen des Energiesystems durchgeführt werden. Im Modellsystem Energie wird das Zusammenwirken von verschiedenen Erzeugungsanlagen und Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen in Kombination mit (Wärme-)Speichern untersucht. Im Rahmen des vorliegenden Investitionsprojektes sind hier verschiedene Erweiterungen insbesondere zur Speicherung elektrischer Energie (Batteriespeicher mit Umrichtersystem, Redox-Flow-Batterie) und zur Wandlung in chemische Energieträger (Elektrolyse) vorgesehen. Das System soll dann in der Lage sein, bedarfsgerecht Elektrizität und/oder Wärme zur Verfügung zu stellen bzw. zu nutzen oder zu speichern und dadurch Systemdienstleistungen zu erbringen. Durch die Nutzung der verschiedenen Energiespeicher können zeitversetzt auch Mobilitätsanforderungen und weitere Bedarfe befriedigt werden. Mit der Einbindung der Elektrolyse ist die Langfristspeicherung in chemische Energieträger möglich, die nach Speicherung für die unterschiedlichen Energiebedürfnisse herangezogen werden können oder Grundstoffe für anschließende Prozesstechnologien liefern. In den folgenden Schritten sollen zusätzliche innovative Verfahren und Umwandlungstechnologien erforscht, eingesetzt und angepasst werden, die zur Umsetzung der vollständigen Energiewende notwendig werden. Aktuell wurden die Aufträge zur Lieferung eines Brennstoffzellensystems, einer Elektrolyseeinheit und eines zugehörigen Wasserstoffspeichers erteilt. Der Aufbau dieser Komponenten wird im ersten Halbjahr 2022 erfolgen.

Bearbeiterin: Dr.-Ing. Werner Siemers

Projektleiter: Dr.-Ing. J. zum Hingst

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

Die Aufgabenstellung dieses Projektes ist es die folgende Kernfrage zu beantworten: Ist, und wenn ja, unter welchen Bedingungen eine effiziente kontaktlose elektrische Energieübertragung im Nahfeld einer elektromagnetischen Übertragungsstrecke auch über relativ große Distanzen von mehreren Metern mit gutem Wirkungsgrad (>50%) möglich?

Das Ziel ist die Bereitstellung einer neuen Lösung für die hocheffiziente kontaktlose elektrische Energieübertragung für verschiedene Anwendungsbereiche zu denen insbesondere das kontaktlose Laden von Elektrofahrzeugen gehört.

Für die Untersuchung wird ein Übertragungssystem, bestehend aus planaren Tesla-Spulen und kugelförmigen Antennen (jeweils für den Sender und Empfänger), ausgewählt. Es wird

Projektübersicht

davon ausgegangen, dass die planaren Tesla-Spulen aufgrund ihrer Bauweise die Eingangsspannung auf der Sender-Seite hochtransformieren können, wodurch wiederum ein stärkeres elektrisches Feld zwischen den Antennen erzeugt wird. Die kugelförmigen Antennen stellen in diesem Fall die Elektroden eines Kondensators in der Luft dar. Die Ladungsverschiebung auf den Elektroden, hervorgerufen durch die angelegte Spannung, führt auf einen Verschiebungsstrom, der den Energietransport ermöglicht.

In der explorativen Phase wird zuerst die Feldverteilung sowohl in der unmittelbaren Umgebung der Tesla-Spulen als auch zwischen dem Sender und Empfänger analytisch, numerisch und messtechnisch ermittelt, um die darauf basierenden Kenngrößen zu bestimmen, die für eine Auslegung der Energieübertragung nach der vorgesehenen Methode wesentlich sind. Im Weiteren werden basierend darauf alternative Anordnungen zum Aufbau des Übertragungssystems untersucht. Dabei wird versucht durch mehrere Maßnahmen wie Variation der Länge der Spulen, des Abstandes zwischen den Spulenwicklungen, des Drahtdurchmessers (beziehungsweise durch Verwendung von HF-Litzen), und der Größe der Antennen, die Verluste im System zu reduzieren und den Wirkungsgrad zu maximieren.

Um die messtechnische Untersuchung dieses Forschungsthema in der Abteilung Energiesystemintegration zu ermöglichen, wurde im CUTEC ein Labor für elektrische Energieumwandlung und -Übertragung eingerichtet.

Bearbeiter: Karlo Tkalčec, M. Sc.

Projektleiter: Dr.-Ing. J. zum Hingst

Wiss. Betreuung: Prof. Dr.-Ing. H.-P. Beck

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

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

erscheint ein solcher integrativer Ansatz zwingend geboten.

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

Bis zum derzeit erreichten Zwischenstand wurden dazu sechs repräsentative Standorte im Westharz identifiziert, die den erwähnten Möglichkeitsraum für die anstehende Vertiefung der Maßnahmen zulassen. Dabei steht der Systemgedanke im Hinblick auf das Zusammenwirken verschiedener Standorte/Maßnahmen in Bezug auf die verschiedenen Systemdienstleistungen im Vordergrund. Eine exakte Ermittlung sämtlicher maximal möglicher Potenziale im Harz ist dabei nicht Ziel dieses Projektes.

Der Betrachtungsraum des Projektes umfasst ausgehend von diesen Randbedingungen folgende Standorte bzw. Regionen:

- ◆ Okertalsperre - Huneberg (Erbringung aller o. a. Systemdienstleistungen möglich)
- ◆ Odertalsperre - Stöberhai (zusätzliche Trinkwasserbereitstellung möglich)
- ◆ Wassernutzung im Siebertal (Überleitungssystem für höhere Trinkwasserbereitstellung)
- ◆ Wasserntuzung des Innerstentales (alle Systemdienstleistungen können erbracht werden)
- ◆ Granetalsperre (zusätzliche Trinkwasserbereitstellung)
- ◆ Hochwasserschutz Goslar (Vorsperre im Gosetal oder Aufweitung des Oker-Grane-Stollens)

Aus den bisherigen Analysen dieses Möglichkeitsraumes ergeben sich Größenordnungen für das zusätzlich hebbare Speichervolumen des Westharzes von etwa 90 Mio. m³ und eine maximal installierbare elektrische Leistung von Pumpspeicherkraftwerken von ca. 1.000 MW. Die Aussage welcher Anteil dieses technischen Potenzials vor dem Hintergrund der Fragestellungen des Projektes sinnvollerweise nutzbar gemacht werden sollte, bleibt den folgenden konkreten Standortanalysen im Projekt vorbehalten.

Bearbeiter: Hasan Yener Şişik, M. Eng.

Projektkoordinator: Dr.-Ing. J. zum Hingst

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. H.-P. Beck

Projektübersicht

- **Biomasse-Integration zur Systemoptimierung in der Energieregion Hümmling mit ganzheitlichem, sektorübergreifenden Ansatz Teilvorhaben 3 Szenarienerstellung und Bewertung**

Ziel des Projekts ist die Konzeption und Demonstration eines vollständig regenerativen, dezentralen Energiesystems für eine energieautarke Region unter der besonderen Berücksichtigung der Systemintegration von Biomasse. Mittels eines ganzheitlichen, sektorübergreifenden Ansatzes soll dies am konkreten Beispiel der „Energieregion Hümmling“ erfolgen. Ausgehend vom derzeitigen Ist-Zustand sowie dem Ziel eines Energiesystems, welches nahezu zu 100% in allen Sektoren mit erneuerbaren Energien versorgt wird, sind optimale Transformationspfade zu entwickeln. Hierzu werden für die Studie die mittel- und langfristigen Entwicklungen anhand von zwei definierten Zeitschritten (Jahre 2030 und 2050) betrachtet. Die Analyse des Energiesystems für die Region Hümmling erfolgt aus der Ermittlung sowie der Abschätzung von Verbrauch und Erzeugung an Energieträgern, wobei zwar der Beitrag der Biomasse schon jetzt zu einem Energieüberschuss führt, dieser jedoch bisher noch nicht flexibel genutzt wird. Unter Zuhilfenahme verschiedener Informationsquellen (u.a. Strom- und Erdgasdaten des regionalen Energieversorgers, Daten des Landkreises, Marktstammdatenregister, Energieatlas Niedersachsen) ist in einem ersten Schritt der Ist-Zustand des Energiesystems Hümmling in Bezug auf die Energiebedarfe für Strom und Wärme sowie die derzeitige Energieerzeugung und deren Potentiale ermittelt worden. Darauf aufbauend ist die Erstellung der Szenarien in einem dreistufigen Ansatz erfolgt, wobei in einem ersten Schritt hinsichtlich eines groben Überblicks die Ergebnisse aus dem bereits bestehenden, 2015 vom CUTEC erstellten Niedersachsen-Szenario 2050 auf das zu untersuchende Energiesystem heruntergebrochen worden sind. In einem zweiten Ansatz sind ausgehend von den ermittelten Prognosen für die Jahre 2030 und 2050, welche den Ausbaupfaden verschiedener Untersuchungen und Studien für Deutschland folgen, Jahresbilanzen erstellt worden. Abschließend wird der energetische Zusammenhang der Energieregion Hümmling anhand einer hochauflösenden Simulation abgebildet, woraus sich detaillierte Aussagen zu den Steuerungs- und Speicheranforderungen treffen lassen. Zur Modellierung der mittel- und langfristigen Entwicklungen der Energieregion Hümmling in den Jahren 2030 und 2050 ist ein gemischt-ganzzahliges lineares Optimierungsmodell erstellt worden.

