



# TU Clausthal

Institut für Elektrische  
Energietechnik



Institutsdirektor:  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Beck  
Telefon: (0 53 23) 72-2570

Sekretariat:  
Elke Mendt

Telefon: (0 53 23) 72-2299  
Telefax: (0 53 23) 72-2104  
mendt@iee.tu-clausthal.de

# Jahresbericht

## 2008/2009

des Institutes für

## Elektrische Energietechnik

Clausthal- Zellerfeld  
Oktober 2010

IEE-Bericht Nr. 19/20



## **Inhaltsverzeichnis**

0	Vorwort	1
1	Lehre	3
1.1	Vorlesungen	3
1.2	Übungen, Praktika, Mentoring	6
1.3	Seminarvorträge	8
1.4	Studien- und Diplomarbeiten	9
2	Veröffentlichungen, Dissertationen, Habilitationen	19
2.1	Zeitschriften- und Tagungsaufsätze, Patente /- anmeldungen	19
2.2	Vorträge / Seminare	25
2.3	Berichte, Technische Notizen	26
2.4	Geförderte Forschungsvorhaben	27
2.5	Veranstaltungen, Exkursionen, Gastaufenthalte	32
3	Forschungsarbeiten + Forschungsgebiete des Institutes	34
3.1	Ausbau der Institutseinrichtungen	34
3.2	Projektblätter	34
4	Personelle Besetzung	133
4.1	Hauptamtliche Mitarbeiter des Instituts	133
4.2	Nebenamtlich tätige Hochschullehrer bzw. Lehrbeauftragte	139
4.3	Wissenschaftliche Hilfskräfte	139
4.4	Mitgliedschaften in wissenschaftlichen Vereinigungen und in den Selbstverwaltungsgremien der Universität	140
4.5	Ressourcen des Institutes	141
5	Links	142



## **0 Vorwort**

Liebe Freunde und Förderer, Ehemalige und Mitarbeiter des Institutes,

seit dem Erscheinen des letzten Dreijahresberichtes 2005/06/07 ist der Umstrukturierungsprozess der TU Clausthal nun weitestgehend abgeschlossen. Ziel war es, trotz der 10 %igen Budgetkürzung die Universität konkurrenzfähig für die Zukunft aufzustellen und zwar in Abstimmung mit unseren befreundeten Wettbewerbern in Hannover und Braunschweig, mit denen wir jetzt zur Niedersächsischen Technischen Hochschule (NTH) per Gesetz zusammen geschlossen wurden. So wie es derzeit aussieht, werden wir im Rahmen des NTH-Gesetzes zusammenrücken. Das neu entstandene Gebilde wahrt allerdings die altbekannten Marken "Leibniz Universität Hannover", "Carolina Wilhelmina TU Braunschweig" und "TU Clausthal"; die Ressourcen sind trilokal und arbeitsteilig gebündelt. Ziel ist es in der Exzellenzinitiative 2010/11 neben Exzellenz, die allein nicht ausreicht, auch noch Größe mit in den Ring zu werfen. Ein 25 Millionen Zusatz-Budget für die NTH soll dabei helfen.

Die TU Clausthal hat mit ihren vom Senat beschlossenen Schwerpunkten relativ gute Startbedingungen, denn die neuen Forschungscluster

- Materialtechnik
- Energiewissenschaften
- Simulationswissenschaft

sind für Clausthal reserviert und mehr oder weniger auch in der NTH als solche anerkannt. Wer die Hochschule kennt, weiß das die Themen passen. Die Fächer Physik/Chemie und Geowissenschaften sind hier eingegliedert worden. Sinnvoll und aussichtsreich ist eine Ausrichtung auf die technologischen Inhalte:

- physikalische Technologien
- chemische Technologien
- Informationstechnologien

wobei die Gebiete Material und Energie eine besondere Berücksichtigung finden werden. Die die TU Clausthal mittlerweile mittragende quantitativ ausgerichtete Betriebs- und Volkswirtschaft bleibt unangetastet, im Gegenteil, der Bereich wird erfolgsbedingt weiter ausgebaut. Die TU Clausthal hat auf die beschriebene niedersächsische Entwicklung proaktiv reagiert und nicht nur die Clusterbildung voran getrieben, sondern auch die Gründung von drei zentralen Einrichtungen:

- Clausthaler Materialzentrum
- Niedersächsisches Energieforschungszentrum in Goslar
- Simulationswissenschaftliches Zentrum

vorgenommen und mit zusätzlicher Ausstattung versehen.

Am weitesten fortgeschritten ist das EFZN, an dem auch nennenswert das IEE beteiligt ist. Es wurde offiziell am 17.06.2010 in Goslar, Am Stollen 19 eingeweiht und startete 2008 mit einem jährlichen Budget von rd. 2 Mio. Euro. Thema ist die gesamte Energiewertschöpfungskette und ihre Nachhaltigkeit. Derzeit bilden sich die Schwerpunkte:

- Energiewirtschaftliche Nutzung des Untergrundes
- Dezentrale Energiesysteme (Nachf. Forschungsverbund Energie Niedersachsen, läuft 2011 aus)
- Grundlagen neuer Energietechnologie (z. B. 3. Generation Photovoltaik, Brennstoffzelle, Batterie)

heraus. Heute sind im EFZN 80 MitarbeiterInnen beschäftigt, die von fünf Niedersächsischen Universitäten nach Goslar mit dem Ziel einer transdisziplinären Arbeitsweise abgeordnet werden. Da das EFZN eine universitäre Einrichtung ist, steht naturgemäß auch die Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses im Forschungsfeld "Energiewissenschaften" im Vordergrund. Bis heute gibt es neben einem Drittmittelaufkommen von rd. 20 Mio €, 50 Doktoranden aus 10 verschiedenen Fakultäten. Die Zukunft wird zeigen, ob der gewählte Forschungssatz trägt. Die 15-jährigen guten Erfahrungen des IEE mit den transdisziplinären Studiengang Energiesystemtechnik, der inzwischen auf das BA/MA-System umgestellt wurde, läßt jedenfalls hoffen. Im übrigen liegt der Systemansatz in der Wissenschaft nicht nur im Bereich Energie im Trend, weil man erkannt hat, dass die einzelnen Disziplinen jeweils allein die anstehenden gesellschaftlichen Aufgaben nicht lösen können. Das IEE liegt daher mit seinem Forschungsansatz zu den elektrischen Energiesystemen auch nach nunmehr 20 Jahren offenbar immer noch richtig. Welche Projekte und Ergebnisse sich daraus im Berichtszeitraum ergeben, können Sie diesem Bericht entnehmen.

Es grüßt mit einem herzlichen "Glück auf" im Jahr 2010

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

# 1 Lehre

## 1.1 Vorlesungen

Die Studentenzahlen steigen wieder leicht an, was uns freut. Dies sichert uns einen genügend qualifizierten und anzahlmäßig ausreichenden wissenschaftlichen Nachwuchs, besonders in den Fächern

- Theorie Elektromagnetischer Felder
- Elektrische Energietechnik
- Energiesysteme

und neuerdings auch in der Energieelektronik, in dem jeweils im Schnitt ca. 15 - 80 StudentInnen pro Studiumjahr teilnehmen. Die Vorlesung Elektrizitätswirtschaft hatte 2010 sogar 70 Teilnehmer - ein Rekord. Wir freuen uns natürlich über den Zuspruch, auch wenn er mit mehr Arbeit verbunden ist, kann er doch auf mehr Schultern (vgl. Abs. 4) verteilt werden. Die folgende Tabelle zeigt die Hörerzahl bei den IEE-Vorlesungen im Einzelnen:

		2008	2009
Beck/Wehrmann	Grundlagen der Elektrotechnik I/II (W 8800 /S 8801)	144	137
Beck/Turschner	Elektrische Energietechnik (S 8803)	60	55
Beck/Turschner	Regelung Elektrischer Antriebe (W 8808)	18	12
Beck	Energieelektronik (S 8811)	12	15
Beck/Turschner u. a.	Energiesysteme (W 8804)	47	80
Heldt	Sonderprobleme Elektrischer Maschinen (W 8805)	-	15
Beck/Wehrmann	Elektrische Energieverteilung (W 8812)	15	9
Beck/Wehrmann	Elektrische Energieerzeugung (S 8815)	12	12
Beck/Turschner	Leistungsmechatronische Systeme (S 8826)	8	16
Beck/Mbuy	e-Learning "Dezentrale Energiesysteme" (W 8836)	5	10
Sourkounis	Regenerative Elektrische Energietechnik (W 8818)	14	10
Maubach	Elektrizitätswirtschaft (S 8819)	22	48

		<b>2008</b>	<b>2009</b>
Baake	Theorie Elektromagnetischer Felder (S 8817)	35	42
Wenzl	Batteriesystemtechnik und Brennstoffzellen (W 8816)	5	7
Ludwig	Dyn. Systeme in Natur, Technik und Gesellschaft (S 8825)	12	8
Lülf	Optimierung und Instandhaltung von Elektroenergie- anlagen (W 8828)	8	8
Hapke bis WS 2008/09	Regenerative Energiequellen (W 8830)	13	-
Kühl ab WS 2009/10	Regenerative Energiequellen (W 8830)	-	36
Beck/ Darrelmann	Autonome Netze (W 8832)	5	-
Buddenberg	Fossile und regenerative Energieressourcen (S 8831)	10	8

Insgesamt wurden im Verlauf dieser zwei Jahre 844 Vor- und Hauptdiplomprüfungen von den prüfungsberechtigten Hochschullehrern bzw. Lehrbeauftragten des Institutes abgenommen. Alle Prüfungen wurden, der guten Tradition der TUC entsprechend, mündlich bzw. halbschriftlich (Grundlagen der Elektrotechnik I, II, mit Praktikum 771 Teilnehmer) durchgeführt. Mündliche Prüfungen sind in Gegensatz zu Klausuren auch Lehrveranstaltungen, weil eine Interaktion und Kommunikation zwischen Prüfer und Prüfling stattfindet, die darüber hinaus auch eher der Situation der späteren Berufswelt entspricht. Da diese Prüfungsform des reinen Gespräches aus Kapazitätsgründen nicht immer vollständig eingehalten werden kann, gibt es im Fach „Grundlagen der Elektrotechnik I, II“ nach wie vor eine mündliche Prüfung mit einem vorgeschalteten schriftlichen Fragenteil.

Im übrigen könnten die unterschiedlichen Dipl. und BA/MA-Prüfungsordnungen der im Folgenden aufgelisteten Studiengängen mit einer Klausur kaum eingehalten werden, weil nicht individuell auf den Prüfungsumfang (z. B. E-Technik I, E-Technik II und deren Kombinationen mit oder ohne Praktikum) eingegangen werden kann. Es müssten mehrere verschiedene Klausuren angeboten werden, was den Prüfungsaufwand weiter steigern würde. Die gewählte Lösung ist also ein guter Kompromiss, der sich inzwischen bewährt hat.



Die StudentInnen belegten die angebotenen Fächer des IEE im Rahmen folgender Studiengänge der Fakultäten II und III:

**Fächer un den Bachelor-Studiengängen:**

Grundlagen der Elektrotechnik I/II in den Studiengängen

Maschinenbau  
Verfahrenstechnik  
Chemieingenieurwesen  
Energietechnologie  
Wirtschaftswissenschaften  
Werkstoffwissenschaften  
Kunststofftechnik  
Informationstechnik  
Informatik  
Physikalische Technologien  
Petroleum Engineering  
Energie und Rohstoffe

**Diplom-/Masterstudiengänge:**

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

Maschinenbau, Studienrichtung “Mechatronik”  
Energiesystemtechnik, Energiewissenschaft (ab WS 2010/11)  
Wirtschaftsingenieurwesen, Studienrichtung Rohstoffe und Energie  
Physikalische Technologien, Schwerpunkt Energiesysteme

An der TU Clausthal gibt es demnach 6 Studiengänge die das Thema Energie betrifft mit sehr unterschiedlicher Ausrichtung (Energierohstoffe, Maschinenbau, Elektrotechnik, Chemie/Physik). In der NTH ist damit das Thema Energie in Clausthal/Goslar allokiert. Die Mechatronik (hier: Umrichter-Antriebstechnik für größere Leistungen unter besonderer Berücksichtigung der mechanischen Antriebskomponenten und der Lasteingangsfunktion der Arbeits-/Kraftmaschinen) und die Energiesystemtechnik in regenerativen Sparten – Arbeitsgebiete auf denen das IEE nunmehr schon seit 20 Jahren tätig ist – werden dabei als Zukunftsthemen deklariert.

Neben der Leistungsmechatronik gehören die regenerative dezentrale elektrische Energietechnik und die Speichersysteme mit Elektroenergie-Zugang zu den Arbeitsgebieten des IEE und zwar in Forschung und Lehre, wie es an einer Technischen Universität sein sollte. Das gesamte Arbeitsgebiet wird unter dem Begriff (elektrische) Energiesystemtechnik als Teil des grundständigen, namensgleichen Studienganges zusammengefasst, der inzwischen in zwei Studiengängen aufgeteilt ist: Energietechnologien (BA), Energiesystemtechnik (MA) und Energiewissenschaften (MA). Mit diesen Studiengängen soll, wie es der Clausthaler Tradition entspricht, die Ausbildung entlang der gesamten Energiekette (ein Alleinstellungsmerkmal der TUC) erfolgen, womit auch der Energieschwerpunkt mit dem Energieforschungszentrum (EFZN) an der TU Clausthal im NTH-Verbund untermauert wird.

## 1.2 Übungen, Praktika, Mentoring

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

		<u>2008</u>	<u>2009</u>
Große Übung	Grundlagen der Elektrotechnik I/II (Beck/Wehrmann/Mbuy)	144	137
Tutorien	Grundlagen der Elektrotechnik I/II (Beck/Wehrmann/Stagge/Hager)	213	458
Repetitorien	Prüfungsvorbereitung Vordiplom Elektrotechnik (Beck/Wehrmann/Haubrock/wiss. Hilfskräfte)	134	135
Praktika	Grundlagen der Elektrotechnik I/II (Wehrmann/zum Hingst/Küster/wiss. Hilfskräfte)	323	448
Übung	Elektrische Energietechnik (Turschner/Osika/Xiong)	60	55
Übung	Regelung Elektrischer Antriebe (Turschner/Schmidt/Xiong)	18	12
Übung	Leistungsmechatronische Systeme (Beck/Turschner)	8	16

		2008	2009
Übung	Energieelektronik (Beck/R.Hesse/T. Hesse)	8	15
Übung	Elektrische Energieerzeugung (Wehrmann/Kaestle)	12	12
Praktikum	Mechatronik (Turschner/Stagge/T. Hesse)	-	12
Grundpraktikum	im Hauptstudium (Maschinenbau) (Osika)	51	41
Praktikum	Elektrische Energiespeicher (Beck/Benger)	3	8
Praktikum	Regenerative Elektrische Energietechnik (Beck/R. Hesse/Stubbe)	2	9
Übung	Regenerative Elektrische Energietechnik (Sourkounis)	14	48
Übung	Elektrische Energieverteilung (Beck/zum Hingst/Becker)	15	9
Übung	Batteriesystemtechnik und Brennstoffzellen (Wenzl)	5	7
Grundpraktikum	Energiesystemtechnik (Xiong)	4	10
Praktikum	Elektrische Antriebe I (Osika)	7	4
Praktikum	Hochspannungstechnik (Wehrmann)	3	4
Praktikum	Elektrische Energiespeicher (Benger)	3	7
Übung	Theorie der elektromagnetischen Felder (Baake)	35	42
Übung	Sonderprobleme elektrischer Maschinen (Heldt)	-	15
Übung	Dyn. Systeme in Natur, Technik und Gesellschaft (Ludwig)	12	8
Übung	Optimierung und Instandhaltung von Elektroenergieanlagen (Lülf)	8	8

		2008	2009
Übung	Regenerative Energiequellen (Hapke/ab WS 09/10 Kühl)	13	36
Übung	Autonome Netze (Darrelmann)	5	-
Übung	Fossile und regenerative Energieressourcen (Buddenberg)	10	8

### 1.3 Seminarvorträge

**2008**

**Betreuer:** Dr. D. Turschner

Grede, Johannes  
Nebel, Arjuna  
Tode, Christian

Einfluss elektrischer Phänomene auf den mechanischen  
Antriebsstrang von Windkraftanlagen

**Betreuer:**

Dipl.-Ing. A. Dowrueng

Hofbauer, Gerrit

Die EEG-Novelle - Auswirkungen für die regenerative  
Energieerzeugung

Toutziaridis, Ioannis

Transport von Offshore-Windenergie

Song, Bin

Die Auswirkungen der Wasserkraftwerke

**2009****Betreuer:** Dr. E.-A. Wehrmann

Mamaschew, Sergej                      Vergleichende Darstellung innovativer Technologien zur Gebäudeenergieversorgung am Beispiel eines Einfamilienhauses

**Betreuer:** Dr. D. Turschner

Semerow, Anatoli	Ressource Braunkohle am Standort Deutschland
Neumann, Christoph	Öl in der Arktis
Henke, Philip Benjamin	Planung von Windkraftanlagen
Li, Dong	Marktbeschreibung der Regelenergie
Lampp, Jan	CO <sub>2</sub> -Speicherung - Ansätze, Konzepte, Trends
Braun, Raphael	Der Erdölmarkt
Preiser, Christian	Regenerative Energie im historischen Bergbau
Langner, Theodor	Der Uranmarkt
Grebing, Guido	Vergleich Glühlampe - Energiesparlampe - LED
Schwalm, Patrick	Elektromobilität - Technologie, Effizienz und Konzepte

**1.4 Studien- und Diplomarbeiten****Studienarbeiten****2008**

Sachs, Gudrun                      Untersuchung zur Reaktivierung der kleinen Wasserkraftanlage an der Flambacher Mühle  
Betreuer: Dr. Wehrmann, Dipl.-Wirtsch.-Ing. Schmidt

- Bünsow, Christian                      Untersuchung und Aufbau eines leistungselektronischen Wandlers zur Anbindung eines Superkondensatorspeichers  
Betreuer: Dr. Wehrmann, Dipl.-Ing. Stagge
- Eger, Svenja F.                              Zwischenspeicherung von Windenergie - Eine ökonomische Betrachtung  
Betreuer: Prof. Beck, Dr. Springmann (EFZN)
- Becker, Andreas                            Modellierung eines Offshore-Hybridkraftwerks aus Wind-, Schwachgas- und Kavernenspeicherkraftwerk  
Betreuer: Dr. Turschner, Dipl.-Wirtsch.-Ing. Schmidt
- Schulz, Jörg. P.                            Technische und wirtschaftliche Untersuchungen zur Auswahl eines Heizsystems für das Clausthaler Centraltheater unter besonderer Berücksichtigung von Blockheizkraftwerken  
Betreuer: Dr. Wehrmann, Dipl.-Wirtsch.-Ing. Schmidt
- Han, Quang T.                              Modellierung einer 3-phasigen Spannungsquelle, um unsymmetrische Belastung und Kurzschlüsse im Drehstromnetz mit Sidytrac berechnen zu können  
Betreuer: Dr. Wehrmann, Dipl.-Ing. Greif (Siemens), Dipl.-Ing. Ullmann (Siemens), Dipl.-Ing. zum Hingst
- Grede, Johannes                            Analyse der Straßenbeleuchtung in der Braunschweiger Weststadt  
Betreuer: Dr. Turschner, Herr Zobel (BS/Energy), Dr.-Ing. Yeni (BS/Energy), Dipl.-Ing. Stagge
- Altmann, Christoph                        Einrichtung eines Hardware-in-the-loop-Systems für die Regelungssimulation einer Brennstoffzellenanlage  
Betreuer: Dr. Turschner, Dipl.-Ing. Stagge

- Jiang, Meina  
Entwicklung eines Batteriemodells zur Beschreibung der thermischen und elektrischen Eigenschaften von Lithium-Ionen Batterien  
Betreuer: Dr. Wenzl, Dipl.-Ing. Benger
- Han, Quang T.  
Simulation eines Mehrspeichersystems  
Betreuer: Dr. Wenzl, Dipl.-Ing. Benger
- Song, Bin  
Bestimmung des Kurzschlussverhaltens von Batterien  
Betreuer: Dr. Wenzl, Dipl.-Ing. Haubrock
- Dakai, Liu  
Starthilfe und Analyse des Startvorgangs bei Verbrennungsmotoren  
Betreuer: Dr. Wenzl, Dipl.-Ing. Haubrock
- Ding, Xiaolu  
Simulation des Kurzschlussverhaltens eines permanent erregten Synchrongenerators  
Betreuer: Dr. Turschner, Dr. Heldt (Vestas Nacelles Deutschland GmbH), Dipl.-Ing. T. Hesse
- Shao, Yanhua  
Entwicklung des Algorithmus für die Winddatenextrapolation nach verschiedenen charakteristischen Parametern  
Betreuer: Dr. Turschner, Dipl.-Ing. Peterschmidt (Inensus GmbH)
- Ding, Xiaolu  
Fehleranalyse für permanent erregte Synchronmaschinen mit Sonderausführung der Ständerwicklungen beim Einsatz in Windkraftanlagen  
Betreuer: Dr. Turschner, Dipl.-Ing. T. Hesse

- Wang, Ning                                      Auswirkung sehr schneller Stromänderungen auf elektrochemische Energiesysteme unter Berücksichtigung des transienten Skineffekts  
Betreuer: Dr. Wenzl, Dipl.-Ing. Bengler
- Scharff, Richard                                Entwicklung einer Überlastbegrenzung in Mittelspannungsnetzen mit dezentraler Einspeisung  
Betreuer: Dr. Wehrmann, Dipl.-Ing. zum Hingst
- Toutziaridis, Ioannis                        Untersuchungen zum Einsatz von Condition-Monitoring in elektrischen Transport- und Verteilnetzen  
Betreuer: Dr. Wehrmann, Dipl.-Ing. zum Hingst
- 2009**
- Nebel, Arjuna                                    Simulation des spanischen Hochspannungsnetzes unter besonderer Berücksichtigung des Klimawandels  
Betreuer: Dr. Wehrmann, Dipl.-Ing. zum Hingst
- Stubbe, Markus                                Konstruktion und Simulation eines Systems zur aktiven Schwingungsbedämpfung (Tilgerring)  
Betreuer: Dr. Turschner
- Stubbe, Markus                                Projektbericht über den Aufbau eines 22 kW Getriebeprüfstands  
Betreuer: Dr. Turschner
- Tode, Christian                                Markt- und Technologiebetrachtung solarthermischer Kraftwerke in Spanien unter besonderer Berücksichtigung der Interessen eines deutschen Energieversorgers  
Betreuer: Prof. Beck, Dipl.-Wi.-Ing. Kaestle,  
Dr. Buddenberg (EWE), Dipl.-Geogr. Brommelmeier (EWE)



- Heimbach, Sarah  
Implementierung eines Tiefenmesssystems in das Unterseeboot der studentischen Arbeitsgruppe Mechatronik  
Betreuer: Dr. Turschner
- Heimbach, Sarah  
Von der Phasenanschnittsteuerung zur Gleichstromsteuerung  
Neue Schaltungstechnik im Unterseeboot der studentischen Arbeitsgruppe Mechatronik  
Betreuer: Dr. Turschner
- Plaspohl, Martin  
Wirtschaftlichkeitsanalyse der Netzstützung durch Elektromobilität  
Betreuer: Prof. Beck, Dr. Wenzl, Dipl.-Ing. Haubrock
- Stelter, Iris  
Auswirkungen der ökonomischen Anreize des EEG auf Wasserkraftwerke am Beispiel der Harzwasserwerke GmbH  
Betreuer: Prof. Beck, Dipl.-Wirtsch.-Ing. Schmidt
- Xia, Lin  
Simulation des stationären Betriebsverhaltens von netz- und umrichter gespeisten Asynchronmaschinen zur Berechnung des Wirkungsgrades in allen Betriebspunkten  
Betreuer: Dr. Turschner
- Proppe, Alexander  
Energiebereitstellung für Flurförderzeuge bei tiefen Temperaturen  
Betreuer: Dr. Wenzl
- Hellmann, Felix  
Optimierte Integration von Biogasanlagen in elektrische Verteilnetze unter Berücksichtigung finanzieller Anreize zur bedarfsgerechten Einspeisung nach § 64 (1) 6 EEG  
Betreuer: Prof. Beck, Dipl.-Wi.-Ing. Kaestle

**Projektarbeiten**

**2008**

Grede, Johannes  
Nebel, Arjuna  
Tode, Christian

Einfluss elektrischer Phänomene auf den mechanischen  
Antriebsstrang von Windkraftanlagen  
Betreuer: Dr. Turschner

**2009**

Pan, Haoxing  
Yang, Lon  
Wang, Yong

Brennstoffzellen- und Batterienachbildung  
Betreuer: Dr. Turschner

Wahl, Sonja

Untersuchung zur Nachnutzung des Oberharzer Wasser-  
regals zur Erzeugung elektrischer Energie am Beispiel des  
Zellerfelder Kunstgrabens  
Betreuer: Dr. Wehrmann, Dipl.-Wirtsch.-Ing. Schmidt

**Diplomarbeiten**

**2008**

Zech, Kristin

Errichtung einer Notstromanlage für die Berliner Wasser-  
betriebe  
Betreuer: Dr. Turschner, Dr. Wehrmann,

Mathes, Sebastian

Entwicklung eines evaluierten Prüfverfahrens zur Qualitäts-  
bemessung der elektrischen Eigenschaften von widerstands-  
pressgeschweißten Kupferinterzellverbindern  
Betreuer: Dr. Maus-Friedrichs, Dr. Wenzl

Becker, Andreas	Bewertung von Handlungsmöglichkeiten zur Integration von Dezentralen Erzeugungsanlagen in elektrische Verteilungsnetze unter besonderer Berücksichtigung der Spannungsqualität Betreuer: Dr. Wehrmann, Prof. Beck
Fellenberg, Sven	Wirtschaftlichkeit von Immobilienprojekten dargestellt am Beispiel der Umnutzung einer Wassermühle zu Wohneinheiten mit dezentraler Energieversorgung (Bachelor) Betreuer: Prof. Schenk-Mathes, Prof. Beck
Küster, Torben	Reglerarchitektur und Auslegung eines Mehrgrößenreglers für ein Simulationssystem zur Identifikation von Knotenleistungen in elektrischen Energieverteilungsnetzen Betreuer: Prof. Beck, Dr. Turschner
Schulze, Tobias	Konzeptionierung und Simulation eines Hybridmanagers für ein Brennstoffzellenhybridfahrzeug Betreuer: Dr. Wenzl, Dr. Turschner
Dang, Thanh Tung	Simulation eines elektrischen Energieversorgungssystems am Beispiel eines städtischen Arealnetzes Betreuer: Prof. Beck, Dr. Wehrmann, Dr. Mbuy
Stubbe, Markus	Programmierung, Aufbau und Inbetriebnahme einer Virtuellen Synchronmaschine (VISMA) Betreuer: Prof. Beck, Dr. Turschner, Dr. R. Hesse
Xiong, Wei	Simulation einer Asynchronmaschine mit direkter Selbstregelung Betreuer: Dr. Turschner, Dr. Wehrmann

- Sachs, Gudrun  
Konstruktive Optimierung und experimentelle Untersuchungen einer Kleinwasserkraftanlage am Beispiel des oberflächigen Wasserrades der Wassermühle Erkerode  
Betreuer: Dr. Wehrmann, Prof. Beck, Dipl.-Wi.-Ing. Kaestle, Herr Kunze (Sowiwas-Energie GmbH)
- Do, Kien Trung  
Simulation des stationären Betriebsverhaltens von netz- und umrichter gespeisten Asynchronmaschinen zur Berechnung des Wirkungsgrades  
Betreuer: Dr. Turschner, Dr. Wehrmann
- Dakai, Liu  
Neuprogrammierung, Weiterentwicklung und Test einer Software zur Abschätzung der Lebensdauer von Akkumulatoren  
Betreuer: Dr. Wenzl, Dr. Maus-Friedrichs, Dipl.-Phy. Mathes
- Jiang, Meina  
Entwicklung von Algorithmen zur Beschreibung des elektrischen und thermischen Systemverhaltens von Lithium-Ionen-Zellen für stationäre und Traktionsanwendungen  
Betreuer: Dr. Wenzl, Dr. Turschner, Dipl.-Ing. Benger
- Scharff, Richard  
Referenznetzanalyse - Ein Netzplanungsinstrument zur Anreizregulierung?  
Betreuer: Prof. Erlei (Inst. f. Wirtschaftswissenschaften, Dr. Wehrmann)

**2009**

- Han, Quang Tuan                      Untersuchung einer zwölfpulsigen Transformator-Gleichrichter-Kombination mit einer Reihenschaltung der primärseitigen Wicklungen  
Betreuer: Prof. Beck, Dr. Wehrmann, Dipl.-Ing. zum Hingst, Dipl.-Ing. Greif (Siemens), Dipl.-Ing. Lehmpfuhl (Siemens)
- Hager, Torsten Hermann              Bestandsaufnahme und Analyse eines Erdgasverteilnetzes mit dem Ziel der Empfehlung einer Messtopologie als Basis für eine Online-Simulation  
Betreuer: Prof. Beck, Dr. Wehrmann, Dipl.-Ing. Schröder
- Bünsow, Christian                      Control development, model design, and simulation of a diesel generator set in a laboratory virtual power plant  
Betreuer: Dr. Wehrmann, Dr. Turschner, Dr. Braun (ISET, Kassel)
- Ding, Xiaolu                              Untersuchung des dynamischen Verhaltens einer permanent-erregten Synchronmaschine mit zwei Wicklungssystemen  
Betreuer: Prof. Beck, Dr. Turschner
- Ziegenbein, Heiko                      Entwicklung und Konstruktion einer hermetischen Kältemittelkupplung  
Betreuer: Prof. Müller (IMW), Dr. Turschner, Dipl.-Ing. Siemann (Stiebel Eltron), Dipl.-Ing. Schaumlöffel (Stiebel Eltron)
- Wang, Ning                                Neuartige Methoden zur Zustandsverbesserung von elektrochemischen Speichern  
Betreuer: Dr. Wenzl, Dr. Wehrmann, Dipl.-Ing. Haubrock

Proppe, Alexander	Inbetriebnahme Brennstoffzellen-Batterie-Hybrid getriebener Flurförderzeuge Betreuer: Prof. Beck, Dr. Wenzl
Talavera Pérez, Jon	Demand Side Management Based on Grid Parameters Betreuer: Prof. Beck, Dr. Wehrmann, Dipl.-Wi.-Ing. Kaestle
Toutziaridis, Ioannis	Einsatzoptimierung der Netzersatzanlage der TU Clausthal Betreuer: Prof. Beck, Dr. Wehrmann, Dipl.-Wirtsch.-Ing. Schmidt
Yang, Jian	Prototypenentwicklung eines mikrocontrollergesteuerten Starthilfesystems mit Lastdetektion Betreuer: Prof. Beck, Dr. Wenzl, Dipl.-Ing. Haubrock
Martinez Aparicio, Paula	Bidirectional Vehicle-To-Grid smart module based on the Virtual Synchronous Machine concept Betreuer: Dr. Wenzl, Dr. Turschner, Dipl.-Ing. Haubrock
Stelter, Iris	Potentialstudie über die Errichtung eines Pumpspeicherkraftwerkes zur Nachnutzung des Oberharzer Wasserregals am Beispiel der Teiche Unterer Eschenbacher Teich und Unterer Haus Herzberger Teich, unter Berücksichtigung technischer, wirtschaftlicher und umweltrechtlich relevanter Rahmenbedingungen Betreuer: Prof. Langefeld (Inst. f. Bergbau), Dr. Wehrmann, Dipl.-Ing. Clausen (Inst. f. Bergbau), Dipl.-Wirtsch.-Ing. Schmidt
Miao, Chao	Thermisches und elektrisches, orts aufgelöstes Modellierung einer gewickelten Lithium-Ionen-Rundzelle Betreuer: Dr. Wenzl, Dr. Wehrmann, Dipl.-Ing. Benger

Hofbauer, Gerrit	Einfluss der Stoff- und Stromführung im Brennstoffzellenstack am Beispiel einer PEMFC Betreuer: Dr. Wenzl, Prof. Weber (IEVB), Dipl.-Ing. Benger
Xu, Xin	Auswirkungen von Alterungsprozessen auf Lithium-Ionen-Batterien Betreuer: Prof. Beck, Dr. Wenzl, Dipl.-Ing. Haubrock
Tode, Christian	Erstellung einer Roadmap für den Aufbau und die Erweiterung eines virtuellen Kraftwerks Betreuer: Prof. Beck, Dr. Wehrmann, Dr. Mbuy, Dr. Arndt (EWE)
Nebel, Arjuna	Simulation des netzdynamischen Verhaltens von Windenergieanlagen mit doppeltgespeistem Asynchrongenerator Betreuer: Prof. Beck, Prof. Erlich (Uni Duisburg-Essen), Dipl.-Ing. Wilch (Uni Duisburg-Essen) Dr. Koch (RWE), Dr. Turschner

## **2 Veröffentlichungen, Dissertationen, Habilitationen**

### **2.1 Zeitschriften- und Tagungsaufsätze, Patente / -anmeldungen**

#### **Zeitschriften- und Tagungsaufsätze, Bücher**

**2008**

Benger, R. Ropeter, C. Wenzl, H. Beck, H.-P.	Auswirkung steiler Stromänderungen auf elektrochemische Systeme etz, Heft 3/2008, März 2008
---	--

- Beck, H.-P.  
Springmann, J.-P.      Transdisziplinarität in der Energieforschung - Das Energie-  
Forschungszentrum Niedersachsen als Brücke zur Transdisziplina-  
rität?  
Jahrbuch 2007 der BWG, 2008
- Beck, H.-P.  
Schröder, C.  
Wehrmann, E.-A.      Prozessbegleitende Gasverteilnetzsimulation bei nicht vollständiger  
Messinfrastruktur  
Handbuch Energiemanagement, 25. Ergänzungslieferung,  
März 2008
- Dietrich, R.-U.  
...      SOFC-Brennstoffzelle mit partieller Anodenabgas-Rückführung zur  
Reformierung  
Stagge, H.      SOFC system using partial anode offgas recycle für fuel reforming  
Beck, H.-P.      Tagungsband: 6. Fachtagung "Brennstoffzelle, Forschung - Demon-  
stration - Anwendung, Mai 2008  
u. a.
- Hesse, R.      Energiekonditionierer "Elektronische Synchronmaschine mit  
Brennstoffzellenspeisung"  
Dezentrale Energiesysteme, Tagungsband zum 2. Statusseminar des  
FEN (Forschungsverbund Energie Niedersachsen), Mai 2008
- Osika, O.      Erprobung von Betriebsmitteln: Stabiler Netzbetrieb von Micro-  
Grids am Beispiel des Energieparks Clausthal (TP 9/2)  
Dezentrale Energiesysteme, Tagungsband zum 2. Statusseminar des  
FEN (Forschungsverbund Energie Niedersachsen), Mai 2008
- Wehrmann, E.-A.  
Werner, Th.  
Haake, R.  
Ruwier, U.  
Rihm, J      Diskussion: Evolution statt Revolution  
energy 2.0, Ausgabe 4/2008, Juli 2008



Beck, H.-P.                    Process Accompanying Simulation of Regional Gas Distribution  
Schröder, C.                Grids with Incomplete Measurement  
Scheibe, D.                CD: International Gas Union Research Conference, Paris,  
u. a.                        Oktober 2008

Dörrer, L.                    Architecture of planar SOFC stacks with parallel-connected cells  
...                        Tagungsband FDFC 2008 - Fundamentals and Developments of  
Stagge, H.                Fuel Cell, Dezember 2008  
Beck, H.-P.  
u. a.