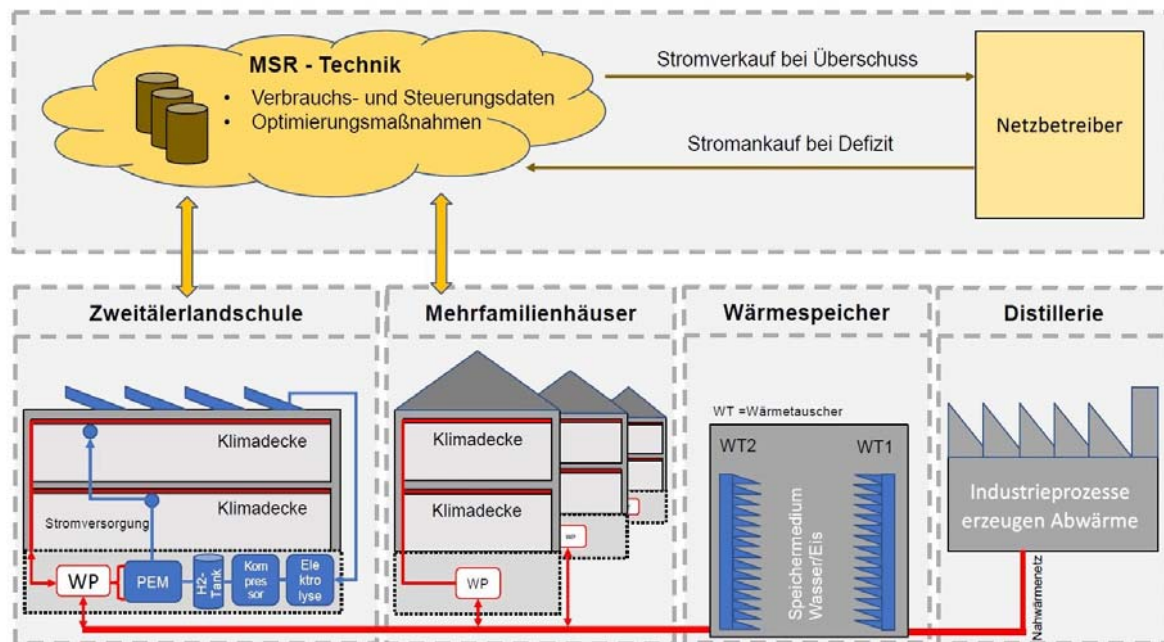
Bearbeiter: Daniel Alexander Piontek, M. Sc., Dr.-Ing. Werner Siemers

Projektleiter: Dr.-Ing. J. zum Hingst

- **Innovatives Strom- und Wärmekonzept im Zweitälerland (ISWK)**

Im Projekt „Innovatives Strom- und Wärmekonzept im Zweitälerland“ (ISWK) ist die Abteilung Energiesystemintegration des CUTEC-Forschungszentrums im Bereich des Monitorings und der Evaluation eingebunden. Das Projekt steht unter der Leitung von Fraunhofer ISE in Freiburg, zudem sind mehrere Industriepartner mit involviert. Hauptziel des Projektes ist es, eine Grundschule mit einem Eisspeicher regenerativ mit Wärme zu versorgen. Die dem Eisspeicher entzogene Wärmeleistung wird dabei als Vorlauf für eine Wärmepumpe genutzt, die dann ausgangsseitig ein höheres Temperaturniveau zum Beheizen des Schulgebäudes und angrenzender Mehrfamilienhäuser bereitstellt. Die Reeneration des Eisspeichers soll auch mit einer Nutzung von Abwärme aus einer nahegelegenen Distillerie erfolgen. Die elektrische Energie zur Versorgung der Wärmepumpe soll aus einer Photovoltaik-Anlage auf dem Dach der Schule gewonnen werden. CUTEC ist momentan insbesondere in den Bereichen der Bestandsaufnahme des bestehenden Quartiers eingebunden. So werden Messdaten (Temperaturen, Volumenströme, Gasströme) der bestehenden Heizung regelmäßig ausgewertet und mit vorhandenen Simulationen verglichen. Zudem wurde von CUTEC die PV-Anlage energetisch evaluiert. So wurde zunächst eine Ertragsprognose nach DIN 5034 vorgenommen. Später wurden die ermittelten Ergebnisse mit der PV-Planungssoftware PV-Sol nochmals verifiziert. Zudem wird die Integration eines Wasserstoffsystems aus Elektrolyse und Brennstoffzelle geprüft, um den erzeugten PV-Strom saisonal speichern und zu gewünschten Zeiten einsetzen zu können. Auch hier ist CUTEC im Bereich der Bilanzierung und energetischen Evaluation mit eingebunden.

Projektübersicht



Systemintegration der eingesetzten Technologien. ©Fraunhofer ISE

Bearbeiter: Simon Breuer, M. Sc.

Projektleiter: Dr.-Ing. J. zum Hingst

- Wissenschaftliches Gesamtkonzept zum Reallabor südliches Emsland - Konzept zur mittel- und langfristigen Sicherung des Industriestandorts Lingen durch Offshore-Windenergie gespeiste Regenerative Speicherkraftwerke und Sektorenkopplung Power-to-X**

Das südliche Emsland, mit der Stadt Lingen und den umliegenden Gemeinden, weist einen besonderen wirtschaftlichen Schwerpunkt im Bereich der Energiewirtschaft auf. Dies betrifft sowohl den Bereich der Energieerzeugung mit leistungsstarker (2 GW) Netzanbindung im Netzknoten Hanekenfähr (z.B. Erdölförderung und Kraftwerke) und der Energieumwandlung (z.B. Raffinerien) als auch deren Zulieferer und Dienstleister. Zudem weist die Region eine Reihe von energieintensiven Betrieben (z.B. Elektrostahlwerk) auf, die sich hier vor dem Hintergrund einer räumlich nahen und sicheren Energieversorgung angesiedelt und entwickelt haben.

Um die konventionelle Energieversorgung möglichst wirtschaftlich durch ein innovatives, auf regenerativen Energien basierendes nachhaltiges Energiesystem zu transformieren, sind

vorrangig Standorte geeignet, die bereits über eine gut ausgebaute diesbezügliche Infrastruktur verfügen, sodass kostspielige Anbindungen an elektrische Netze, Gasnetze, Untergrundspeicher und industrielle Verbraucher mit hohen Verbrauchswerten minimiert werden können. Insbesondere die Verlagerung von 2 offshore HGÜ Knoten mit 2 GW Leistung von Cloppenburg nach Lingen/Hanekenfähr spielen in diesem Zusammenhang der Sektorenkopplung und möglicher regenerativer Speicherkraftwerke eine tragende Rolle, die unter den Stichworten Power-to-Gas/ -Liquid und Wasserstoffwirtschaft zusammengefasst werden.

Vor diesem Hintergrund hat das CUTEC Forschungszentrum in einem gemeinsamen Projekt mit der Stadt Lingen und dem Landkreis Emsland ein wissenschaftliches Gesamtkonzept für den Standort Lingen erarbeitet.

Bearbeiter: Dr.-Ing. Werner Siemers

Projektkoordinator: Dr.-Ing. J. zum Hingst

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. H.-P. Beck

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

Problem: Die Aufgabenstellung dieses Projektes ist es, die folgende Kernfrage zu beantworten: Ist, und wenn ja, unter welchen Bedingungen eine effiziente kontaktlose elektrische Energieübertragung im Nahfeld einer elektromagnetischen Übertragungsstrecke auch über relativ große Distanzen von mehreren Metern mit gutem Wirkungsgrad ($> 50\%$) möglich?

Ziel: Das Ziel ist die Bereitstellung einer neuen Lösung für die hocheffiziente kontaktlose elektrische Energieübertragung für verschiedene Anwendungsbereiche zu denen insbesondere das kontaktlose Laden von Elektrofahrzeugen gehört.

Stand der Technik: Herkömmliche Technologien zur kontaktlosen Energieübertragung im Nahfeld beruhen auf Übertragung im magnetischen oder elektrischen Feld. Bei der Energieübertragung im magnetischen Feld wirken zwei Spulen als Sender und Empfänger (induktive Kopplung), während bei dem elektrischen Feld die Energieübertragung zwischen zwei Metallplatten stattfindet (kapazitive Kopplung). Dabei lässt sich ein hoher Wirkungsgrad ($> 50\%$) nur bei Übertragungsdistanzen von einigen Millimetern bis einigen Zentimetern und bei der geeigneten Ausrichtung des Senders und Empfängers erzielen.