Beck, H.-P.                Energiesystemtechnik der Gesamtanlage  
Musasa, B.                Abschlussarbeit im Rahmen der Projektstudie Netzintegration von  
Schmidt, M.               Offshore-Großwindanlagen - Grundlast von der Nordsee,  
Dezember 2008

## **2009**

Benger, R.                Requirements for Energy Energy Storage Systems in Inverter-fed  
Haubrock, A.              DC Circuits: DC Distortion Power and its Impact on the Lifetime of  
Wenzl, H.                Batteries, Kraftwerk Batterie - Lösungen für Automobil und Ener-  
Stagge, H.                gieversorgung  
Beck, H.-P.                Advanced Battery Technologies for Automotive Applications,  
Essen, Januar 2009

Turschner, D.            •Auswirkungen von Netzfehlern auf den Antriebsstrang von Wind-  
                                  kraftanlagen  
                                  •Motorprüfstände im Modellmaßstab  
                                  •Aktive Schwingungsdämpfung  
                                  ti Technologie Informationen, Wissen und Innovationen aus nieder-  
                                  sächsischen Hochschulen, Februar 2009

Kaestle, G.                Förderung der Kraft-Wärme-Kopplung in Deutschland  
Wehrmann, E.-A.        6. Internationale Energiewirtschaftstagung, Wien,  
Beck, H.-P.                11.-13. Februar 2009

- Hesse, R.  
Turschner, D.  
Beck, H.-P.                      Micro grid stabilization using the Virtual Synchronous Machine (VISMA)  
Tagungsband: International Conference on Renewable Energies and Power Quality, April 2009
- Benger, R.  
Wenzl, H.  
Beck, H.-P.  
Jiang, M.  
...                                  Electrochemical and thermal modeling of lithium-ion cells for use in HEV or EV application  
EVS24 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electronic Vehicle Symposium, Stavanger, Norway, Mai 2009
- Haubrock, A.  
Benger, R.  
Wenzl, H.  
Beck, H.-P.                      Characterizing electrochemical systems used for high-current application by measuring the short circuit current and the internal resistance  
EVS24 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electronic Vehicle Symposium, Stavanger, Norway, Mai 2009
- Kurrat, M.  
Deppe, B.  
Beck, H.-P.  
Mbuy, A.  
Wehrmann, E.-A.  
...                                  Interdisziplinäre Wissensvermittlung am Beispiel dezentraler Energiesysteme - Ein Erfahrungsbericht  
Auf dem Weg zu exzellentem E-Learning, Waxmann Verlag, Münster, ISBN 978-3-8309-2122-6, Mai 2009
- Dowrueng, A.  
zum Hingst, J.  
Mbuy, A.  
Wehrmann, E.-A.  
Beck, H.-P.                      Decentralised Energy Management System with Comprehension of Fluctuated Renewable Energy Resources  
International Conference on Clean Electrical Power Renewable Energy Resources Impact, Capri, Italy, Juni 2009
- Stagge, H.  
Benger, R.  
Dörrer, L.  
Beck, H.-P.                      Parallel Connection of Single Solid Oxide Fuel Cells to Increase Availability  
European Fuel Cell Forum 2009, Luzern, Schweiz, Juni/Juli 2009

- Küster, T.  
Beck, H.-P.  
Stagge, H.                      Comparison between One-Variable and Multivariable Closed-Loop Control in a SOFC System Simulation  
European Fuel Cell Forum 2009, Luzern, Schweiz, Juni/Juli 2009
- Kaestle, G.  
Wehrmann, E.-A.  
Beck, H.-P.                      Strom erzeugend heizen  
zeno - Zeitschrift für nachhaltiges Bauen, Jg. 2009, Nr. 2, Juli 2009
- Dietrich, R.-U.  
...  
Küster, T.  
Stagge, H.  
...                                  Propane Driven SOFC System Using Anode Off-Gas Recycle (AOGR)  
11th Grove Fuel Cell Symposium, London, September 2009
- Stagge, H.                                  Impact of the cell connection concept on the availability, power output and durability of SOFC stacks  
f-cell Stuttgart, 28.-29. September 2009
- Osika, O.  
Wehrmann, E.-A.  
Beck, H.-P.                      Leistungspendelungen und Netzspannungsqualität in einem Versuchsnetz  
ew Heft 21/2009, Jg. 108, Oktober 2009
- Benger, R.  
Wenzl, H.  
Beck, H.-P.                      Optimisation of a Multi Energy Storage System  
4th International Renewable Energy Storage Conference (IRES 2009), Berlin, 24.-25. November 2009
- Benger, R.  
Jiang, M.  
Beck, H.-P.  
Wenzl, H.  
Ohms, D.  
Schaedlich, G.                      Electrochemical And Thermal Modeling Of Lithium-Ion Cells For Use In Hev Or Ev Application  
World Electric Vehicle Journal, Vol. 3, 2009

**Patentanmeldungen**

Stagge, H.	Elektrisches Energieübertragungssystem
Benger, R.	Aktenzeichen: 10 2008 003 759.1
Beck, H.-P.	Anmeldetag: 10.01.2008
Kaestle, G.	Verfahren zum Betreiben eines Gasnetzes
Schröder, C.	Aktenzeichen: DE 10 2008 058 736.2
Beck, H.-P.	Anmeldetag: 21.11.2008

**Dissertationen:**

**2008**

Hinrichsen, Frank	Untersuchungen zu Resonant Commutated Pole Kommutierungszellen in Spannungs- und Stromzwischenkreis-Umrichtern Referenten: Prof. Canders; Prof. Beck
Wieben, Enno	Multivariates Zeitreihenmodell des aggregierten elektrischen Leistungsbedarfes von Standardverbrauchern für die probabilistischen Lastflussberechnung Referenten: Prof. Beck, Prof. Kurrat
vom Felde, Ulrich	Ein Beitrag zur Minimierung der Mittelspannungsnetzkosten unter besonderer Berücksichtigung der Versorgungszuverlässigkeit Referenten: Prof. Beck, Dr. Maubach

**2009**

Schröder, Cathrin	Prozessbegleitende Simulation von regionalen Gasverteilnetzen mit unvollständiger Messinfrastruktur durch Einsatz eines Knotenlastbeobachters Referenten: Prof. Beck, Prof. Konigorski
Wendt, Sven	Turbogenerator mit IGBT - Umrichter zur dezentralen Energieversorgung Referenten: Prof. Güldner, Prof. Beck, Dr. Briest, Prof. Büchner

- zum Hingst, Jens                      Prozessbegleitende Simulation elektrischer Mittelspannungsnetze bei dezentraler Einspeisung und unvollständiger Messinfrastruktur  
Referenten: Prof. Beck, Prof. Hofmann
- Stagge, Hanno                         Steigerung der Verfügbarkeit zellengestützter elektrischer Energiequellen durch Konzepte mit paralleler Schaltungsstruktur am Beispiel der festoxidkeramischen Brennstoffzelle  
Referenten: Prof. Beck, Prof. Mertens

## **2.2    Vorträge / Seminare**

- Beck, H.-P.                                Zukunft der Energieversorgung heißt CO<sub>2</sub>-freie Stromversorgung bis 2050?!  
Energiesparwoche mit dem Thema “Zukunft der Energieversorgung”, KVHS Osterode, März 2008
- Beck, H.-P.  
Benger, R.  
Wenzl, H.                                 Behavior of electrochemical system like lithium ion, NiMH, lead acid batteries and ultra capacitors during fast current steps  
EET-2008 European Ele-Drive Conference International  
Advanced Mobility Forum, Geneva, Switzerland, März 2008
- Beck, H.-P.  
Wehrmann, E.-A.  
Kaestle, G.                                Energiepark Clausthal als Vorläufer eines dezentralen Arealnetzes  
Fachtagung Energetische Sanierung von Siedlungsgebieten, Berlin, März 2008
- Beck, H.-P.  
Schröder, C.  
Wehrmann, E.-A.                        Prozessbegleitende Simulation von regionalen Gasverteilnetzen bei unvollständiger Messinfrastruktur  
Fachtagung Erfahrungsaustausch Gasnetzsimulation, Berlin, April 2008

- Schröder, C.    Prozessbegleitende Simulation von regionalen Gasverteilnetzen bei unvollständiger Messinfrastruktur  
Beck, H.-P.
- Wehrmann, E.-A.    Kolloquium DEMS-Dezentrale Energiemanagementsysteme, Oldenburg, Juni 2008
- 
- Schröder, C.    Prozessbegleitende Simulation von regionalen Gasverteilnetzen bei unvollständiger Messinfrastruktur  
Beck, H.-P.
- Wehrmann, E.-A.    Kolloquium zur Praxis Bioerdgaseinspeisung und Regel- und ausgleichsenergie in der Gasversorgung, Erfurt, September 2008
- 
- Schröder, C.    Prozessbegleitende Simulation von regionalen Gasverteilnetzen bei unvollständiger Messinfrastruktur  
Beck, H.-P.
- Wehrmann, E.-A.    DVGW - Prüfstellenleitertagung Gas 2008, Bad Neuenahr, September 2008
- 
- Schröder, C.    Prozessbegleitende Simulation von regionalen Gasverteilnetzen bei unvollständiger Messinfrastruktur  
Beck, H.-P.
- Wehrmann, E.-A.    Kolloquium “40 Jahre Dispatching in der VNG”, Leipzig, Mai 2009
- 
- Wehrmann, E.-A.    Ansätze BHKWs zu virtuellen Kraftwerken zu vernetzen  
Branchenforum, BHKW und virtuelle Kraftwerke - Von der Eigenerzeugung zum Schwarmkraftwerk?, Hannover, November 2009

## **2.3**

### **Berichte, Technische Notizen**

- Stagge, H.    Technische Notiz Nr. 16/169  
Entwicklung und Erprobung einer Hochtemperaturbrennstoffzelle SOFC mit einer parallelen Systemarchitektur, 2009

## **2.4 Geförderte Forschungsvorhaben**

Im Berichtszeitraum wurden folgende geförderte Forschungsvorhaben bearbeitet :

Deutsche Bundesstiftung Umwelt

Lehr- und Demonstrationsanlage für dezentrale regenerative Energiesysteme (Energiepark Clausthal)

Bearbeiter: Dr. Ing. E.-A. Wehrmann, Dipl.-Ing. A. Dowrueng

EWE Aktiengesellschaft

Dezentrales Energiemanagement System (DEMS)

Projektgruppe: Netzstabilität, Teilprojekt Prozessmodell

Kurzbezeichnung: DEMS-Prozessmodell

Bearbeiter: Dr.-Ing. E.-A. Wehrmann, Dipl.-Ing. J. zum Hingst

EWE Aktiengesellschaft

Dezentrales Energiemanagement System (DEMS)

Projektgruppe: Bezugsoptimierung, Teilprojekt Bezugsoptimierung und Netzstabilität mit Speichereinsatz

Kurzbezeichnung: DEMS-Bezugsoptimierung

Bearbeiter: Dr.-Ing. E.-A. Wehrmann, Dipl.-Ing. A. Dowrueng

EFRE (Europäischer Fonds für regionale Entwicklung)

Virtuelles Kraftwerk

Bearbeiter: Dr.-Ing. E.-A. Wehrmann, Dr. rer. nat. Wenzl,  
Dipl.-Wirtsch.-Ing. M. Schmidt

EFRE (Europäischer Fonds für regionale Entwicklung)

Optimierte Wind-Diesel-Hybridsysteme in Inselnetzen

Kurzbezeichnung: OPTIWIND

Bearbeiter: Prof. H.-P. Beck, Dipl.-Ing. T. Hesse

CUTEC GmbH

Systemdemonstrator für die Energieversorgung dezentraler Anlagen

Bearbeiter: Prof. H.-P. Beck, Dipl.-Ing. H. Stagge

Gasversorgung Thüringen GmbH

Entwicklung und Einsatz einer vorausschauenden Gasnetzsimulation

Kurzbezeichnung: Gasnetzsimulation - Lastprofile

Bearbeiter: Prof. H.-P. Beck, Dipl.-Ing. C. Schröder

Hansen Transmission (Belgien)

Windgetriebeprüfstand 13,2 MW

Kurzbezeichnung: GetrPrüfst 13 MW

Bearbeiter: Prof. H.-P. Beck, Dr.-Ing. D. Turschner

Land Niedersachsen / MWK

Forschungsverbund Energie Niedersachsen (FEN)

Dezentrale Energiesysteme - Teilprojekt Z: Zentrales Sprecherprojekt  
zur Koordination des Forschungsverbundes Energie Niedersachsen

Kurzbezeichnung: TPZ

Bearbeiter Prof. H.-P. Beck

Land Niedersachsen / MWK

Forschungsverbund Energie Niedersachsen (FEN)

Dezentrale Energiesysteme - Teilprojekt 3: Energiekonditionierer

Kurzbezeichnung: TP3

Bearbeiter: Prof. H.-P. Beck, Dr.-Ing. R. Hesse

BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit)

Netzintegration von Offshore-Großwindanlagen - Grundlast von der Nordsee

Kurzbezeichnung: Grundlast von der Nordsee

Bearbeiter: Prof. H.-P. Beck, Dipl.-Wirtsch.-Ing. M. Schmidt

Hansen Transmissions (Belgien)

Untersuchung möglicher Belastungsfälle für Windkraftanlagen als Folge der E.ON Netz-  
anschlussregeln

Bearbeiter: Dr.-Ing. D. Turschner

Hansen Transmissions (Belgien)

Prüfstandsuntersuchungen zu möglichen Belastungsfällen für Windkraftanlagen durch  
Sonderereignisse

Bearbeiter: Dr.-Ing. D. Turschner

Sieb & Meyer

Umrichter für stationäre Brennstoffzellensysteme

Bearbeiter: Dr. rer nat H. Wenzl



NBank/CUTEC GmbH

Verbundprojekt: Entwicklung und Erprobung einer Hochtemperaturbrennstoffzelle (SOFC) mit einer parallelen Systemarchitektur W3-80014156

Kurzbezeichnung: Parallel-SOFC

Bearbeiter: Prof. H.-P. Beck, Dipl.-Ing. H. Stagge

EFRE (Europäischer Fond für regionale Entwicklung)

Entwicklung eines portablen Geräts zum Testen und Behandeln von Batterien für Kfz-Werkstätten

Kurzbezeichnung: Batterietestgerät

Bearbeiter: Prof. H.-P. Beck, Dr. H. Wenzl, Dipl.-Ing. R. Benger, Dipl.-Ing. A. Haubrock

DBU (Deutsche Bundesstiftung Umwelt)

Die Integration von Solar Home Systems in Micro Grids, eine Strategieentwicklung unter technischen, soziologischen und ökonomischen Gesichtspunkten

Kurzbezeichnung: Vom SHS zum Micro-Grid

Bearbeiter: Dipl.-Ing. N. Peterschmidt

Beiersdorf AG

Messung am Mischer 15 (nicht newtonischen Flüssigkeiten)

Bearbeiter: Prof. H.-P. Beck, Dr.-Ing. D. Turschner

Technische Universität Kaiserslautern

Messdaten und Prüfstandsnutzung Windgetriebeprüfstand

Kurzbezeichnung: Untersuchung Windgetriebeprüfstand

Bearbeiter: Prof. H.-P. Beck, Dr.-Ing. D. Turschner

Fortis Windenergy (Niederlande)

Modulares Batterieladegerät und Überspannungsschutz für Windkraftanlagen

Kurzbezeichnung: Ladegerät WKA

Bearbeiter: Prof. H.-P. Beck, Dr.-Ing. E.-A. Wehrmann,  
Dipl.-Ing. N. Peterschmidt

AiF / DECHEMA

SOFC-Brennstoffzelle mit partieller Anodenabgasrückführung

Kurzbezeichnung: SOFC mit Anodenabgasrückführung (AAGR)

Bearbeiter: Prof. H.-P. Beck, Dipl.-Ing. H. Stagge, Dr.-Ing. D. Turschner

Land Niedersachsen / MWK  
ELAN III - eLearning Modul  
Dezentrale Energiesysteme

Bearbeiter: Dr.-Ing. A. Mbuy

VFWH

AW 143 - Hochdynamischer Kompensationsaktuator zur Bedämpfung multifrequenter Torsionsstörschwingungen in Antriebssystemen

Kurzbezeichnung: AW 143 / Tilgerring

Bearbeiter: Dr.-Ing. D. Turschner, Dr.-Ing. R. Hesse

Europäische Kommission (Research Fund for Coal and Steel)

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

Kurzbezeichnung: Chatter

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

Hansen Transmission (Belgien)

Windgetriebeprüfstand 20 kW

Bearbeiter: Dr.-Ing. D. Turschner

Daimler AG

Kapazitätsverlustuntersuchungen von Li-Ionen Zellen

Kurzbezeichnung: Kapazitätsverlustuntersuchungen Li-Ionen

Bearbeiter: Prof. H.-P. Beck, Dipl.-Ing. A. Haubrock

Dr. Heinz Wenzl

Testeinrichtung Behandeln von Batterien

Bearbeiter Dipl.-Ing. A. Haubrock

Land Niedersachsen / MWK

Forschungsverbund Energie Niedersachsen (FEN)

Zukunftsorientierte dezentrale Energiesysteme - Fortsetzungsteilprojekt 10: Stabilitätsuntersuchungen für umrichterdominierte Netze

Kurzbezeichnung: TP10

Bearbeiter: Prof. H.-P. Beck, Dr.-Ing. O. Osika

Land Niedersachsen / MWK

Forschungsverbund Energie Niedersachsen (FEN)

Zukunftsorientierte dezentrale Energiesysteme - Fortsetzungsteilprojekt 11: Untersuchungen an der VISMA

Kurzbezeichnung: TP11

Bearbeiter: Prof. H.-P. Beck, Dr.-Ing. R. Hesse

Nbank/EFRE (Europäischer Fonds für regionale Entwicklung)

Dezentrale Netzqualitätsverbesserung in Niederspannungsnetzen mit virtuellen Synchronmaschinen

Kurzbezeichnung: DNQ-VISMA

Bearbeiter: Dr. D. Turschner, Dipl.-Ing. T. Hesse

Nbank/EFRE (Europäischer Fonds für regionale Entwicklung)

Entwicklung einer virtuellen Synchronmaschine für den Einsatz in unterbrechungsfreien Stromversorgungen

Kurzbezeichnung: USV-VISMA

Bearbeiter: Dr. H. Wenzl, Dipl.-Ing. A. Haubrock

DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft)

Leistungsstarke Kurzzeit-Energiespeichersysteme

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

Land Niedersachsen / MWK

GEBO-Werkstoffe (W8)

Bearbeiter: Dipl.-Wi.-Ing. R. Scharff

Siemens AG

Development and technical and economical comparison of strategies for balancing of fluctuating and decentralized supply of renewable energies

Kurzbezeichnung: Siemens Strategies f. Renewable Energies

Bearbeiter: Dr. E.-A. Wehrmann, Dipl.-Wi.-Ing. G. Kaestle

BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit)

Windenergiespeicherung durch Nachnutzung stillgelegter Bergwerke

Kurzbezeichnung: Pumpspeicher unter Tage (PSW)

Bearbeiter: Dipl.-Wirtsch.-Ing. M. Schmidt, Dipl.-Ing. J. zum Hingst

BMWi über das DIN, Referat Entwicklungsbegleitende Normung und DKE

Dezentrale Netzstützung

Kurzbezeichnung: INS - Dezentrale Netzstützung

Bearbeiter: Dr. E.-A. Wehrmann, Dipl.-Wi.-Ing. G. Kaestle

BMWi/AiF

Entwicklung eines dreiphasigen Batteriewechselrichters

Kurzbezeichnung: ETINI (ZIM)

Bearbeiter: Dr. D. Turschner, Dipl.-Ing. T. Hesse

## **2.5 Veranstaltungen, Exkursionen, Gastaufenthalte**

### **Veranstaltungen:**

15. Dezember 2008

Weihnachtsfeier mit Mitarbeitern, Lehrbeauftragten, Hiwis und Ehemaligen des IEE

19. Juni 2009

5. Tagung mit Ehemaligen des IEE und externen Gästen

17. Dezember 2009

Weihnachtsfeier mit Mitarbeitern, Lehrbeauftragten, Hiwis und Ehemaligen des IEE

### **Exkursionen:**

Exkursion zur Vorlesung Dezentrale Energiesysteme

- Besichtigung der Bioenergieanlage in Jühnde

03.-04. Juli 2008

Zum Abschluss der Vorlesungen "Elektrizitätswirtschaft" wurde eine zweitägige Exkursion durchgeführt. Zusätzlich zu einem Vortrags- und Seminarprogramm wurden folgende Besichtigungen durchgeführt:

- Besichtigung des Kraftwerks Walchensee und des Wasserschlosses

- Besichtigung der Hauptschaltwarte Dachau
- Besichtigung des Kraftwerks Zolling

17. Juli 2008

Exkursion zu SMA in Kassel im Rahmen der Vorlesung “Elektrische Energietechnik”

09.-10. Juli 2009

Zum Abschluss der Vorlesungen “Elektrizitätswirtschaft” wurde eine zweitägige Exkursion durchgeführt. Zusätzlich zu einem Vortrags- und Seminarprogramm wurden folgende Besichtigungen durchgeführt:

- Besichtigung des Kraftwerks Walchensee und des Wasserschlosses
- Besichtigung der Hauptschaltwarte Dachau
- Besichtigung des Kraftwerks Essenbach

30. Juni 2009

Zum Abschluss der Vorlesung “Elektrische Energieerzeugung”:

- Besichtigung Energiepark
- Exkursion zum Wasserkraftwerk Edertalsperre, E.ON

## **3 Forschungsarbeiten**

### **3.1 Ausbau der Institutseinrichtungen**

Zur weiteren Komplettierung der Institutseinrichtungen wurden folgende Neuanschaffungen getätigt:

- Elektroauto Tesla Roaster
- Modell "Tilgering"
- Erweiterung des Impedanzspektroskopie-Messplatzes für Batterien und Umrichter
- Container mit Kleinwindkraftanlage Photovoltaik, Batteriespeicher für eine solare Schnellladestation
- Klimaschrank für Batterietests
- Windenergieanlagen-Prüfstand für Getriebe

### **3.2 Projektblätter**

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

**Projekt:** Vorausschauende Gasnetzsimulation

---

**Problem:** Die Öffnung und Liberalisierung des deutschen Erdgasmarktes durch die Novellierung des Energiewirtschaftsgesetzes (EnWG) stellt an die Gasversorgungsunternehmen viele neue Anforderungen wie z.B. die Entkopplung von Handel und Netzbetrieb, die Durchleitung von nominierten Mengen und Leistungen durch die Netze, der Zugang zu freien Speicherkapazitäten und die Gewährleistung eines objektiven, diskriminierungsfreien und transparenten Netzzuganges.

Die effiziente Umsetzung dieser unternehmensübergreifenden neuen Aufgaben setzt eine genaue Kenntnis des Gasnetzzustandes voraus. Üblicherweise können dies Leitsysteme von regionalen Gasverteilnetzbetreibern nicht leisten, da die Ausstattung mit der dafür nötigen Messinfrastruktur nicht vorhanden ist bzw. der Aufbau finanziell zu aufwendig wäre. Der Einsatz einer vorausschauenden Gasnetzsimulation, die einen in naher Zukunft liegenden Prozesszustand wiedergibt, erscheint zur Unterstützung des Dispatchings zusätzlich zum herkömmlichen Leitsystem sinnvoll. Unabhängig vom Steuerprozess des Gasnetzes können so sowohl prozessbegleitend die Drücke und Flüsse bestimmt, als auch ein voraussichtlicher Zustand mit Hilfe einer Prognose der Zuspeisungen und Abnahmen ermittelt werden. Eine vorausschauende Gasnetzsimulation dient neben der Verbesserung der Kenntnis über den Gasnetzzustand auch dazu, den Gasbezug und die Netzsteuerung zu optimieren, freie Kapazitäten zu berechnen und Spotmengen einzuplanen.

**Ziel:** Entwicklung einer stabilen und hinreichend genauen prozessbegleitenden Gasnetzsimulation für regionale Gasverteilnetze mit unvollständiger Messinfrastruktur für den Einsatz im Online-Betrieb als Basis für eine vorausschauende Gasnetzsimulation.

**Stand der Technik:** Derzeit werden Gasnetzsimulationen vorwiegend in Transportnetzen (Bild 1) eingesetzt. Gastransportnetze zeichnen sich durch eine sehr gut ausgestattete Messinfrastruktur aus, so dass durch die häufig vorkommende Überbestimmtheit mit der bewährten Gasnetzsimulationssoftware sogar eine Leckerkennung möglich ist. Im Gasverteilnetzbereich (Bild 2) ist bei stark vermaschten Gasnetzen jedoch die Ausstattung mit der erforderlichen Messinfrastruktur, d. h. einer online-Messung sämtlicher Abnahmen (Ortschaften, Son-

---

dervertragskunden) und aller vorhandenen Einspeisungen (Übernahmestationen, Überschleusungen) in einem festen relativ kurzen Zyklus z. B. im 15-Minuten-Takt mit Datenfernübertragung in die Netzleitstelle, meistens nicht vorhanden. Daher kann die handelsübliche Software ohne Abänderungen nicht verwendet werden.

Bisher wird die anerkannte Gasnetzsimulationssoftware PSIGAnesi der PSI AG modifiziert eingesetzt, so dass zumindest die Summe der nicht gemessenen Abnahmen, die so genannte Fehlmenge, berechnet werden kann. Da die Fehlmenge nur an einem ausgewählten Punkt angetragen und so behandelt wird, als würde sie dort abfließen, kann diese Simulation nicht die realen Fließzustände in den Rohren wiedergeben. Zusätzlich ist es nicht möglich, die nicht gemessenen Abnahmen aus der Fehlmenge zu rekonstruieren.

Der Einsatz einer Gasnetzsimulation im Gasverteilnetzbereich ist aufgrund der aufgeführten Gründe eher unüblich. Durch die gesetzlichen Rahmenbedingungen hat sich jedoch ein Bedarf an softwareseitiger Unterstützung ergeben.

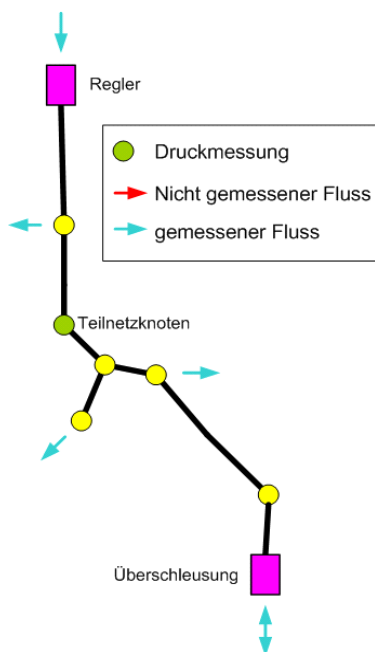


Bild 1: Schema eines Gas-transportnetzes

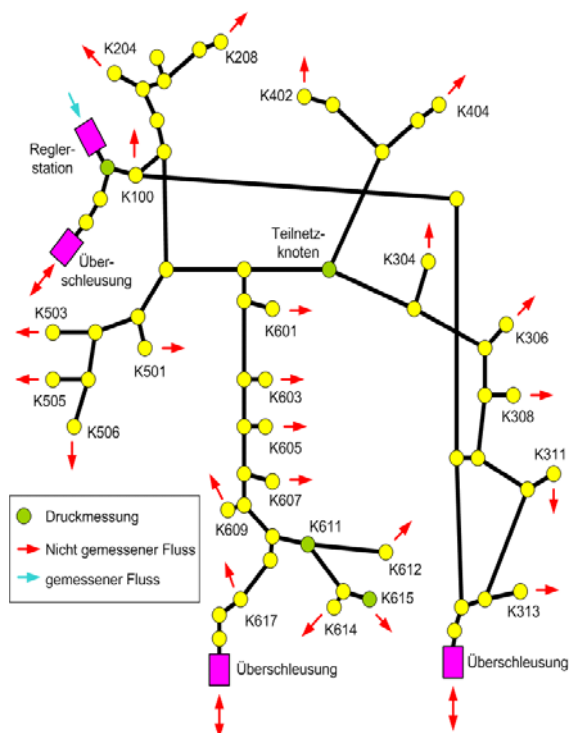


Bild 2: Schema des untersuchten Gasverteilnetzes



**Projekt:** Vorausschauende Gasnetzsimulation

---

**Lösungsweg:** Für die sich durch die Liberalisierung ergebenden Aufgaben ist die Berechnung einer Teilnetzfehlmenge nicht mehr ausreichend bzw. zur Unterstützung des Dispatchings kann es hilfreich sein, eine "rohr-auflösende" Simulation für Gasverteilnetze zu entwickeln. Um die prozessbegleitende Simulation zu verbessern, erscheint es essenziell, die Messinfrastruktur zu erweitern. Ein Verfahren, das eine Messstellenkonfiguration für Teilnetze bezüglich Lage und Anzahl unter Berücksichtigung der Kosten des Ausbaus und der Simulationsgenauigkeit der prozessbegleitenden Simulation optimiert, zu entwickeln, ist ein Ziel des Projektes. Dazu wird das Gasnetz als regelungstechnisches System betrachtet und auf Beobachtbarkeit bzw. Rekonstruierbarkeit untersucht. Da die Beobachtbarkeit im klassischen Sinne entweder für ein System gegeben oder nicht gegeben ist, wird ein quantitatives Maß gesucht, das die Güte der Beobachtbarkeit wiedergibt.

Zur weiteren Verbesserung der Simulationsergebnisse wird versucht, die auch nach dem minimalen Ausbau der Messinfrastruktur nicht gemessenen Abnahmen nachzubilden. Dazu werden die nicht gemessenen abgehenden Volumenströme, die aus regelungstechnischer Sicht fehlende Randwerte bei der Simulation darstellen, mit Hilfe eines Knotenlastbeobachters (Bild 3) approximiert. Zur Verbesserung des zeitlichen Einschwingverhaltens wird mit Hilfe von vorab vorhandenem Erfahrungswissen der Knotenlastbeobachter um eine Vorsteuerung auf Basis der Lastprofile, die an der TU München entwickelt wurden, erweitert.

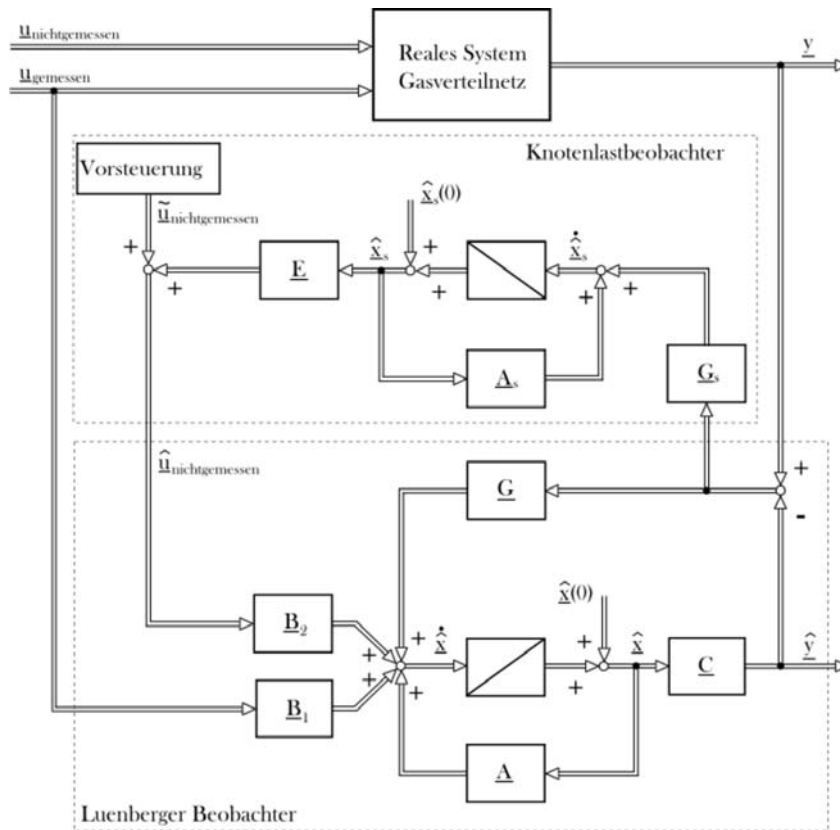
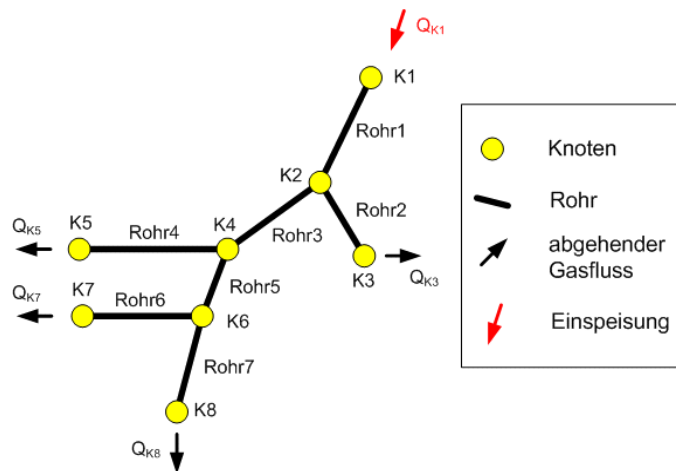


Bild 3: Strukturdiagramm des Knotenlastbeobachters

**Projektstand:**

Der Knotenlastbeobachter in Bild 3 wurde für zwei ausgewählte Teilnetze der E.ON Thüringer Energie AG mit Matlab und Simulink implementiert. Beide Gasverteilnetze wurden mit der erforderlichen Messinfrastruktur ausgestattet, um herkömmliche Gasnetzsimulationssoftware zur Berechnung von Referenzdaten für alle Knotendrucke und Rohrflüsse einsetzen zu können. Die mit Knotenlastbeobachter bei unvollständiger Messinfrastruktur durchgeführten Simulationen wurden mit diesen Referenzdaten verglichen. Die bereits sehr vielversprechenden Ergebnisse für das Gasverteilnetz 15. Ordnung in Bild 4 bei unvollständiger Messinfrastruktur, konnten bei dem Gasverteilnetz 39. Ordnung bestätigt werden.