Lösungsweg: Für die Untersuchung wird ein Übertragungssystem, bestehend aus planaren Tesla-Spulen und kugelförmigen Antennen (jeweils für den Sender und Empfänger), ausgewählt. Es wird davon ausgegangen, dass die planaren Tesla-Spulen aufgrund ihrer Bauweise die Eingangsspannung auf der Sender-Seite hochtransformieren können, wodurch wiederum ein stärkeres elektrisches Feld zwischen den Antennen erzeugt wird. Die kugelförmigen Antennen stellen in diesem Fall die Elektroden eines Kondensators in der Luft dar. Die Ladungsverchiebung auf den Elektroden, hervorgerufen durch die angelegte Spannung, führt auf einen Verschiebungsstrom, der den Energietransport ermöglicht.

In der explorativen Phase wird zuerst die Feldverteilung sowohl in der unmittelbaren Umgebung der Tesla-Spulen als auch zwischen dem Sender und Empfänger analytisch, numerisch und messtechnisch ermittelt, um die darauf basierenden Kenngrößen zu bestimmen, die für eine Auslegung der Energieübertragung nach der vorgesehenen Methode wesentlich sind. Im Weiteren werden basierend darauf alternative Anordnungen zum Aufbau des Übertragungssystems untersucht. Dabei wird versucht durch mehrere Maßnahmen wie Variation der Länge der Spulen, des Abstandes zwischen den Spulenwicklungen, des Drahtdurchmessers (beziehungsweise durch Verwendung von HF-Litzen), und der Größe der Antennen, die Verluste im System zu reduzieren und den Wirkungsgrad zu maximieren.

Um die messtechnische Untersuchung dieses Forschungsthemas in der Abteilung Energie-

systemintegration zu ermöglichen, wurde im CUTEC ein Labor für elektrische Energieumwandlung und -übertragung eingerichtet.

<u>Bearbeiter:</u>	Karlo Tkalčec, M. Sc. karlo.tkalcec@tu-clausthal.de	(Tel.: 72-6328)
<u>Projektleiter:</u>	Dr.-Ing. Jens zum Hingst jens.zum.hingst@cutec.de	(Tel.: 05321/3816-8054)
<u>Wiss. Betreuung:</u>	Prof. Dr.-Ing. H.-P. Beck sekretariat@iee.tu-clausthal.de	(Tel.: 72-2570)

Projekt: Energie- und Wasserspeicher Harz (EWAZ)

Problem: Das Projekt EWAZ steht für Energie- und Wasserspeicher Harz. Das aus dem Harz bereitgestellte Trinkwasser, die im Harz gespeicherte Energie sowie Hochwasserschutzmaßnahmen im Harz haben jedoch eine über sich hinausgehende Wirkung in der Region. EWAZ ist ein lokales Projekt mit Nutzen für ganz Niedersachsen. Zum einen steigt der Trinkwasserbedarf in Niedersachsen seit Jahren stetig an und wird auch in Zukunft weiter steigen. Daher besteht ein zunehmender Bedarf an Rohwasser für die Trinkwasserbereitstellung. Zweitens können die zusätzlichen Speicher auch Starkregen auffangen und die Städte entlang der Flüsse schützen. Drittens werden die häufigen auftretenden Dürreperioden durch zusätzliche Speicher gemildert. Den Flüssen wird eine Mindestwassermenge zur Verfügung gestellt und die Fauna des Süßwasser-Ökosystems wird geschützt. Und nicht zuletzt braucht die Energiewende zur Integration erneuerbare-Energien-Speicher. Das Projekt EWAZ hat einen vielseitigen Nutzen für die Harzregion und darüber hinaus für Niedersachsen

Ziel: Ziel des Projektes ist die Entwicklung einer auf andere mögliche Standorte übertragbaren Methodik zur Erbringung der genannten Systemdienstleistungen:

- ▶ Hochwasserschutz
- ▶ Niedrigwasserablage
- ▶ Trinkwassergewinnung
- ▶ Bereitstellung von Energiespeicherwasser zur Kurzzeitstabilisierung des elektrischen Netzes als Teil des regionalen nachhaltigen Energiesystems

Alle vier Teilsysteme sind gekoppelt und beeinflussen sich dadurch gegenseitig. Die individuellen Beiträge der einzelnen Aufgaben zum übergeordneten Ziel einer integrativen und nachhaltigen Systemdienstleistung für Niedersachsen mit volkswirtschaftlichem Mehrwert sollen erfasst und quantifiziert werden.

Unter dem Teilaspekt Energiesystemintegration ist die Energiespeicherung der wichtigste Teil in diesem Projekt. Der Pumpwasserspeicher spielt eine entscheidende Rolle bei der Integration der erneuerbaren Energien in das Netz. Ziel ist es, die Netzstabilität bei hoher Durchdringung mit erneuerbaren Energien zu sichern.

Stand der Technik: Die traditionellen Pumpspeicherwerke (PSW) werden zusammen mit konventionellen Kraftwerken eingesetzt, wo sie in der Nacht speichern und den Bedarf am Tag ausgleichen. Da die konventionellen Kraftwerke zunehmend abgeschaltet werden, besteht ein Bedarf an flexiblen Energiespeichern. Die überschüssige Stromerzeugung kann zu jeder Tageszeit erfolgen. Daher muss ein Speicher schnell reagieren und auch bei Teilbeladung effizient arbeiten. Eine verfügbare Technologie für einen solchen Betrieb stellen drehzahlvariable

Maschineneinheiten dar.

Lösungsweg: Aus energetischer Sicht wird die mögliche Energiespeicherung in gegebener geologischer Form untersucht. Der Höhenunterschied und die Wassermenge an den einzelnen Standorten werden definiert. Das Energiepotenzial eines Pumpenspeicherwerks setzt sich aus der für die Speicherung reservierten Wassermenge und den geologischen Bedingungen der zu betrachtenden Standorte zusammen. Weiterhin ist die Integration von Energiespeichern ein wesentlicher Bestandteil der Untersuchung. Daher werden sowohl das bestehende Netz als auch im Bau befindliche Übertragungsleitungen untersucht. Die Varianten der Anbindung werden definiert und auch diese Varianten wurden mit den Netzbetreibern diskutiert.

Projektstand: Bis zum derzeit erreichten ersten Meilenstein des Projektes wurden dazu repräsentative Standorte im Westthar identifiziert, die den erwähnten Möglichkeitsraum für die anstehende Vertiefung der Maßnahmen zulassen. Dabei stand und steht der Systemgedanke im Hinblick auf das Zusammenwirken verschiedener Standorte/Maßnahmen in Bezug auf die verschiedenen Systemdienstleistungen im Vordergrund. Bei der Auswahl der Standorte des definierten Möglichkeitsraumes stand neben der Verfügbarkeit von Daten aus vorangegangenen Betrachtungen und der bestehenden Infrastruktur das Bündelungsgebot im Vordergrund. Eine ähnliche Vorgehensweise erfolgt üblicherweise bei der Errichtung von Trassen zur Energieübertragung (z. B. Südlink). Daher wurden insbesondere Standorte ausgewählt, an denen bereits eine entsprechende (wasserwirtschaftliche) Infrastruktur vorhanden ist. Ziel ist somit eine Minimierung der entstehenden Umweltbelastungen. Der Betrachtungsraum des Projektes umfasst ausgehend von diesen Randbedingungen folgende Standorte bzw. Regionen (vergleiche Abbildung 1):

- ▶ Okertalsperre - Huneberg (HW-Schutz, Niedrigwasserabgabe, Trinkwassernutzung, Energiespeicherwasser mit Unterbecken Okertalsperre)
- ▶ Odertalsperre - Stöberhai (Trinkwassernutzung mit neuem Oberbecken für die Energiespeicherwasserspeicherung)
- ▶ Wassernutzung im Siebertal (zwei Becken und Energiespeicherwasserspeicherung mit Oberbecken)
- ▶ Wassernutzung des Innerstetales (Überleitung von Wasser zur Grane zum Hochwasserschutz und zur Trinkwassergewinnung sowie Energiespeicherwasserbereitstellung mit untertägigen Becken an bestehender Innerstetalsperre)
- ▶ Granetalsperre (Staudammerhöhung für zusätzliches Trinkwasser sowie Hochwasserschutz und Niedrigwasserabgabe)

Projekt: Energie- und Wasserspeicher Harz (EWAZ)

- ▶ Herzberger Teich (Hochwasserschutz über den Oker-Grane-Stollen)

In der Region gibt es vier mögliche Standorte für Pumpspeichieranlagen:

- ▶ Okertalsperre - Huneber
- ▶ Odertalsperre - Stöberhai
- ▶ Siebertal
- ▶ Innerstetal

Mit der Okertalsperre existiert bereits ein Speicherbecken, das als Unterbecken dienen könnte. In der Nähe befindet sich auf der Höhe des Hunebergs ein alter Steinbruch, der als oberes Wasserbecken dienen könnte. Da diese möglichen Becken bereits vorhanden sind, scheint der Standort Okertalsperre - Huneberg eine praktikable Variante darzustellen. Daher wird dieser Standort derzeit eingehend unter energietechnischen Aspekten untersucht.

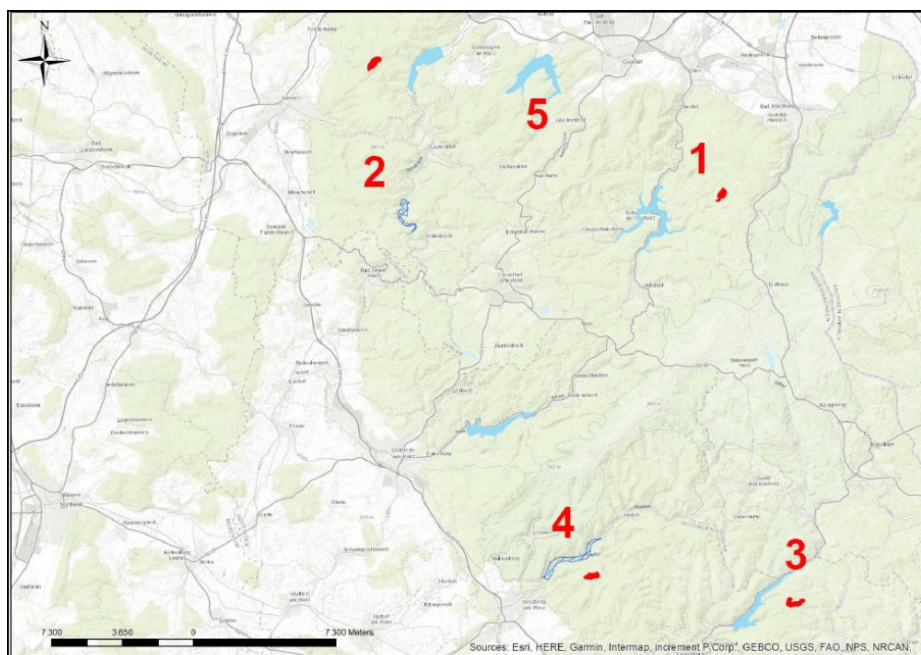


Abbildung 1: Betrachtete Standorte (Quelle; Ostfalia)

In der obigen Abbildung sind die Standorte der PSWs auf der Karte dargestellt. Die Nummern der Standorte sind in der nachstehende Tabelle aufgeführt.

Tabelle 1: Abschätzung der PSW Leistung

Nr.	Standort	Speichergröße [MWh]	Leistung in MW (4h)	Leistung in MW (6h)
1	Okertasperre	719.40	179.85	119.90
2	Odertalsperre	1382.12	345.53	230.35
3	Siebertalsperre	614.98	153.74	102.50
4	Innerstetalsperre	1225.16	306.29	204.19
		Summe	985	657

Die Standorte bieten insgesamt ein Potenzial von rund 1 GW Strom in 4 Stunden Turbinierdauer für die Harzregion. Der Anschluss einer so hohen Leistung stellt eine Herausforderung für das elektrische Netz dar. Daher werden die möglichen Verbindungen auf 110 kV-, 380 kV- und auch auf HGÜ-Ebene untersucht. Das 110-kV-Netz ist nicht in der Lage, eine Verbindung für alle Standorte bereitzustellen. Daher sind die 380-kV-Verbindungen erforderlich, um die gesamte Leistung zu übertragen.

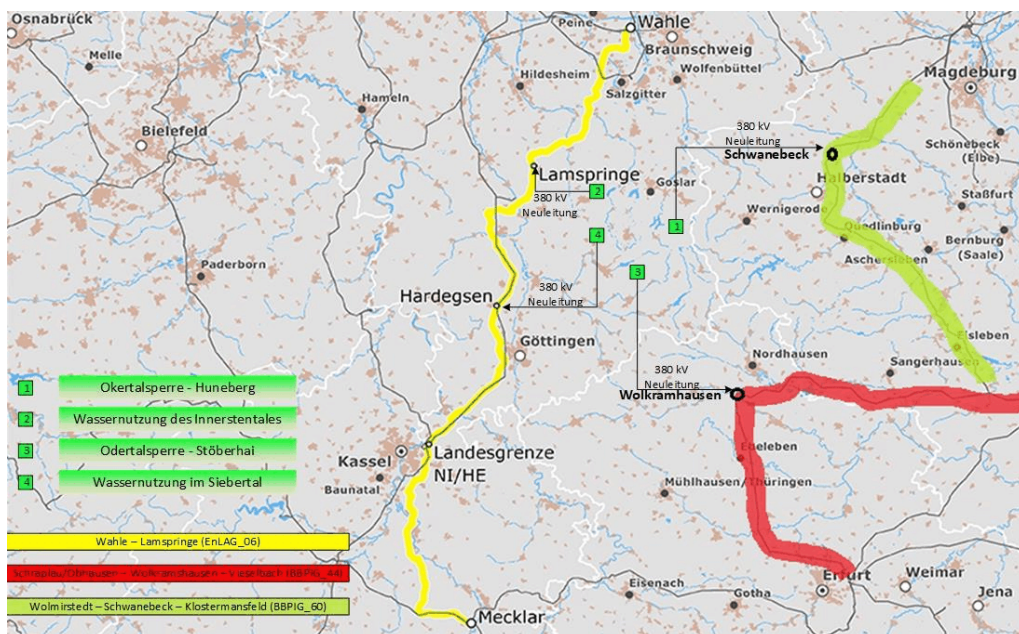


Abbildung 2: Die 380 kV Netzanbindung der Standorte

Projekt: Energie- und Wasserspeicher Harz (EWAZ)

- Projektpartner:**
- TU Clausthal (Verbundkoordinator)
 - Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme
 - Clausthaler Umwelttechnik Forschungsinstitut
 - Institut für Wirtschaftswissenschaften
 - Institut für Bergbau
 - TU Braunschweig
 - Leichtweiß-Institut für Wasserbau (LWI), Abteilung Hydrologie, Wasserwirtschaft und Gewässerschutz
 - Ostfalia Hochschule, Campus Suderburg
 - Institut für nachhaltige Bewässerung und Wasserwirtschaft im ländlichen Raum

- Kooperationspartner:**
- Harz Energie GmbH & Co. KG
 - Harzwasserwerke GmbH

Projektlaufzeit: 01.11.2019 - 31.06.2022 (verlängert bis 31.09.2022)

Gefördert durch: Europäischer Fonds für regionale Entwicklung (EFRE), Förderlinie Innovationsverbünde, Spezialisierungsfeld Energiewirtschaft

Bearbeiter: H. Yener Sisik, M. Eng. (Tel.: 72-8021)
yener.sisik@tu-clausthal.de

Projektkoordinator: Dr.-Ing. Jens zum Hingst (Tel.: 05321/3816-8054)
jens.zum.hingst@cutec.de

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

IEE

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

Problem: Die erneuerbare Energieerzeugung ist in Deutschland sehr unterschiedlich verteilt. Vor allem in ländlichen Regionen in Niedersachsen wird schon jetzt bilanziell betrachtet mehr Energie erzeugt als verbraucht. Dies stellt die Regionen vor die Herausforderung, möglichst viel der vor Ort erzeugten erneuerbaren Energie direkt zu nutzen oder zu speichern. In diesen Regionen ist die Biomasse häufig die vorherrschende Energiequelle, allerdings werden die Biomassenreaktoren bisher kaum flexibel betrieben, sondern vorwiegend zur Deckung der Grundlast eingesetzt.

Ziel: Ziel des Projekts ist die Konzeption und Demonstration eines vollständig regenerativen, dezentralen Energiesystems für eine energieautarke Region unter der besonderen Berücksichtigung der Systemintegration von Biomasse. Mittels eines ganzheitlichen, sektorübergreifenden Ansatzes soll dies am konkreten Beispiel der „Energieregion Hümmling“ erfolgen. Ausgehend vom derzeitigen Ist-Zustand sowie dem Ziel eines Energiesystems, welches nahezu zu 100% in allen Sektoren mit erneuerbaren Energien versorgt wird, sind optimale Transformationspfade zu entwickeln. Hierzu werden für die Studie die mittel- und langfristigen Entwicklungen anhand von zwei definierten Zeitschritten (Jahre 2030 und 2050) betrachtet.

Stand der Technik: Die Analyse des Energiesystems für die Region Hümmling erfolgt aus der Ermittlung sowie der Abschätzung von Verbrauch und Erzeugung an Energieträgern, wobei zwar der Beitrag der Biomasse schon jetzt zu einem Energieüberschuss führt, dieser jedoch bisher noch nicht flexibel genutzt wird.