Bild 4: Untersuchungs-gasverteilnetz  
15. Ordnung



Für das Messinfrastrukturszenario in Bild 5 für das Gasverteilnetz 39. Ordnung konnten die ausgewählten Simulationsergebnisse für Knotendrücke, Rohrflüsse und Beobachtung nicht gemessener Knotenabnahmen in Bild 6, Bild 7 und Bild 8 gewonnen werden. Die Darstellung aller Simulationsergebnisse würde den Rahmen hier übersteigen und keine weiteren Erkenntnisse liefern. Die Vorsteuerung erfolgte in den dargestellten Simulationsergebnissen über synthetische Lastprofile.

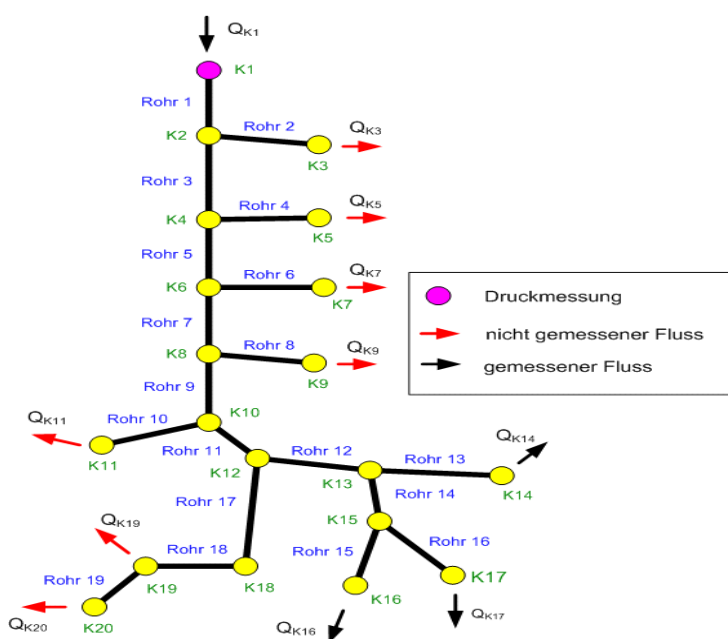


Bild 5: Messinfrastrukturszenario  
für das Gasverteilnetz 39. Ordnung

Bild 6 stellt die Simulationsergebnisse für drei Knotendrucke dar. Die Referenzdaten sind in blau und die Ergebnisse der Matlab-Simulation mit Knotenlastbeobachter in magenta abgebildet. Lediglich der Druck im Knoten K1 geht als Messung in die Simulation ein. Dennoch können auch die übrigen Knotendrucke sehr gut beobachtet werden. Für derart kleine Gasverteilnetze ist dieses Ergebnisse erwartet gut.

Die nicht gemessenen Knotenabnahmen können ebenfalls in guter Genauigkeit beobachtet werden. In Bild 7 sind stellvertretend drei Nachbildungen nicht gemessener Knotenabnahmen dargestellt. Zusätzlich zu den Referenzdaten in blau und den Matlab-Simulationsergebnissen in magenta ist die Vorsteuerung in grün eingetragen. Obwohl die Vorsteuerung nach der Einschwingphase von ca. 15 h teilweise deutlich zu niedrig ist, können die abgehenden Gasflüsse gut approximiert werden. Die Ergebnisse für die Knotenabnahme in K9 müssen im Hinblick auf eine niederdruckseitige Kopplung mit K11 betrachtet werden. Die abgehenden Gasflüsse in K9 und K11 fließen in ein gemeinsames Niederdrucknetz. Die Zuordnung der richtigen Knotenabnahme wird dadurch erschwert. Gründe für die auftretenden Abweichungen können Parameter- und Modellungenauigkeiten, aber auch die geringen zu beobachtenden Gasmengen z.B. in K19 sowie Beobachtungsfehler sein.

Projekt: Vorausschauende Gasnetzsimulation

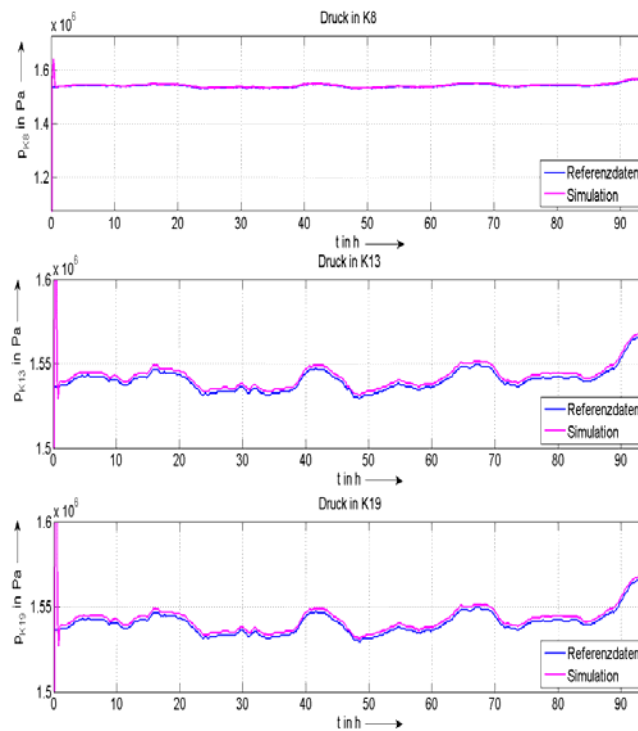


Bild 6: Simulationsergebnisse für die Knotendrucke in K8, K13 und K19 in Pa bei sieben nicht gemessenen Knotenabnahmen

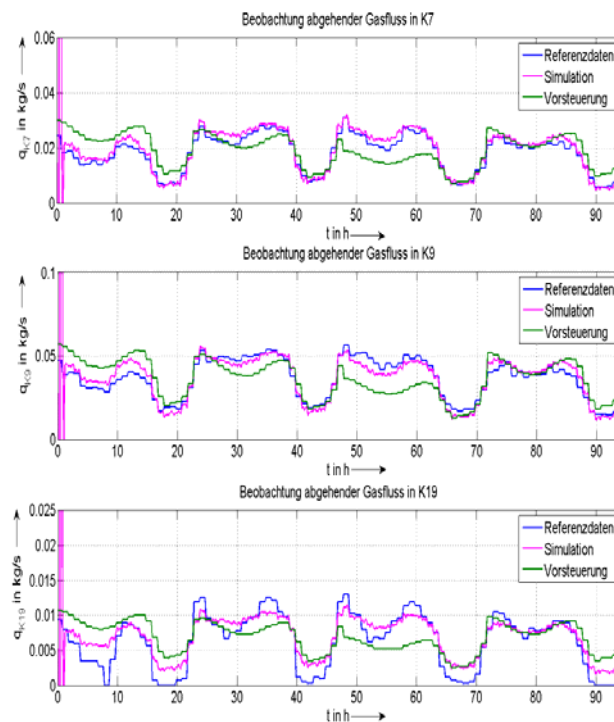


Bild 7: Simulationsergebnisse für die nicht gemessenen Knotenabnahmen K7, K9 und K19

Die Rohrflüsse ergeben sich mit dieser Beobachtung der nicht gemessenen Knotenabnahmen für drei ausgewählt in der in Bild 8 dargestellten Genauigkeit. Die Matlab-Simulationsergebnisse in magenta liegen teilweise direkt über den Referenzdaten in blau. Verlauf und Amplitude können in guter Genauigkeit beobachtet werden.

Trotz der geringen Messinfrastrukturausstattung in Bild 5 können die Knotendrücke und Rohrflüsse in einer für das Dispatching hilfreichen Genauigkeit mit Hilfe eines Knotenlastbeobachters bestimmt werden. Die erzielten Ergebnisse für diese kleine Gasverteilnetze sind so vielversprechend, dass in einem Folgeprojekt die Implementierung des Knotenlastbeobachters in die Simulationssoftware PSI-Ganesi geplant ist, um dessen Einsatz für größere komplexere Gasverteilnetze zu prüfen.

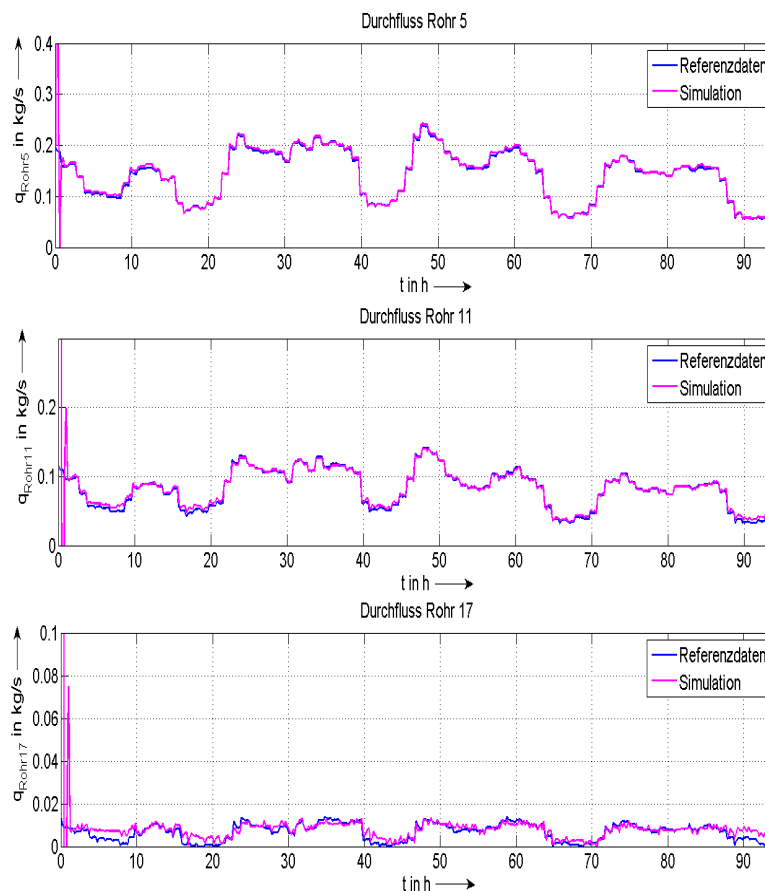


Bild 8: Simulationsergebnisse für die Rohrflüsse in Rohr 5, Rohr11 und Rohr17 in kg/s bei sieben nicht gemessenen Knotenabnahmen

Zur Bestimmung einer theoretischen minimalen Messinfrastruktur wurden eine theoretische und eine empirische Analyse durchgeführt. Die theoretische Analyse umfasst die Aufstellung des mathematischen Modells und analysiert die Strukturen. Mit Hilfe von Dominanzmaßen der Eigenwerte aber auch mit den Strukturmaßen von Benninger, die die Güte einer Systemeigenschaft quantitativ bewerten, wurden Aussagen zur strukturell optimierten Messinfrastruktur abgeleitet. Die Strukturmaße von Benninger, die hier für die Steuer- und Beobachtbarkeit angewendet werden, ermöglichen direkt Aussagen zur Auslegung der Messinfrastruktur. Im Gegensatz zur qualitativen Kalmanschen Steuer- und Beobachtbarkeit geben die Steuer- und Beobachtbarkeitsmaße von Benninger wie gut das betrachtete System steuer- bzw. beobachtbar ist.

Die empirische Analyse beruht auf der vorhandenen vollständigen Messinfrastruktur für das Untersuchungsteilnetz nach Bild 2. Mit der Gasnetzsimulationssoftware ist es damit möglich den vollständigen Systemzustand mit allen Knotendrücken, Rohrflüssen und weiteren Kenngrößen zu berechnen. Mit einer Erweiterung der Standard Simulationssoftware ist darüber hinaus möglich, Messungen durch synthetische Standardlastprofile zu ersetzen. Sukzessive wurden nun Messstellen reduziert und durch Standardlastprofile ersetzt. Die Abweichungen der Simulationen mit reduzierter Messinfrastruktur zu den Simulationen bei vollständiger Messinfrastruktur wurden ausgewertet. Dazu wurden für die drei ausgewählten und relevanten Netzgrößen Knotendruck, Rohrfluss und Fließgeschwindigkeit die Abweichungen gebildet und zeitlich und räumlich zusammengefasst. Um der unterschiedlichen Bedeutung der verschiedenen Rohre gerecht zu werden, wurde zusätzlich ein Gewichtungsfaktor eingeführt. Systematisch wurden Simulationen mit unterschiedlichen Messinfrastrukturszenarien durchgeführt und bewertet. Die somit bestimmte optimierte Messinfrastruktur für das Untersuchungsteilnetz in Bild 2 kann nicht direkt übertragen werden. Dennoch konnten grundlegende Erkenntnisse gewonnen werden.

Aus dem Zusammenspiel der empirischen und theoretischen Analyse lassen sich Aussagen zur optimierten Auslegung von Messinfrastruktur für Gasverteilnetze ableiten. Während die theoretische Analyse strukturell das Gasverteilnetz untersucht, bezieht die empirische

---

Analyse auch die Kundenstruktur und –charakteristik ein.

**Projektpartner:** E.ON Thüringer Energie AG, Erfurt  
PSI AG, Berlin/Essen

**Bearbeiter:** Dr.-Ing. Cathrin Schröder

**Projektleiter:** Dr.-Ing. Ernst-August Wehrmann (Tel.: 72-2595)  
wehrmann@iee.tu-clausthal.de



**Projekt:** Entwicklung einer vorausschauenden Online-Simulation von regionalen Gasverteilnetzen

---

**Problem:** Diverse Gesetzesinitiativen in den vergangenen Jahren, sowohl auf europäischer wie auch auf nationaler Ebene und das gestiegene Interesse der Gasnetzbetreiber die Prozesse in ihren Erdgasverteilnetzen besser kennen zu wollen, stellen neue Anforderungen an die eingesetzten Simulationssysteme. Die kommerziell erhältlichen Simulationswerkzeuge ermöglichen die Simulation der Drücke und Flüsse von komplett instrumentierten Gasnetzen. Unter komplett instrumentierten Netzen versteht man Netze bei denen alle Zu- und Abflüsse sowie mindestens ein Druck gemessen sind. Diese Voraussetzung ist in der Regel jedoch nur bei Transportnetzen mit wenigen Auspeisestellen erfüllt. Aufgrund der großen Anzahl an Ein- und Auspeisestellen bei regionalen Erdgasverteilnetzen wäre eine komplette Ausstattung mit Messeinrichtungen mit sehr hohen Kosten verbunden. Um diesen Aufwand zu vermeiden müssen neue Werkzeuge entwickelt werden mit denen die Simulation von Netzen mit einer unvollständigen Messinfrastruktur möglich ist.

**Ziel:** Weiterentwicklung einer Gasnetzsimulationssoftware und Implementierung in ein regionales Erdgasverteilnetz der E.ON Avacon AG. Des Weiteren soll die Anzahl und Lage der dafür notwendigen Messeinrichtungen festgelegt werden.

**Stand der Technik:** Die derzeitig sich im Einsatz befindenden Gasnetzsimulationen sind vor allem für vollständig gemessene und wenig verzweigte Transportnetze ausgelegt. In stark vermaschten Verteilnetzen mit einer unvollständigen Messinfrastruktur funktionieren diese Simulationen nicht, beziehungsweise nur sehr stark eingeschränkt.

Um diese Problematik mit einem nur geringen Ausbau der Messinfrastruktur zu lösen, wurde im Rahmen eines Forschungsprojektes zusammen mit der E.ON Thüringer Energie AG und PSI AG am IEE im Zeitraum 2005 bis 2009 der Gasnetzsimulator (GANESI) weiterentwickelt. Der von dem Simulationssystem verwendete Luenberger Beobachter wurde hierbei um einen Störgrößenbeobachter (Knotenlastbeobachter) erweitert, der die nicht gemessenen Entnahmen nachbildet (siehe Bild 1). Um die Einschwingzeit des Knotenlastbeobachters zu verringern, wurde zusätzlich eine Vorsteuerung über Lastprofile implementiert.

Diese Knotenlastbeobachter wurde an einem Netzausschnitt mit 26

---

Ausspeisungen eines komplett instrumentierten Netzes entwickelt. In zahlreichen Simulationsläufen an diesem Netz hat er seine Funktionsfähigkeit unter Beweis gestellt.

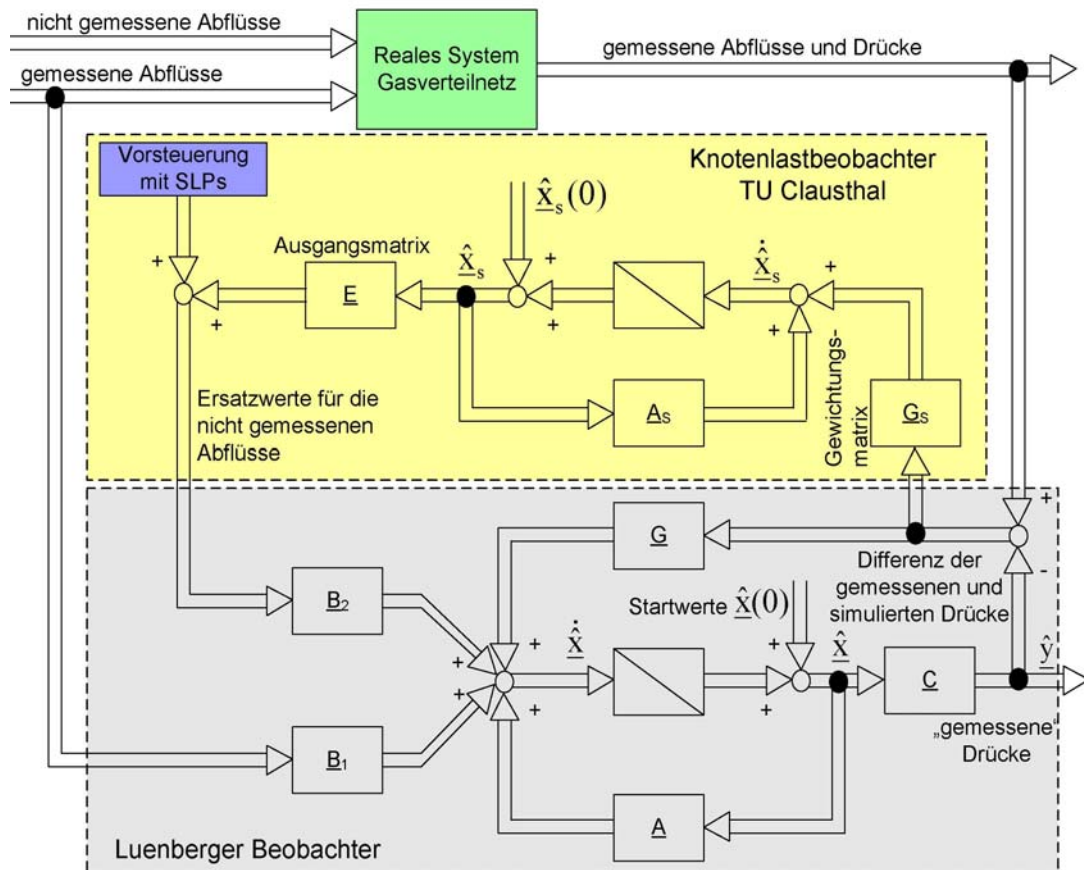


Bild 1: Strukturdiagramm des Simulationssystems mit Knotenlastbeobachter

**Lösungsweg:**

Als erster Schritt hin zu einer Implementierung eines Simulationssystems in das Netz der E.ON Avacon AG (siehe Bild 2) ist es notwendig eine Bestandsaufnahme der installierten Messeinrichtung durchzuführen. Anschließend werden für die nicht gemessenen Knoten die Standardlastprofile nach dem Verfahren der TU München erstellt und in diesem Rahmen auch einer Untersuchung der Kundenstruktur durchgeführt. Auf Basis der Bestandsaufnahme und der Untersuchung der Kundenstruktur werden anhand von speziell entwickelten Kriterien die Ausspeiseknoten identifiziert an denen eine zusätzliche Flussmessung installiert werden muss. Daran anschlie-

**Projekt:** Entwicklung einer vorausschauenden Online-Simulation von regionalen Gasverteilnetzen

ßend sind diese Messeinrichtungen zu installieren, was einen erheblichen Zeitaufwand mit sich bringt.

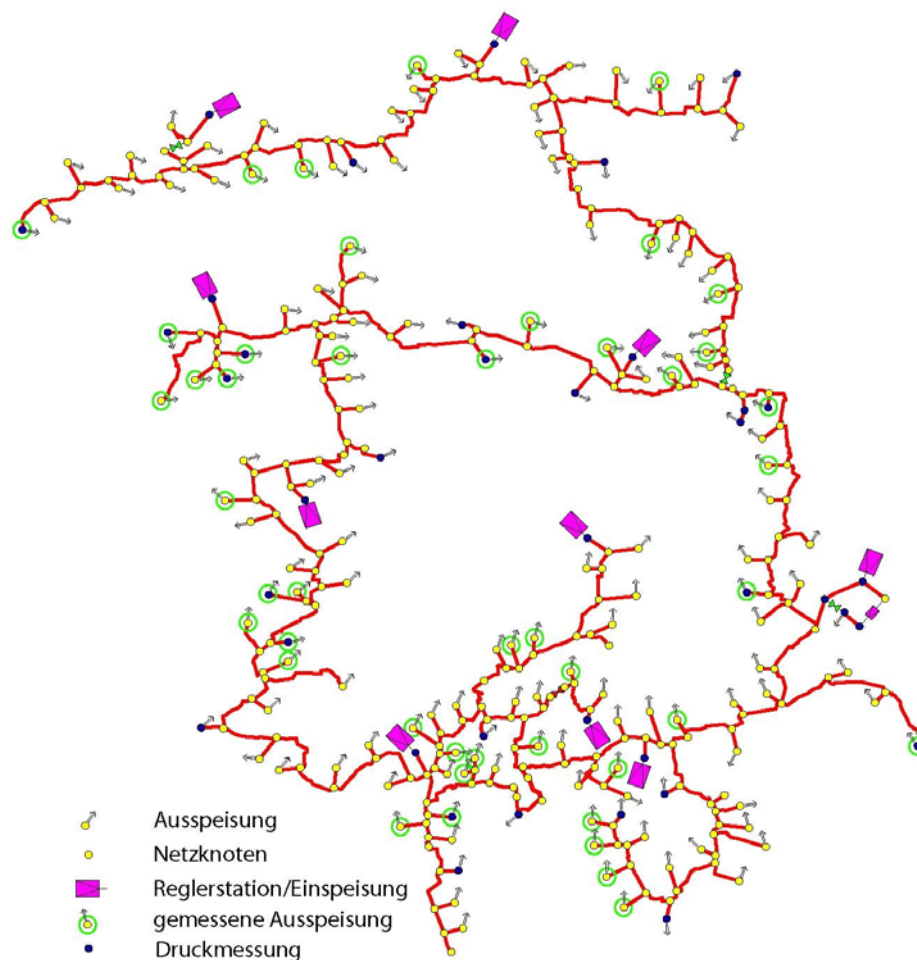


Bild 2: Netztopologie des E.ON Avacon AG Netzes

Nachdem die Messinfrastruktur entsprechend ausgebaut ist, kann der Knotenlastbeobachter implementiert werden. Aufgrund der Größe des Netzes und den daraus resultierenden Druckdifferenzen in den unterschiedlichen Netzbereichen, ist es notwendig mehrere Druckmessungen (Teilnetznoten) für die Beobachtung zu berücksichtigen. Dadurch ergibt sich die Fragestellung, ob der Knotenlastbeobachter in Form von mehreren Eingrößenbeobachtern oder als ein

Mehrgrößenbeobachter implementiert werden soll. Da der Knotenlastbeobachter bisher nur als Eingrößenbeobachter an einem kleinen Testnetz entwickelt und getestet wurde, werden hier zu Beginn mehrere Eingrößenbeobachter implementiert. Sind die Eingrößenbeobachter erfolgreich implementiert, wird geprüft, ob die damit erreichte Simulationsgüte ausreichend ist. Sollte dies nicht der Fall sein, wird zum einen versucht, erweiterte Ansätze für die Besetzung der Beobachtermatrizen einzusetzen und zum anderen wird der Knotenlastbeobachter zum Mehrgrößenbeobachter weiterentwickelt.

Zur Validierung der simulierten Werte werden temporäre Flussmessungen an unterschiedlichen Stellen im Netz durchgeführt und mit den Simulationsergebnissen verglichen.

**Projektstand:**

Seit dem Projektstart Anfang 2009 wurde eine Bestandsaufnahme der vorhandenen Messeinrichtungen durchgeführt, die Messwerte beschafft und für die nicht gemessenen Entnahmeknoten Standardlastprofile ausgerollt. Auf Grundlage der Bestandsaufnahme und der Standardlastprofile und der damit einhergehenden Analyse der Kundenstruktur an den Entnahmeknoten sind die zusätzlich noch zu messenden Ausspeiseknoten identifiziert worden. Aufgrund der Erfahrungen aus dem vorherigen Projekt zusammen mit der E.ON Thüringer Energie AG und der PSI AG hat man festgelegt, dass Ausspeisungen mit einem Anteil an nicht gemessenen Industriekunden von mehr als 25 Prozent gemessen werden müssen. Dies begründet sich durch das individuelle Abnahmeverhalten von Industriekunden, welches nicht ausreichend genau durch Standardlastprofile erfasst werden kann. Der Bau dieser zusätzlich benötigten

Messstellen wurde Ende 2009 in Auftrag gegeben.

Des Weiteren wurden die für die Simulation benötigten Druckmessstellen ausgewählt und die entsprechenden Knoten als Teilnetzknotten definiert.

Obwohl der Bau der zusätzlichen Messeinrichtungen noch nicht abgeschlossen ist, wird aktuell das Simulationssystem mit Knotenlastbeobachter für das Netz implementiert, um schon vorab erste Untersuchungen durchzuführen und die Datenanbindung zu realisieren.

**Projekt:** Entwicklung einer vorausschauenden Online-Simulation von regionalen Gasverteilnetzen

---

Erste Ergebnisse der Simulation der Drücke an zwei Teilnetzknotten sind in Bild 3 abgebildet. In grün sind die gemessenen und in rot die simulierten Druckwerte auf der Primärachse dargestellt. Da die Drücke sehr gut berechnet werden, kann man kaum einen Unterschied zwischen beiden Kurven erkennen. Entsprechend sind die Werte der blauen Kurve, welche die Differenz zwischen den simulierten und gemessenen Drücken darstellt, sehr klein (Sekundärachse). Diese schon sehr vielversprechenden Ergebnisse lassen erwarten, dass es nach der Installation der zusätzlichen Messstellen möglich sein sollte das Gasnetz in einer hohen Güte zu simulieren.

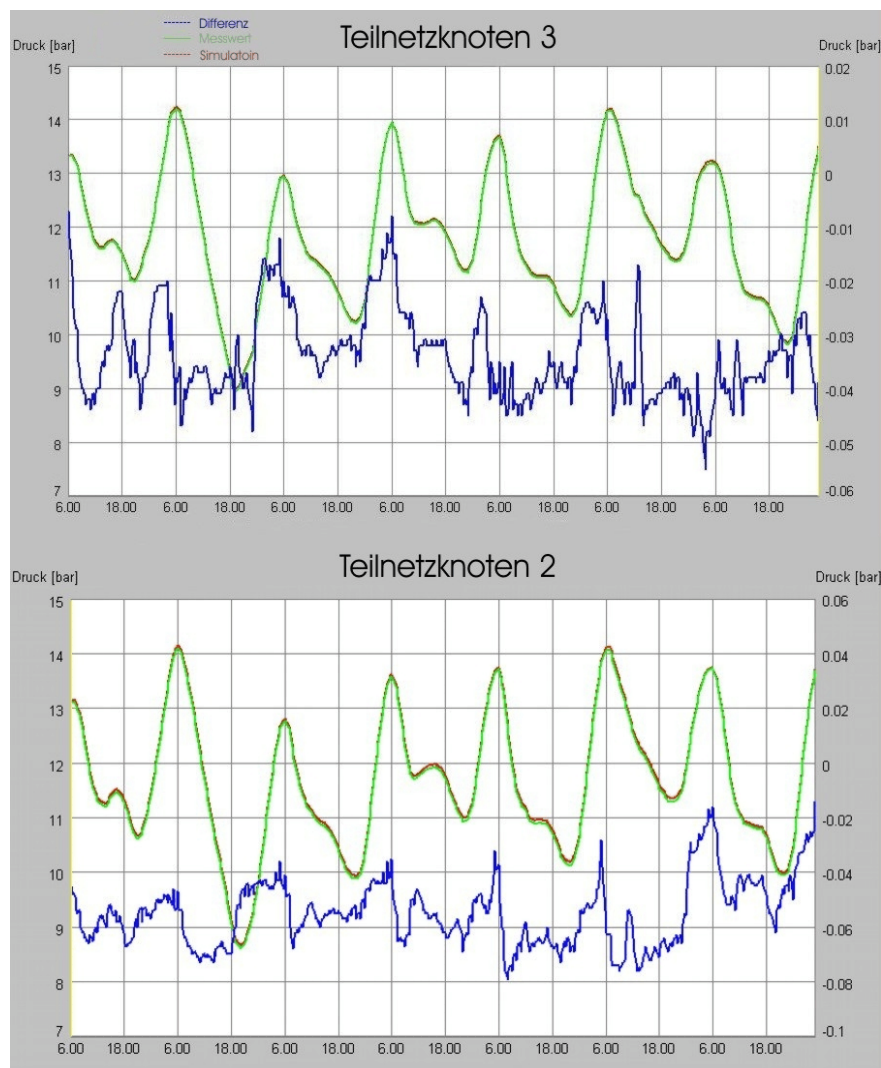


Bild 3: Druckverläufe Teilnetzknotten 2 und 3

---

---

<b>Projektpartner:</b>	E.ON Avacon AG, Helmstedt PSI AG, Berlin	
<b>Bearbeiter:</b>	Dipl.-Ing. Torsten Hager torsten.hager@tu-clausthal.de	(Tel.: 72-3736)
<b>Projektleiter:</b>	Dr.-Ing. Ernst-August Wehrmann	(Tel.: 72-2595)

**Projekt:** Prozessmodell des MS-EWE-Netzes

---

**Problem:** Im Rahmen des EWE-DEMS (Dezentrales Energiemanagementsystem) Projekts ist eine Simulation des Mittelspannungsnetzes der EWE durchzuführen.

Der Schwerpunkt liegt bei der Untersuchung des Systemverhaltens von dezentralen kleinen und mittleren Anlagen, die in das Mittelspannungsnetz einspeisen. Gegenwärtig stellt die Windenergie den größten Anteil dieser dezentralen Einspeisungen dar. Die maximale Leistung der installierten Windenergieanlagen liegt dabei in der Größenordnung der maximalen Last, die in diesem Netz auftritt. Zukünftig ist damit zu rechnen, dass weitere dezentrale Erzeugungsanlagen in das Netz einspeisen. Dies sind zum einen weitere Windenergieanlagen, darüber hinaus aber auch Blockheizkraftwerke (z. B. Biogasanlagen oder kleinere Anlagen, die als Heizungsanlagen in Ein- und Mehrfamilienhäusern oder Gewerbebetrieben eingesetzt werden).

Diese vermehrte Einspeisung in das Mittelspannungsnetz, das ursprünglich als Verteilnetz geplant wurde, kann zu Problemen im Bereich Auslastung und Spannungshaltung führen. Bei der Einsatzplanung der beeinflussbaren Erzeugungsanlagen im Rahmen des DEMS Projekts ist daher die Auswirkung auf das Mittelspannungsnetz zu beachten. Weiterhin stellt die Netzsimulation erweiterte Erkenntnisse für die Entscheidung über den Netzausbau bereit.

**Ziel:** Erstellung eines Simulationsmodells zur quasistationären Simulation des EWE-Netzes mit Lasten und Erzeugern. Insbesondere eine vorausschauende Simulation mit prognostizierten Zeitverläufen von Lasten und Erzeugern sowie unter Berücksichtigung von Schalthandlungen. Überprüfung von Fahrplanvorschlägen aus der Einsatzplanung für beeinflussbare dezentrale Erzeugungsanlagen aus netztechnischer Sicht.

Als neuer Schwerpunkt ist die prozessbegleitende (online) Simulation in das Projekt aufgenommen wurden. Dabei steht insbesondere die Generierung eines konsistenten Datensatzes der zur Simulation erforderlichen Eingangsdaten der Knotenwirk- und blindleistungen im Vordergrund. Zur Bestimmung dieser Größen auf Basis von Messwerten wurde in diesem Projekt der systemtheoretische Ansatz eines Beobachters auf das System eines elektrischen Netzes übertragen.

- Stand der Technik:** Einerseits Prozessführung über das vorhandene Leitsystem, andererseits Offline-Planungssoftware zur Netzberechnung für stationär vorgegebene Netzsituationen.  
Softwaresysteme zur dynamischen Netzsimulation werden derzeit typischerweise nur im Hoch- und Höchstspannungsnetz eingesetzt.
- Lösungsweg:** Einbindung eines geeigneten Softwaresystems, zur quasistationären Simulation der Vorgänge im Mittelspannungsnetz unter Berücksichtigung dezentraler Erzeugungsanlagen (Windenergieanlagen, Blockheizkraftwerke, PV-Anlagen usw.) in den Gesamtprozess eines Dezentralen Energiemanagementsystems.  
Simulation eines zukünftigen Planungszeitraums und Identifikation gegebenenfalls auftretender Verletzungen von Netzrestriktionen (Spannungshaltung oder Auslastung).  
Im neu definierten Schwerpunkt des Projekts ist eine prozessbegleitende Simulation des elektrischen Netzes bei nur geringer Messinfrastruktur das Ziel, das durch den systemtheoretischen Ansatz eines Beobachters erreicht werden soll. Grundlage dieser Untersuchungen ist die bekannte Beobachtertheorie für lineare Systeme, die für Differentialgleichungssysteme gilt und hier auf das komplexe algebraische Netzmodell des elektrischen Netzes angewendet werden soll.
- Projektstand:** Für eine prozessbegleitende Simulation stehen in der Regel in derartigen Mittelspannungsnetzen nicht genügend Messwerte zur Verfügung. Ein umfangreicher Ausbau der Messinfrastruktur ist bei derartigen Netzen mit einer großen Anzahl von Netzknoten und großer flächenmäßiger Ausdehnung kaum wirtschaftlich zu realisieren. Die Kenntnis der aktuell abgenommenen bzw. eingespeisten Knotenleistungen nach Betrag und Phase an sämtlichen Ein- und Ausspeisungen dieses Netzes ist jedoch die Voraussetzung für eine Simulation. Die Ermittlung dieser aktuellen Knotenleistungen aus einer möglichst geringen Anzahl von Messwerten des Mittelspannungsnetzes und unter Einbeziehung einer Knotenlastprognose ist ein Ansatz, der im Folgenden näher erläutert wird.  
Das elektrische Netz wird für die betrachteten quasistationären Zustände in den diskreten Zeitschritten nicht durch ein Differentialgleichungssystem beschrieben, sondern im Frequenzbereich durch das System der Strom- und Spannungszeiger. Die Rückführung der



Messwerte kann aus Stabilitätsgründen daher nicht wie beim klassischen Beobachter über eine proportionale Verstärkung erfolgen. Es wird daher ein Mehrgrößenregler mit Zeitverhalten eingeführt, der dynamisch aus den Abweichungen der gemessenen zu den beobachteten Vergleichsgrößen (Knotenspannungen, -ströme oder Leitungsströme) eine Korrektur der beobachteten Eingangsgrößen (Knotenwirk- und Blindleistungen) vornimmt und diese zur Steuerung des Beobachters nutzt.