An der TUC sind im Kontext der Energiesystemintegration in der Vergangenheit verschiedene Forschungsvorhaben und Projekte zur Analyse und Modellierung von Energiesystemen durchgeführt worden:

- ▶ Szenarien zur Energieversorgung in Niedersachsen im Jahr 2050
- ▶ Wind-Solar-Wärmepumpen-Quartier - Erneuerbar betriebene Wärmepumpen zur Minimierung des Primärenergiebedarfs (WpuQ)
- ▶ Huntorf 2020 - Technologieentwicklung und Effizienzgewinn durch Neu-Konzipierung des Gesamtprozesses Druckluftspeicherkraftwerk Huntorf mit regenerativ erzeugtem Wasserstoff

Lösungsweg: Unter Zuhilfenahme verschiedener Informationsquellen (u.a. Strom- und Erdgasdaten des regionalen Energieversorgers, Daten des Landkreises, Marktstammdatenregister, Energieatlas Niedersachsen) ist in einem ersten Schritt der Ist-Zustand des Energiesystems Hümmling in Bezug auf die Energiebedarfe für Strom und Wärme sowie die derzeitige Energie-

erzeugung und deren Potentiale ermittelt worden. Darauf aufbauend ist die Erstellung der Szenarien in einem dreistufigen Ansatz erfolgt, wobei in einem ersten Schritt hinsichtlich eines groben Überblicks die Ergebnisse aus dem bereits bestehenden, 2015 vom CUTEC erstellten Niedersachsen-Szenario 2050 auf das zu untersuchende Energiesystem heruntergebrochen worden sind.

In einem zweiten Ansatz, sind ausgehend von den ermittelten Prognosen für die Jahre 2030 und 2050, welche den Ausbaupfaden verschiedener Untersuchungen und Studien für Deutschland folgen, Jahresbilanzen erstellt worden.

Abschließend wird der energetische Zusammenhang der Energieregion Hümmling anhand einer hochauflösenden Simulation abgebildet, woraus sich detaillierte Aussagen zu den Steuerungs- und Speicheranforderungen treffen lassen. Zur Modellierung der mittel- und langfristigen Entwicklungen der Energieregion Hümmling in den Jahren 2030 und 2050 ist ein gemischt-ganzzahliges lineares Optimierungsmodell erstellt worden.

Projektstand: Die Ergebnisse des Projekts an der TUC gliedern sich in drei Aspekte:

1. Ansatz: Niedersachsen-Szenario

Die Anwendung des Niedersachsen-Szenarios 2050 auf die Energieregion Hümmling erfolgte ausgehend von der Eingabe der tatsächlichen Flächenanteile und der Vorgabe der Bevölkerungszahl (echt und solidar). Die Festlegungen bezüglich des Sachstands und der Ziele für das Jahr 2050 sind dem NDS-Szenario entnommen worden. Hieraus ergeben sich teilweise verfälschte Ergebnisse für den Standort Hümmling, jedoch sind erste Aussagen zu einem allgemeinen Überblick für die Energieregion möglich.

Aus diesen Annahmen wurde eine kumulierte Bruttostromerzeugung aller erneuerbaren Energien von 3.207 GWh pro Jahr berechnet. Aus der Gegenüberstellung der Erzeugung und dem anhand der Bevölkerungszahl und der Wirtschaftsdaten ermittelten Endenergiebedarf ergab sich für das Energiesystem Hümmling ein massiver Überschuss an Erzeugungskapazitäten von 260% für Kraft-, Licht-, Informations-, Kommunikations- und Kälteanwendungen (KLIK), fast 100% für Gebäudewärme sowie fast 200% für Prozesswärme.

Um den geforderten Ausgleich in Richtung 100% EE zu gewährleisten, ist im Anschluss eine Anpassung der Erzeugungskapazitäten durchgeführt worden. Die angepasste Simulation ergab für einen entsprechenden Ausgleich nur noch 150 ha Solardachflächen bei vollständigem Verzicht auf Solarfreiflächenanlagen sowie die Reduktion der Windparkfläche auf 1,4% statt der zuvor angesetzten 2,1%.

Nach derzeitigem Stand erzeugt die ER Hümmling somit schon mehr Strom aus erneuerbaren Energien, als nach dem 100% NDS-Szenario im Jahr 2050 nötig wäre. Somit ergibt sich die

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

Möglichkeit, entsprechende Überschüsse aus regionaler Sicht betrachtet zukünftig beispielsweise zu exportieren.

In einem weiteren Schritt ist nun auch die Anpassung für Biogas vorgenommen worden, indem auf der Grundlage des 100% NDS-Szenarios, im Gegensatz zu der bisherigen Anwendung des Bundesdurchschnitts für die Flächenaufteilung, die tatsächlichen Flächenangaben des Standorts Hümmling Berücksichtigung finden. Nach den Vorgaben des 100% NDS-Szenarios wird verfügbares Biogas für die Bereiche Mobilität und Prozesswärme eingesetzt, wonach eine Erhöhung des Biogas-Anteils eine verringerte Wasserstoffherzeugung und Einspeicherung zur Folge hat. Zur Deckung der Prozesswärme wird daraufhin weniger Strom angesetzt und der Anteil der Elektroantriebe im Mobilitätssektor nimmt entsprechend ab bei steigendem Brennstoffeinsatz.

Die abschließende Simulation ist mit dem Ziel der Flächenoptimierung für die Windenergie durchgeführt worden. Als Ergebnis dieser Modellierungen werden in Summe 1.213 GWh Strom aus erneuerbaren Energien erzeugt, wovon 396 GWh für Power-to-Gas Anwendungen genutzt und weitere 204 GWh als erzeugter Wasserstoff zwischengespeichert und mit 77 GWh rückverstromt werden. Der Gesamtbedarf an Strom in Höhe von insgesamt 649 GWh lässt sich unter Berücksichtigung der Speicherung und Rückverstromung zu 100% aus erneuerbaren Energien mit einer Erzeugung von 657 GWh decken, was nachfolgend in der Abbildung 1 als Bilanzierung der Simulation aus dem NDS-Szenario dargestellt ist.

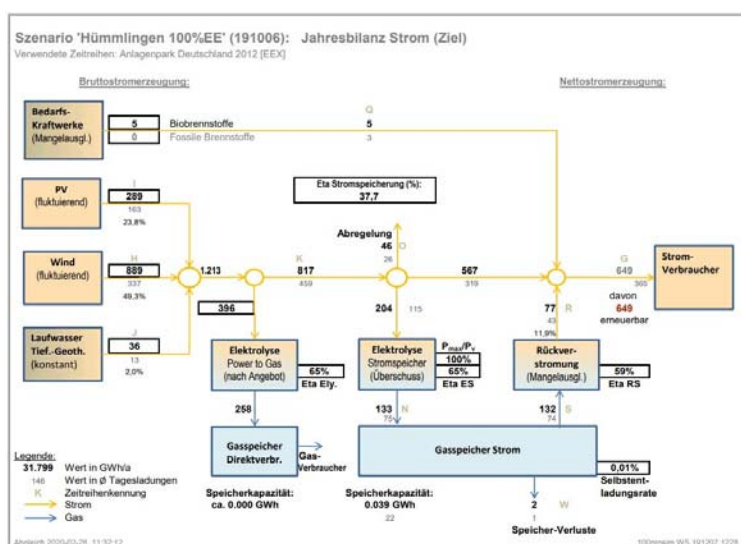


Abbildung 1: Bilanzierung für die Energieregion Hümmling nach dem 100 % NDS-Szenario, erstellt mit 100prosim

2. Ansatz: Jahresbilanzen

Da die pauschale Herunterrechnung aus den Simulationsergebnissen des NDS-Szenarios nicht sinnvoll erscheint, wird die zukünftige Entwicklung als Stromwende dargestellt, da erneuerbare Energien in erster Linie Strom erzeugen und über die Sektorenkopplung die Bereiche Wärme und Mobilität zusätzlich versorgen.

Die Vorgehensweise zur Erstellung einer Jahresbilanz sieht die Deckung des Strombedarfs aus der Erzeugung aus erneuerbaren Energiequellen vor, wobei der Stromüberschuss in die Sektorenkopplung einfließt. Im Anschluss erfolgt die Betrachtung der einzelnen Sektoren Wärme, Prozesswärme und Mobilität. Der Wärmesektor wird hierzu über elektrisch betriebene Wärmepumpen sowie einem erhöhten Anteil an Biomasse bei reduziertem Einsatz fossiler Energieträger (für das Jahr 2030) abgebildet. Für den Sektor der Prozesswärme werden Biomasse sowie verschiedene Power-to-X-Technologien eingesetzt. Im Rahmen des Sektors Mobilität wiederum wird der Individualverkehr auf batteriebetriebene Fahrzeuge umgestellt, wobei Anteile aus Biogas/Biomasse den Güterverkehr und größere Fahrzeuge versorgen.