Die Struktur des entwickelten Beobachters für elektrische Netze ist in Bild 1 zu erkennen. Als Vergleichswerte können alternativ die komplexen Knotenspannungen, -ströme oder Leitungsströme im elektrischen Netz herangezogen werden. Hier sind als Vergleichsgrößen die komplexen Knotenspannungen dargestellt.

Eine erkannte Abweichung zwischen den Messwerten aus dem realen Prozess (hier:  $\underline{U}_{K, \text{gemessen}}$ ) und einer Simulation (hier:  $\underline{U}_{K, \text{Beo}}$ ) des entsprechenden elektrischen Netzes im Rahmen des Beobachters wird dabei als Eingangsgröße (hier:  $\Delta \underline{U}_K$ ) auf den Regler des Beobachters geführt. Mit dem Regler werden nun die Eingangsgrößen der Simulation, welches die beobachteten Wirk- und Blindleistungen an den einzelnen Netzknoten sind, nachgeführt, bis die Abweichung ausgeregelt ist.

Das Modell des elektrischen Netzes für die Simulation besteht dabei im Kern aus der Admittanzmatrix  $\underline{Y}$ , die die Verknüpfung der Leitungen und Knoten sowie die Leitungsparameter beinhaltet. Die Lösung des Gleichungssystems der Netzgleichungen liefert als Ergebnis die Knotenspannungen  $\underline{U}_{K, \text{Beo}}$ . Als Startwerte für die Knotenlasten  $P_K(0)$  und  $Q_K(0)$  werden die Ergebnisse einer vorgeschalteten Knotenleistungsprognose eingesetzt, die somit dem Beobachter als Vorsteuerung dienen.

Wenn die Abweichungen zwischen den Messwerten aus dem realen Prozess und der internen Simulation des Beobachters ausgeregelt sind, können dem Beobachter die aktuellen Knotenleistungen an den einzelnen Netzknoten entnommen werden. Neben diesen Größen sind auch sämtliche weiteren aktuellen Netzzustandsgrößen, wie die (komplexen) Knotenspannungen und Leitungsströme sowie alle daraus zu berechnenden Größen des elektrischen Netzes als Zusatzinformationen über den Netzzustand bekannt (vgl. Bild 1). Ein Simulationsergebnis des Knotenlastbeobachters zur Rekonstruktion des

---

Netzzustands bei ungenau bekannten Modellparametern und nicht exakt vorgegebener Vorsteuerung ist in Bild 2 dargestellt.

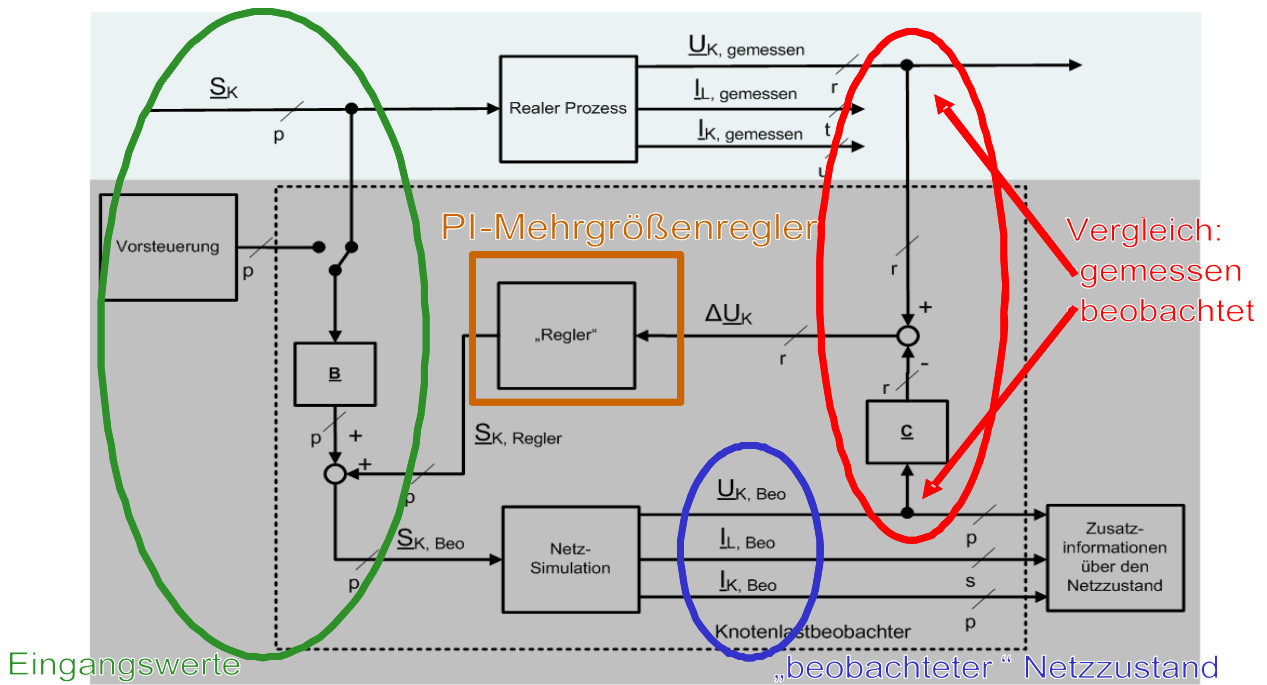


Bild 1: Blockschaltbild des Beobachters für elektrische Netze (Vergleichsgröße: komplexe Knotenspannungen)

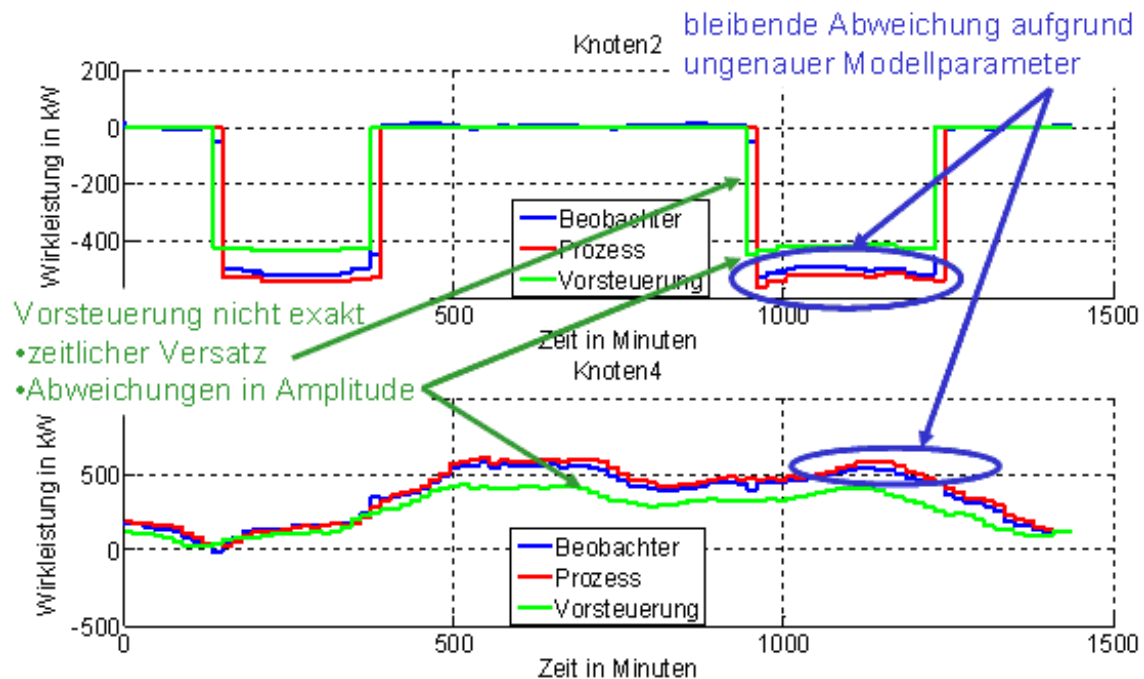


Bild 2: Simulationsergebnis des Knotenlastbeobachters. Verlauf der beobachteten Wirkleistung (blau) an zwei Netzknoten, bei nicht exakter Vorsteuerung (grün) im Vergleich zur realen Prozess (rot), der hier durch eine Vergleichssimulation nachgebildet wird.

**Projektpartner:** EWE AG, Oldenburg

**Bearbeiter:** Dr.-Ing. Jens zum Hingst (Tel.: 72-3597)  
zum.hingst@tu-clausthal.de

**Projektleiter:** Dr.-Ing. Ernst-August Wehrmann (Tel.: 72-2595)

***IEE***

**Projekt:** Windenergiespeicherung durch Nachnutzung stillgelegter Bergwerke, Netzintegration und Betrieb des Virtuellen Kraftwerks

---

**Problem:** Die Einbindung eines untertägigen Pumpspeicherkraftwerks in das elektrische Energiesystem stellt bestimmte Anforderungen an das Pumpspeicherkraftwerk bezüglich seiner Leistung, der Kapazität in Form des notwendigen Speichervolumens und der Dynamik, mit der auf geänderte Leistungsanforderungen reagiert werden kann. Die konkreten Anforderungen richten sich danach, in welcher Form am so genannten Regelenergiemarkt teilgenommen werden soll. Regelenergie und Regelleistung sind notwendig, um die Stabilität des elektrischen Energiesystems jederzeit zu gewährleisten. Im elektrischen Energiesystem, bestehend aus Erzeugungsanlagen (Einspeisern), Verteilungsnetzen und Abnehmern von elektrischer Energie, muss zu jedem Zeitpunkt ein Gleichgewicht zwischen eingespeister und abgenommener Leistung bestehen. Auch in Energiesystemen ohne fluktuierende Einspeiser wie z. B. Windenergieanlagen sind Regelkraftwerke notwendig, da die großen (thermischen) Kraftwerke nicht flexibel genug auf Leistungsänderungen der Abnehmer reagieren können bzw. aus wirtschaftlichen Gründen mit maximaler Leistung einspeisen sollen. Bei zunehmender Einspeisung von elektrischer Leistung aus fluktuierenden Quellen wie der Windenergie nimmt der Anteil sich schnell und zum Teil unvorhersehbar ändernden Leistungen im Netz zu und damit auch der Bedarf an Kraftwerken, die Regelleistung liefern können. Zur Teilnahme am Regelenergiemarkt müssen Kraftwerke bestimmte Anforderungen erfüllen, die im so genannten TransmissionCode festgelegt sind. Es wird dabei zwischen Primär-, Sekundärregelleistung und der Minutenreserve unterschieden. Kraftwerke, die am Markt für Primärregelleistung teilnehmen wollen, müssen demnach bei einer Leistungsänderung von 2 % ihrer Nennleistung mindestens eine Leistung von  $P_{el} = 2$  MW bereitstellen können. Diese Anforderung kann nur von großen Kraftwerken mit einer elektrischen Leistung von mehr als 100 MW bereitgestellt werden und kommt für die hier untersuchten kleineren Pumpspeicherkraftwerke nicht in Betracht.

**Ziel:** Entwicklung eines energiesystemtechnischen Konzepts nach Bild 1 für ein Virtuelles Kraftwerk, bestehend aus Pumpspeicherwerk(en) unter Tage und Windkraftanlage(n). Berücksichtigung der Anforderungen zur Teilnahme am Markt für Regelenergie und Entwicklung eines Konzepts bzw. Speichermanagements zur Bewirtschaftung des

---

Pumpspeicherkraftwerks (PSW).

- Stand der Technik:** Bestehende Pumpspeicherkraftwerke sind über Tage errichtet. Um einen ausreichenden Höhenunterschied zwischen Ober- und Unterwasserbecken zu realisieren, befinden sich diese Anlagen typischerweise in Gebieten mit Gebirgen. Ausgelegt sind diese Anlagen zur Vergleichmäßigung des Energiebedarfs und –angebots im Tag-/Nachtzyklus mit gleichmäßiger Leistungsabgabe- bzw. –aufnahme und Laufzeiten im Bereich mehrere Stunden. In Österreich ist eine bestehende Anlage eines Pumpspeicherkraftwerks um einen untertägigen Speicher in Form eines unterirdischen Kavernensystems erweitert worden (Kraftwerk Naßfeld). In den USA gab es mehrere Ansätze für Pumpspeicherkraftwerke mit einem untertägigen Unterbecken (z.B. Summit hydroelectric pumped storage project oder Mt. Hope Waterpower Project), die allerdings nicht realisiert worden sind.
- Lösungsweg:** Definition von technischen Anforderungen zur Bereitstellung von Regelleistung unter anderem zur Festlegung der geforderten Größe (Leistung, Energieinhalt) des Pumpspeicherkraftwerks. Analyse realer Leistungsverläufe von Windenergieanlagen im Netzgebiet der Harzenergie zum Ableiten von Rahmenbedingungen zur Speichergröße und Speicherbewirtschaftung (Speichermanagement).
- Projektstand:** Aus den technischen Anforderungen zur Teilnahme am Markt für Sekundärregelleistung und die Minutenreserve können die Kenngrößen zur Auslegung eines untertägigen Pumpspeicherkraftwerks abgeleitet werden. So muss die mindestens installierte elektrische Leistung  $P_{el} = 10 \text{ MW}$  betragen und mindestens für einen Zeitraum von vier Stunden zur Verfügung stehen können. Aus diesen Kenngrößen kann abhängig von der möglichen Fallhöhe das mindestens benötigte Volumen der untertägigen Ober- und Unterbecken berechnet werden. Eine überschlägige Berechnung dieses mindestens benötigten Speichervolumens  $^{\circ}\text{V}$  kann gemäß folgender Gleichung durchgeführt werden.

**Projekt:**

Windenergiespeicherung durch Nachnutzung stillgelegter Bergwerke, Netzintegration und Betrieb des Virtuellen Kraftwerks

---

$$P_{el} = \eta_{ges} \cdot \rho_{Wasser} \cdot g \cdot \dot{V} \cdot h \quad \text{mit } \rho_{Wasser} = 1000 \frac{kg}{m^3} \text{ und } g = 9,81 \frac{m}{s^2}$$

$$V = \dot{V} \cdot t \quad \text{mit } t = 4 \text{ h}$$

Unter Annahme eines Gesamtwirkungsgrads im Pump- bzw. Turbinenbetriebs von jeweils  $\eta_{ges} = 0,9$  ergeben die in Bild 2 abzulesenden benötigten Speichervolumen für eine vierstündige Betriebszeit in Abhängigkeit von den zu erwartenden Fallhöhen im Bereich von  $h = 100 \dots 700$  m. Die grüne Kurve stellt dabei die Mindestanforderung an ein Pumpspeicherkraftwerk zur Teilnahme am Regelenergiemarkt mit einer elektrischen Leistung  $P_{el} = 10$  MW von dar.

Die Bewirtschaftung eines Pumpspeicherkraftwerks, das im Verbund mit Windenergieanlagen gesehen wird, kann unter zwei Gesichtspunkten erfolgen.

Erstens zur Vergleichmäßigung der eingespeisten Leistung aus Windenergieanlagen und zweitens zur Reduktion der Leistungsänderungsgeschwindigkeit, die durch das fluktuierende Angebot der Windenergie und die Abschaltung von Windenergieanlagen bei Starkwind verursacht wird. Diese Fluktuation ist im (roten) Verlauf der eingespeisten Wirkleistung einer Windenergieanlage in Bild 3 zu erkennen. Die Daten sind Messwerte von einer Windenergieanlage mit einer Leistung von 150 kW, die als Referenzwerte für die Untersuchungen herangezogen werden. Um die Ergebnisse auf andere Anlagen übertragen zu können, sind die Leistungen normiert dargestellt. Als Bezug zur Normierung diente die Maximalleistung der Windenergieanlage im betrachteten Zeitraum. Auf Grundlage dieser Messdaten sind Voruntersuchungen zu einem möglichen Speichermanagement durchgeführt worden, um abschätzen zu können, wie ein Speicher zu bewirtschaften ist, und welche Speichergröße anzustreben ist.

In Bild 3 ist das Simulationsergebnis bei Einsatz eines Speichers zur Reduktion der Leistungsänderungsgeschwindigkeit und Begrenzung der max. Leistung dargestellt. Hier sind die Leistungen der Windenergieanlage (rot), der simulierte Leistungsverlauf am Speicher (blau) und der resultierende Verlauf der Kombination von Windenergieanlage und Speicher (grün) aufgeführt. Ausgehend von der

---

Kurve der Leistung des Speichers in Bild 3 (blau) kann analog zum Vorgehen zur Berechnung des Speichervolumens in Bild 1 eine Abschätzung zum benötigten Speichervolumen in Abhängigkeit von der nutzbaren Fallhöhe erfolgen. In Bild 4 ist für das Simulationsergebnis die Speicherausnutzung zur Deckung der Speicherleistung (blaue Kurve aus Bild 3) dargestellt. Über diese Darstellung ist es möglich, das benötigte Speicher Volumen zur Deckung des geforderten (zeitlichen) Verlaufs der Speicherleistung in Abhängigkeit der nutzbaren Fallhöhe abzulesen. Unter diesen Randbedingungen kann dann wiederum die Suche nach Standorten erfolgen, die bei den möglichen Fallhöhen das ausreichende Speichervolumen zur Verfügung stellen.