Im Bereich der Windenergie wird kein weiteres Ausbaupotential gesehen, lediglich die Erzeugung aus PV wird als steigerungsfähig angenommen. Ausgehend von der Analyse des Projektkoordinators 3N wird sich der Anteil Biogas geringfügig verringern, was nach relevanten Studien auch für den Bedarf des Stroms zugrunde gelegt wird.

3. Ansatz: Simulation

Im Projekt ist am IEE ein gemischt-ganzzahliges lineares Optimierungsmodell entwickelt worden, welches die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien, den Bedarf, die Importe und Exporte über die Grenzen der Energieregion sowie die Kopplung zum Wärmebedarf über Pufferspeicher in Form von Zeitreihen mit einer einstündigen Auflösung abbildet.

Mithilfe des Simulationsmodells ist es gelungen, die Betriebsweise der Biogasanlagen, ausgehend vom bisherigen Grundlastbetrieb, mit dem Ziel des Ausgleichs fluktuierender Einspeisung zu optimieren, was in der Abbildung 2 dargestellt ist. Um eine 100%-ige Energieversorgung aus erneuerbaren Quellen in Hümmling zu erreichen, müssen die Biomassenreaktoren deutlich flexibler betrieben werden als bisher.

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

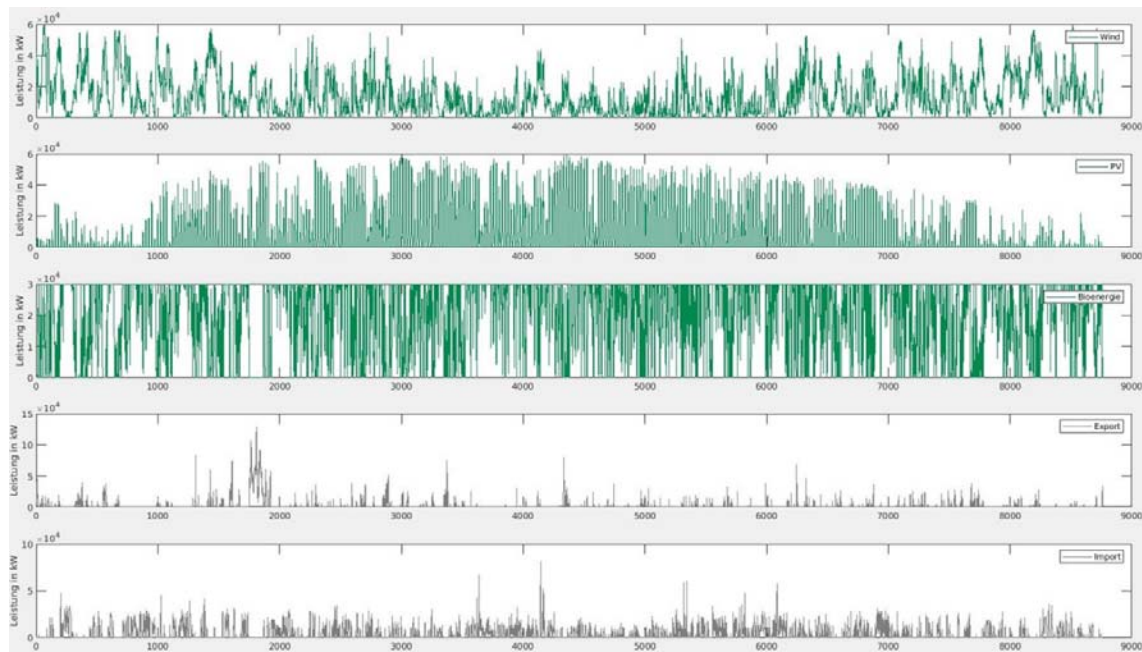


Abbildung 2: graphische Darstellung des optimiertem Energiezustands der Energieregion Hümmling

Projektpartner: An dem Projekt sind folgende Institute und Unternehmen beteiligt:

- 3N Kompetenzzentrum Niedersachsen Netzwerk Nachhaltige Rohstoffe und Bioökonomie e. V. (Projektkoordinator)
- Clausthaler Umwelttechnik Forschungszentrum (CUTEC) an der TU Clausthal
- Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst Hildesheim/Holzminde/Göttingen (HAWK) - Fakultät Ressourcenmanagement
- Samtgemeinde Werlte
- GeLA Energie GmbH
- INTIS GmbH
- ENERCON GmbH
- AUDI AG
- EWE Netz GmbH
- Nordwestsolar GmbH

<u>Projektlaufzeit:</u>	01.08.2019 - 31.10.2021
<u>Gefördert durch:</u>	Das Projekt wird durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft gefördert.
<u>Bearbeiter:</u>	Daniel Alexander Piontek, M. Sc. (Tel.: 72-2938) daniel.alexander.piontek@tu-clausthal.de
	Dr.-Ing. Werner Siemers (Tel.: 72-6240) werner.siemers@cutec.de
<u>Projektleiter:</u>	Dr.-Ing. Jens zum Hingst (Tel.: 05321/3816-8054) jens.zum.hingst@cutec.de

Projekt: ISWK - Innovatives Strom- und Wärmekonzept im Zweitälerland

Problem: Die Energiewende bringt Veränderungen in nahezu allen Bereichen unseres Alltags. Neben der Umstellung von fossiler auf erneuerbare Energien nimmt die Einsparung und Senkung des Energieverbrauchs im Gebäudesektor eine wichtige Rolle auf dem Weg zur Klimaneutralität ein. Durch die energetische Sanierung von Bestandsgebäuden kann der Primärenergieverbrauch im Gebäudesektor entscheidend gesenkt werden. Dies kann ein wertvoller Beitrag zum Erreichen des von der Bundesregierung ausgegebenen Ziels eines nahezu klimaneutralen Gebäudebestands in der Bundesrepublik Deutschland bis zum Jahr 2050 sein [1].

Ein praktischer Fall für Kommunen in diesem Bereich ergibt sich in der Sanierung von Schulgebäuden.

Ziel: Das Gesamtziel des Projektes ist die Sanierung und die regenerative Energieversorgung der Zweitälerland-Grundschule sowie mehrerer Mehrfamilienhäuser (MFH) in der Gemeinde Gutach im Breisgau. Eine ansässige Brennerei produziert einen Überschuss an Wärme, die über ein kaltes Nahwärmenetz (Low-Ex) zur Schule bzw. den MFH transportiert wird (vgl. Abbildung). Durch die Verwendung der Low-Ex-Technologie kann die Wärme möglichst effizient zu den Verbrauchern transportiert werden. Die Heizung für die Gebäude wird dann über Wärmepumpen realisiert. Dazu werden die Gebäude energetisch saniert und mit Flächenheizungen ausgestattet. Zur Speicherung der Energie soll ein Eisspeicher zur Anwendung kommen, der die latente Wärme des Kristallisationsprozesses von Wasser nutzt. Die elektrische Energie zur Versorgung der Wärmepumpen und anderer elektrischer Verbraucher soll durch eine PV-Anlage auf dem Dach des Schulgebäudes realisiert werden. Durch eine eventuelle Integration eines Wasserstoffsystems aus Elektrolyse und Brennstoffzelle kann der Autarkiegrad des Systems durch eine saisonale Speicherung des Wasserstoffs erhöht werden. Nach der Inbetriebnahme des Systems soll ein Vergleich mit dem alten Gebäudebestand durchgeführt und das Einsparpotential an Primärenergie ermittelt werden.

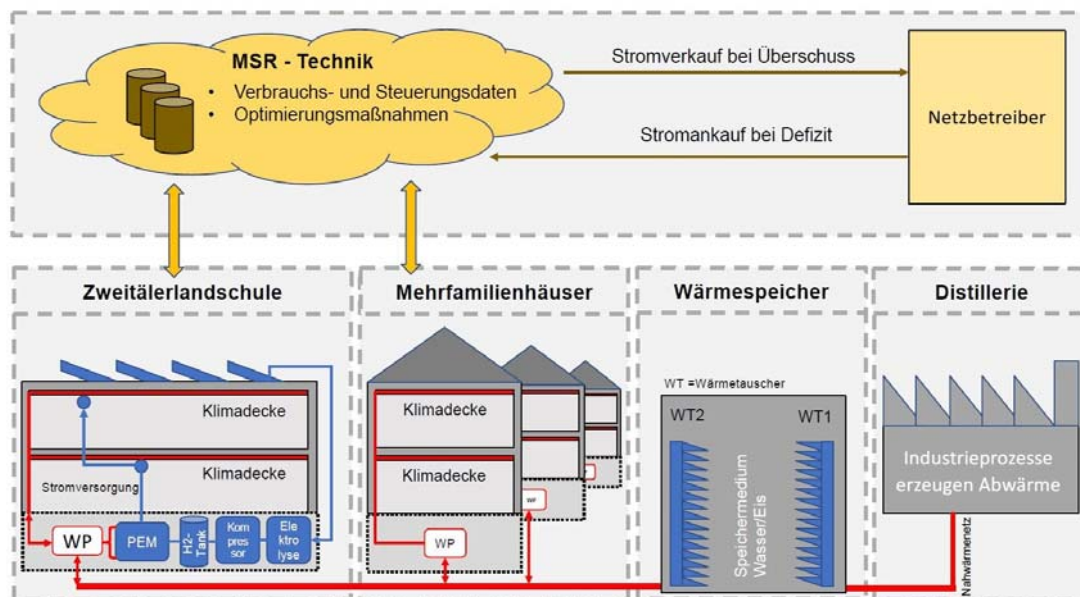


Abbildung 1: Systemintegration der eingesetzten Technologien. © Fraunhofer ISE

Stand der Technik: In einer Wärmepumpe zirkuliert ein Fluid, das bei einer niedrigen Temperatur verdampft, anschließend durch einen Kompressor verdichtet wird und danach aufgrund der Druckerhöhung bei einer höheren Temperatur wieder kondensiert. Durch diesen Prozess kann Wärme von einem kalten zu einem warmen Reservoir befördert werden.

Die Eingangsenergie zur Verdampfung des Fluids kann bei Wärmepumpen aus unterschiedlichen Quellen gewonnen werden. So können Wärmepumpen u.a. die Außenluft, das Erdreich oder das Grundwasser als Energiequelle nutzen. Wird eine Wärmepumpe mit einem Eisspeicher kombiniert, kann der Speicher die Eingangsenergie für die Wärmepumpe liefern. Die Firma *caldoa GmbH* hat sich auf solche Konzepte spezialisiert [2]. Aus Effizienzgründen arbeiten Wärmepumpen mit niedrigen Temperaturen beim Heizen. Um ein Gebäude bei niedrigen Vorlauftemperaturen beheizen zu können, sind großflächige Niedertemperaturheizungen notwendig. Hier ist eine Sanierung und ein Umbau des Heizsystems notwendig [3]. Darüber hinaus gewinnt eine intelligente Nutzung von verfügbarer Abwärme bzw. einer Kopplung von Kühl- und Heizprozessen im Gebäudesektor zunehmend an Bedeutung. Im thüringischen Ilmenau wird die bei der Kühlung der Eishalle entstehende Abwärme zum Beheizen der daneben neu erbauten Schwimmhalle genutzt [4].

Die aufgeführten Aspekte wie der Low-Ex-Technologie, der Sanierung von Bestandsgebäuden sowie der intelligenten Nutzung verfügbarer Wärmequellen verbunden mit einer saisonalen Speicherung sollen nun in diesem Projekt zusammengeführt werden und als Demonstrator für

Projekt: ISWK - Innovatives Strom- und Wärmekonzept im Zweitälerland

die Sektorenkopplung im Quartiersbereich dienen.

Lösungsweg: Zunächst wird eine umfassende Bestandsaufnahme des bestehenden Quartiers durchgeführt. Dazu gehört insbesondere die messdatentechnische Erfassung der Gasbezüge sowie der Heizleistungen. Darüber hinaus werden Standardlastprofile der Stromverbräuche ermittelt. Zur besseren Abschätzung des Energieverbrauchs der Gebäude im sanierten Zustand werden Simulationen zum Heiz- und Kühlbedarf der Gebäude erstellt. Auf Basis der Lastprofile wird eine energetische Konzeptionierung des Gesamtsystems mit den Elementen wie u.a. Wärmepumpen, Eisspeicher etc. in verschiedenen Varianten vorgenommen. Anschließend wird in gemeinsamer Abstimmung der Projektpartner eine Variante als die umzusetzende ausgewählt. Danach erfolgen die Detailplanung und die Umsetzung des Bauprojektes. Parallel befinden sich die entsprechenden Gebäude im Sanierungszustand. Nach Inbetriebnahme des Systems wird dieses einem Monitoring unterzogen, um einen Soll-Ist-Vergleich durchzuführen sowie eine energetische Evaluation verglichen mit dem unsanierten Fall vorzunehmen.

Projektstand: Die energetische Evaluation des alten Quartiers wird laufend durchgeführt. Dazu wurden Messzähler für die Heizung und den Gasverbrauch in der Schule installiert, die eine lückenlose Erhebung und Darstellung der Daten gewährleisten. Die Heiz- und Kühllast der Gebäude wurden für den sanierten Fall simuliert und in die energetische Evaluation der verschiedenen Systemvarianten einbezogen. Die Erzeugerprofile der PV-Anlage auf dem Dach der Schule sowie die Standardlastgänge der elektrischen Verbraucher wurden auf Basis des Jahresverbrauchs simuliert und erstellt, so dass der Autarkiegrad und das CO₂-Minderungspotential der Systemvarianten daraus bestimmt werden können. Der Sanierungsprozess der Gebäude mit der Installation von Flächenheizungen befindet sich momentan in der Umsetzung. In naher Zukunft wird die sinnvollste der betrachteten Systemvarianten ermittelt und zur Umsetzung mit der Detailplanung begonnen.

Anmerkung: Bei den Berichten handelt es sich um das allgemeine Projekt und damit um Tätigkeiten aller Projektpartner. Der Beitrag der einzelnen Projektpartner wurde hier nicht explizit aufgeschlüsselt.

- Referenzen:**
- [1] Umweltbundesamt: Klimaneutraler Gebäudebestand 2050. Energieeffizienzpotentiale und die Auswirkungen des Klimawandels auf den gebäudebestand, 2017
 - [2] caldoa GmbH: CO2-Neutrale Energiekonzepte, Systemlösungen von Experten aus erster Hand
 - [3] Lämmle, M. Et al: Gezielter Heizkörper-Austausch in Wärmepumpen-Heizanlagen, 2021
 - [4] Puls, A., Spieß, S.: EFRE konkret: Energie sparen bei der Schwimmhalle Ilmenau

- Projektpartner:**
- Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
 - Gemeinde Gutach im Breisgau
 - caldoa GmbH
 - aleon GmbH
 - SCHOLZE-THOST GmbH

Projektlaufzeit: 01.08.2020 - 31.07.2024

Gefördert durch: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)

Bearbeiter: Simon Breuer, M. Sc. (Tel.: 72-6341)
simon.breuer@cutec.de

Projektleiter: Dr.-Ing. Jens zum Hingst (Tel.: 05321/3816-8054)
jens.zum.hingst@cutec.de

4 Personelle Besetzung

4.1 Haupt- nebenamtliche MitarbeiterInnen des Instituts

Hochschullehrer und Institutsdirektor:	Prof. Dr.-Ing. H.-P. Beck (Lehrstuhl Elektrische Energietechnik und Grundlagen der Elektrotechnik)
Wiss. Assistent/Abteilungsleiter:	Dr.-Ing. D. Turschner Dr.-Ing. R. Bengler (EST) Dr.-Ing. J. zum Hingst (CUTEC)
Honorarprofessor:	Prof. Dr.-Ing. Buddenberg, Prof. Dr.-Ing. Lülf, Prof. Dr. rer. nat. H. Wenzl
Wissenschaftliche Mitarbeiter:	Dipl.-Ing. F. Deblon H. Göken, M. Sc. J. Grabow, M. Sc. A.-K. Klaas, M. Sc. Ch. Klaas, M. Sc. J. Klink, M. Sc. N. Kreth, M. Sc. Dr.-Ing. G. Lin (Austritt 06/21) Dipl.-Ing. A. Oberland (Austritt 12/21) N. Orazov, M. Sc. D. A. Piontek, M. Sc. S. Reineke, M. Sc. Dipl.-Ing. V. Spielmann Dipl.-Ing. E. Tchoupou Lando (Austritt 12/20) M. Thiele, M. Eng. Dipl.-Ing. A. Ufkes

Externe Doktoranden:

Fiebrich, Stefan
Hauser, Gerald
Oberland, Alexander
Sanusi, Kamilu (DAAD)

Mitarbeiter:innen im Technischen
und Verwaltungsdienst (MTVD):
(Landes- und Drittmittelstellen)

Frau C. Schönemann
Frau S. Zugehör
Herr J.-N. Gebhardt
Herr M. Kirchner
Herr I. Lührig
Herr K. ter Smitten
Herr L. Gehrke (Auszubildender)
Herr M. Henze (Auszubildender)
Herr C. Köthe (Auszubildender)
Herr K. Maib (Auszubildender, Austritt 01/21)

Die Mitarbeiter des Institutes für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme



H.-P. Beck
(Direktor)

- 2570



R. Bengler
(Wiss. Assistent)

- 05321/3816-
8067



D. Turschner
(Wiss. Assistent)

- 2592



S. Zugehör
(Sekretariat)

- 2299



F. Deblon
(WiMa, System-
integration)

- 05321/3816-
8063



H. Göken
(WiMa, System-
integration)

- 05321/3816-
8161



J. Grabow
(WiMa, System-
integration)

- 05321 3816-8065



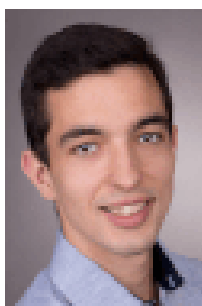
A.-K. Klaas
(WiMa, Elektr.
Verteilnetze)

- 2593



Ch. Klaas
(WiMa, Virtuelle
Synchronmaschi-
ne)

- 3736



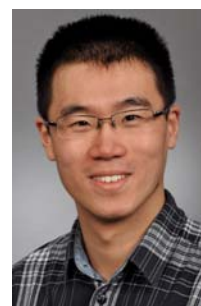
J. Klink
(WiMa, Elektr.
Energiespeicher-
systeme)

- 05321/3816-
8077



N. Kreth
(WiMa, Elektr.
Verteilnetze)

- 3597



Dr. G. Lin
Austritt 06/21

Mitarbeiterinnen / Mitarbeiter

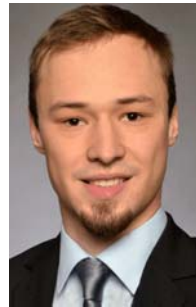
Telefon: 05323/72-



A. Oberland
Austritt 12/21



N. Orazov
(WiMa, System-
integration)
- 05321/3816-
8065



D. A. Piontek
(WiMa,
Leistungs-
mechatronik
- 2938



S. Reineke
(WiMa,
Leistungs-mecha-
tronik
- 2929



V. Spielmann
(WiMa, Batterie-
systeme)
- 2594



E. Tchoupou Lando
Austritt 12/20



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



A. Ufkes
(WiMa, Netze)
- 2594



J.-N. Gebhardt
(Elektronik)
- 3720



L. Gehrke
(Auszubildender)
- 2940



M. Henze
(Auszubildender)
- 3839



M. Kirchner
(Elektronik)
- 3839



Ch. Köthe
(Auszubildender)

- 3839



I. Lührig
(Energietechnik)

- 5067



K. Maib
Austritt 01/21



C. Schönemann
(Techn. Zeichnerin)

- 2177



K. ter Smitten
(Mechanik)

- 2571

4.2 Honorarprofessuren und Lehrbeauftragte

	Lehrgebiete:
Dr.-Ing. R. Benger	Batteriesystemtechnik und Brennstoffzellen Sicherheit und Zuverlässigkeit von Batteriesystemen
Prof. Dr.-Ing. Buddenberg	Fossile und regenerative Energiere Ressourcen
Dr. rer. nat. W. Faber	Energiesysteme: Kapitelteil Kernbrennstoffe
Dr. Ing. J. Jahn (bis WS 20/21)	Regenerative Elektrische Energietechnik
Prof. Dr.-Ing. J. Kühl (Ostfalia)	Regenerative Energiequellen
Dr.-Ing. S. Mecke	Grundstoffindustrie und Energiewende
Dr.-Ing. W. Siemers	Berechnung und Bewertung der Emissionen von nachhaltigen Energiesystemen und Energieprozessen
Dr.-Ing. J. zum Hingst	Elektrische Energieverteilung

4.3 Wissenschaftliche Hilfskräfte

Herr S. Asendorf	Herr M. Höcherl	Herr T. Reichrath
Herr T. Brands	Frau L. Hommes	Herr P. Riedel
Herr R. Chornyshchuk	Herr F. Keßler	Herr H. Rohde
Frau F. Daragan	Frau M. Knop	Frau A. Sander
Frau M. Eder	Frau A. Köhler	Herr C. Soilemezidis
Herr L. H. Fischer	Frau K. Lerch	Herr S. Stenger
Herr P. Geißler	Frau M. Neumann	Herr B. Talom
Herr H. Hanse	Herr S. Njoya	Herr M. F. Wielage
Herr M. Hartleb	Herr F. C. Odendahl	Frau H. Winking
Herr A. Hebenbrock	Herr N. Ploch	

4.4 Mitgliedschaften in wissenschaftlichen Vereinigungen und in den Selbstverwaltungsgremien der Universität

- | | |
|---------------------------|---|
| Prof. Dr.-Ing. H.-P. Beck | <ul style="list-style-type: none"> - DFG-Gutachter - Reviewer Springer Nature - Ordentliches Mitglied der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft - Ordentliches Mitglied der acatech (Akademie für Technikwissenschaften e. V.), AG Energiewende - Mitglied der Initiative GET H2 (Wasserstoff-Reallabor) - Gutachter der Bayerischen Forschungstiftung - Gutachter der Baden Württemberg Forschungstiftung - Gutachter BMBF, Mobility to Grid, Cube Cluster - Gutachter BMWi, Energiewende - Mitherausgeber der Hütte Springer Verlag 2016/2019 - Vorstandsmitglied des CUTEC-Instituts (ab 01.08.2017) - Vorstandsmitglied DSC-Celle - Studiengangverantwortlicher En, EST |
| Dr.-Ing. D. Turschner | <ul style="list-style-type: none"> - Mitglied der Jury bei “Jugend forscht” - Mitglied des internationalen Programmkomitees “International Conference on Renewable Energy and Power Quality ICREPQ - Mitglied im Prüfungsausschuss “Energie und Rohstoffe” - Mitglied der Kommission zum wissen. Fehlverhalten - Evakuierungsbeauftragter |
| Matthias Kirchner | <ul style="list-style-type: none"> - Projekt “Restrukturierung elektrischer und elektronischer Werkstätten der TUC” - Vertreter Brandbeauftragter - Gefahrstoffbeauftragter |
| Ingo-Gerrit Lührig | <ul style="list-style-type: none"> - Energiescout - Sicherheitsbeauftragter - Brandbeauftragter |
| Corinna Schönemann | <ul style="list-style-type: none"> - Vertreterin Evakuierungsbeauftragte |

Kai ter Smitten - Vertreter Erste Hilfe Beauftragter

Sylvia Zugehör - Erste Hilfe Beauftragte

5 Links

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

6 Anlagen

Die Anlagen sind in der angegebenen Reihenfolge eingebunden

Anlage 1 Ressourcen des Institutes

Anlage 2 Ausbau der Institutseinrichtungen im Berichtszeitraum

Ressourcen des Institutes

●	Verfügbare Gebäudefläche	1670 m ²
	-Bürofläche	826 m ²
	-Labor-/Prüffeldfläche	794 m ²
	-Büros und Labor (EST Goslar)	300 m ²
●	Mitarbeiter (Stand Ende 2021)	
	-wissenschaftliches Personal/Doktoranden	13
	-techn./Verwaltungsangestellte	9
	-Lehrbeauftragte	8
	-Wissenschaftliche Hilfskräfte	29
	-externe Doktoranden	4
		Σ 63
●	Prüffeld mit	
	- Maschinen-/Antriebslabor	
	- Energieelektroniklabor	
	- Hochspannungs-/Energieanlagenlabor	
	- Prüfstände für Walzwerks-, Bahn- /Schredder-Antriebe mit Umrichter	
	- Batterie-Prüfstand und Impedanzspektrometer	
	- Prüfstand für Windkraftanlagen zur Getriebeprüfung	
	- Schleudergrube	
	- Brennstoffzellen-Versuchseinrichtung, Elektrolyseur	
●	Prüfstand HGÜ-VISMA-Triple-Terminal	
●	Prozeßrechner-/Simulationstechniklabor: 5 Digitale Signalprozessor - Einschübe, CIP-Pool	
●	MATLAB-Simulink, SABER, PSPICE, PowerFactory, Integral	
●	Digitale Signalprozessoreinheiten (Einschübe der Firma dSpace)	
●	Labor elektrische Verteilnetze (Multi-VISMA), (EST)	
	- 2 Synchronmaschinen-/Asynchronmaschinensätze Netznachbildungen	
	- Nachbildung Umrichternetzeinspeisung	
●	Speicherlabor (EST) mit Zellprüfständen 60 V/1500 A	

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

Ausbau der Institutseinrichtungen im Berichtszeitraum

Anlage 2

Zur weiteren Komplettierung der Institutseinrichtungen wurden folgende Neuanschaffungen getätigt:

- Batterie-Nachbildung für VISMA-Prüfstände
- Fassadenintegrierte Photovoltaikanlage 10 kW
- Earsy-Windmühle 10 kW
- Versuchsanlage zur Kurzunterbrechungskompensation in Niederspannungsnetzen
- Virtuelle Synchronmaschine (Multiterminal-VISMA-Verbund)
- Aktives Verteilnetz Labor mit 2 realen und 2 virtuellen Synchronmaschinen mit Leistungsnachbildungen
- Schnellladeeinrichtung (MoBat) für Pulsbetrieb (800 V, 1000 A, $f_p > 0,1$ Hz) im BTZ/IEE
- 400 kVA-VISMA-Umrichter mit Hochleistungsbatterie (50 kWh, 500 V, 500 A) (Pilotz)
- 300 kVA-VISMA-Umrichter mit Raspberry-Pi-VISMA-Modell (CUTEC/Pilot 1)