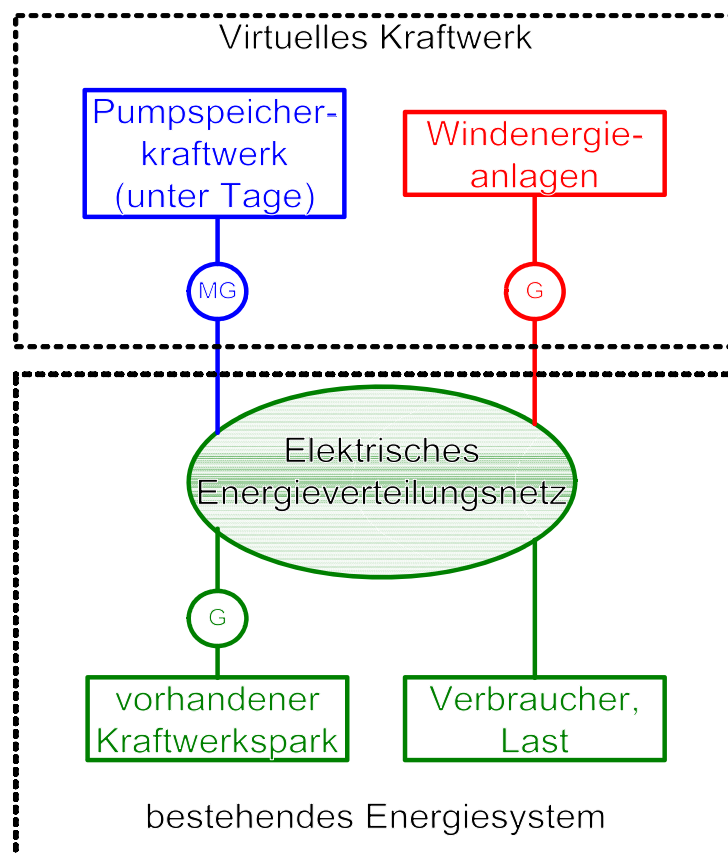


Bild 1: Bestehendes Energiesystem mit Integration eines Virtuellen Kraftwerks aus Pumpspeicherwerk(en) unter Tage und Windkraftanlage(n)



**Projekt:** Windenergiespeicherung durch Nachnutzung stillgelegter Bergwerke, Netzintegration und Betrieb des Virtuellen Kraftwerks

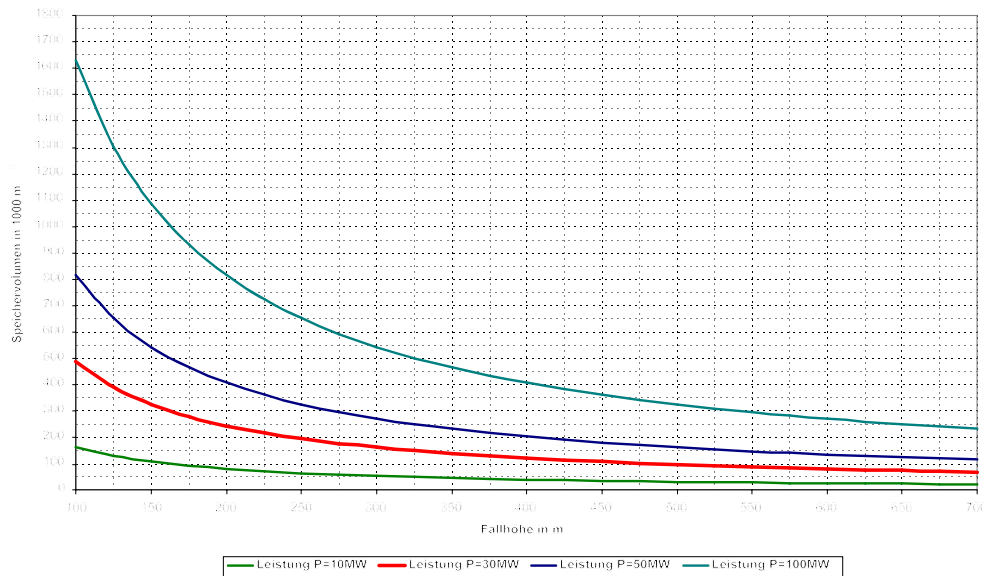


Bild 2: mindestens benötigtes Speichervolumen aus überschlägiger Berechnung für Fallhöhen im Bereich von  $h = 100 \dots 700$  m und elektrische Leistungen im Bereich von  $P_{el} = 10 \dots 100$  MW für eine vierstündige Betriebszeit

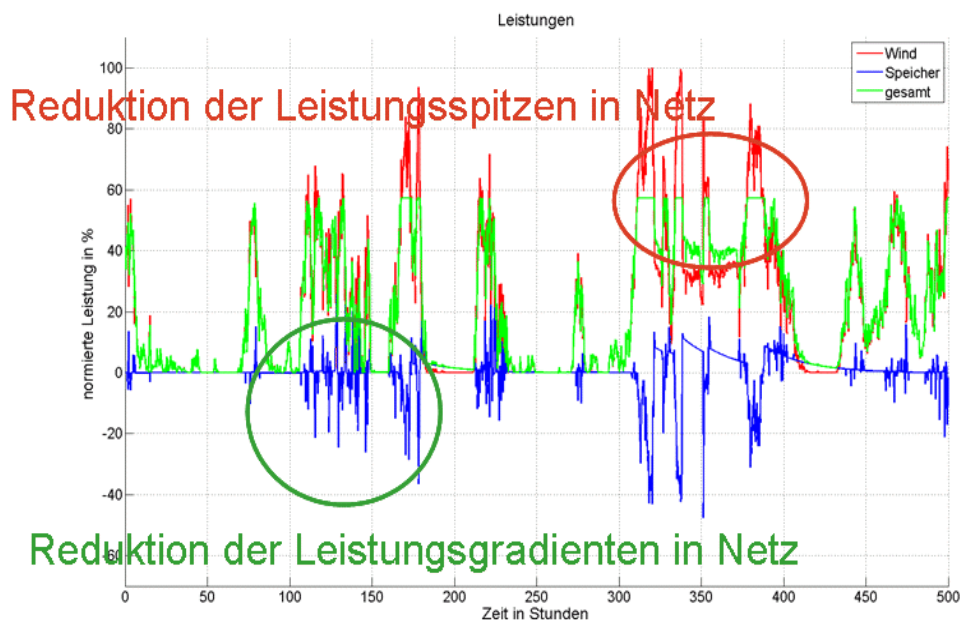


Bild 3: Simulationsergebnis bei Einsatz eines Speichers zur Reduktion der Leistungsänderungsgeschwindigkeit und Begrenzung der max. Leistung

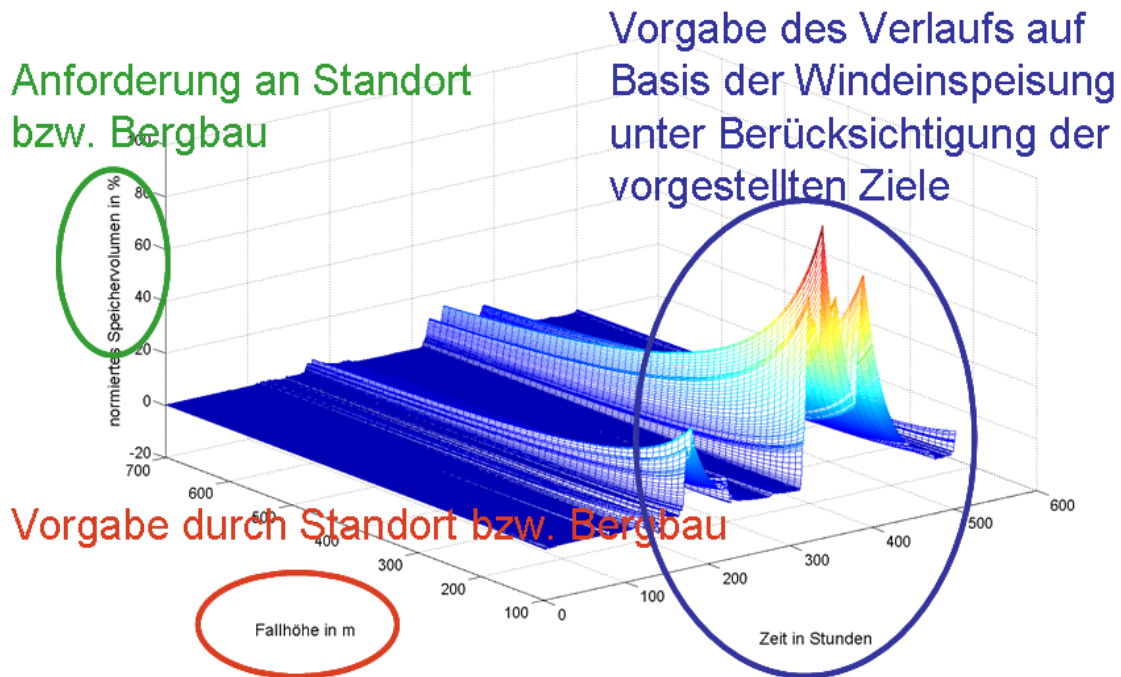


Bild 4: Simulationsergebnis zum Ableiten von Rahmenbedingungen zur SpeichergroÙe unter Berücksichtigung der Vorgaben durch den Standort bzw. Bergbau und der vorgestellten Ziele

**Projektpartner:** Harz Energie, Osterode  
Voith Siemens Hydro, Heidenheim

**Bearbeiter:** Dr.-Ing. Jens zum Hingst (Tel.: 72-3597)  
zum.hingst@tu-clausthal.de

**Projektleiter:** Dr.-Ing. Ernst-August Wehrmann (Tel.: 72-2595)

**Projekt:** ELAN III - Modul: Lehrverbund Dezentrale Energiesysteme

---

**Problem:** Der Themenbereich "Energie" ist längst nicht mehr nur für klassische Ingenieur- und naturwissenschaftliche Disziplinen interessant. Vielmehr handelt es sich um einen Bereich von weitreichender ökonomischer und gesellschaftspolitischer Relevanz, der mehr und mehr auch aus der Perspektive anderer Fachdisziplinen (Wirtschafts- und Sozialwissenschaften, Umweltwissenschaften, usw.) erörtert und gestaltet wird. Diese Entwicklung wird insbesondere vor dem Hintergrund einer zunehmend dezentral geprägten Energieerzeugung und den sich verändernden Marktstrukturen und ökologischen Rahmenbedingungen offensichtlich.

Von zukünftigen Absolventen, die im Energiesektor tätig werden wollen, werden daher spezifische Kompetenzen gefordert. Hierzu zählen u.a. ein breites Grundverständnis aus allen Bereichen der Energieversorgung, von der Erzeugung, über Transport und Speicherung bis hin zu den Verbrauchscharakteristika. Ebenso wird die Kenntnis aktueller Forschungs- und Entwicklungsrichtungen gewünscht. Darüber hinaus werden persönliche Fähigkeiten (Soft Skills) für die spätere Arbeit in verteilten, interdisziplinären Teams erwartet. Dies erfordert ein Lehrverbund mit der Verknüpfung verschiedener örtlich verteilter Kompetenzen, um eine ganzheitliche Betrachtung zu ermöglichen. Aber das vielschichtige Themenspektrum, die dezentrale Organisation und Administration, die Fachkompetenz der Erstansprechpartner, die Qualitätssicherung, die Harmonisierung des unterschiedliche Vorwissen und des Lehrbetriebs sind die Probleme, die in der Konzipierung und die Realisierung getroffen werden.

**Ziel:** Das Hauptziel ist der Aufbau einer eLearning Veranstaltung „Dezentrale Energiesysteme“ durch die Nutzung standort- und fachbereichübergreifender Kompetenzen. Darüber hinaus sollen die standort- und fachspezifischen Kenntnisse an die Projektpartner weitergegeben werden. Eine effiziente interaktive Lernumgebung ist durch die Verwendung der geeigneten kommerziellen und selbstentwickelten Software zu erstellen. Sie müssen die Kompensation des unterschiedlichen Vorwissens der Teilnehmer aus unterschiedlichen Fachbereichen ermöglichen, um insbesondere fachfremde Inhalte beispielhaft, anschaulich und klar umrissen zu transportieren.

**Lösungsweg:** Die Funktionsweise elektrischer Energiesysteme wird in der Lehrver-

---

anstellung "Dezentrale Energiesysteme" thematisiert. Die gesamte Prozesskette wird durch verschiedene Kapitel umfasst: von der Umwandlung primärer Energie in den Sekundärenergieträger Strom über den Energietransport bis hin zur Nutzung der zur Verfügung gestellten Endenergie. Das Modul beschäftigt sich auch mit den Rahmenbedingungen heutiger Energiesysteme. Dazu zählen neben der Veränderung der Energieerzeugungsstruktur auch wirtschaftliche, rechtliche Rahmenbedingungen sowie der verstärkte Einsatz von Informationstechnologien zur Verbesserung der Geschäftsprozesse der Energiewirtschaft und ihres Umfeldes. Mit Hilfe aufeinander aufbauender Themenschwerpunkte findet die Vermittlung dieses interdisziplinären Wissens statt. Die Vorlesungskapitel sind folgendes organisiert: Energieerzeugung, Energietransport, Energiespeicherung, Energieverbrauch, Wirtschaftliche Aspekte, Informationstechnologie für Energieversorgungsunternehmen sowie die Konsequenzen aktueller Entwicklungen. Die Vorlesungen und Übungsaufgaben werden in einem Lernmanagementsystem integriert und stehen rund um die Uhr zur Verfügung. Dies wird durch Präsenzübungen und eine zentrale Übung in Form eines Telekolloquiums ergänzt. Mit der Bereitstellung der beschriebenen interaktiven Tools als Übungsmittel erfolgt eine Kompensation des unterschiedlichen Vorwissens der Teilnehmer.

**Ergebnis:**

Durch diese eLecture Veranstaltung wurden 20 eLearning- und 10 Präsenzübungseinheiten in einem Blended-Learning-Ansatz kombiniert. Die Lehrende haben den Lernenden aus verschiedenen Standorten die zu transportierenden Inhalte in Form von Vorlesungsaufzeichnungen zur Verfügung gestellt. Für die Erstellung des Content wurde an allen Standorten das Rapid Authoring Tool Lecturnity verwendet. Als Ergebnis steht den Lernenden ein multimediales Abbild der Vorlesung zum jederzeitigen Abruf zur Verfügung. Dieses Abbild präsentiert sich als ein in drei Bereiche aufgeteiltes Fenster, wobei die Folienpräsentation standardmäßig den größten Teil einnimmt; zudem werden die Aufzeichnung des Dozenten sowie verschiedene Navigationsmöglichkeiten dargestellt.

Der Zugriff auf die erstellten Aufzeichnungen kann sowohl internetbasiert über das Lernmanagementsystem Stud.IP als auch auf Wunsch über DVD erfolgen. Dies ermöglicht die Verknüpfung dezentraler Kompetenzen in einem Modul und vermeidet die Schwie-

rigkeiten der Harmonisierung der Lehrpläne. Die Studierenden haben die Möglichkeit, die Erarbeitung des Themas standortunabhängig und zeitlich flexibel zu gestalten. Damit kann das Modul mindestens sechs verschiedenen Fachrichtungen an drei Standorten angeboten werden ohne Überschneidung mit anderen Lehrveranstaltungen und es kann zeitlich so eingesetzt werden, wie es am jeweiligen Standort "optimal" ist.

In jedem Standort finden lokalen Übungen statt, die durch einen lokalen Dozent gehalten werden. Am Ende des Semesters wird eine zentrale Übung in Form eines Telekolloquiums mit Fernzugriff auf Energiepark Clausthal angeboten.

Die Zielgruppe umfasst derzeit Studierende der Richtungen Elektrotechnik, Maschinenbau, Wirtschaftsingenieurwesen Elektrotechnik, Wirtschaftsingenieurwesen Maschinenbau, Energiesystemtechnik, Wirtschaftsingenieurwesen, Informatik und Physik.

In den vier Semestern seit dem Vorlesungsstart (WS 07/08) haben über 130 Studierende an das eLecture „Dezentrale Energiesysteme“ teilgenommen. Alles in allem eröffnet ein solcher Lehrverbund die Möglichkeit von Kooperationen zwischen Hochschulen, wie sie ansonsten vermutlich nicht zustande kämen.

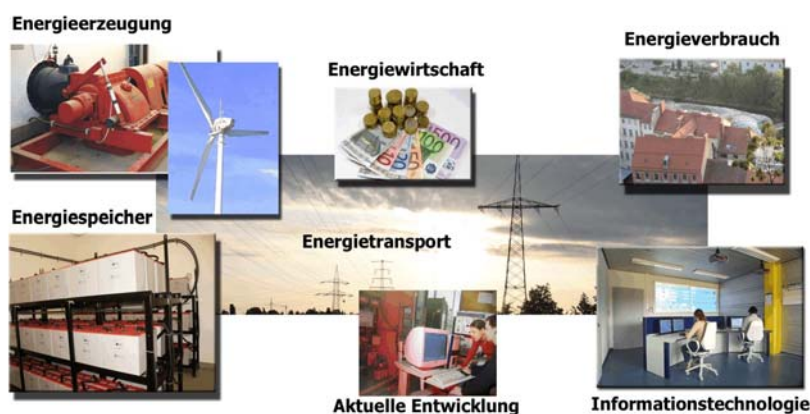


Bild 1: Das e-Lecture besteht aus 7 Kapiteln, wobei die Hauptthemen des dezentralen Energieversorgungssystems bearbeitet sind

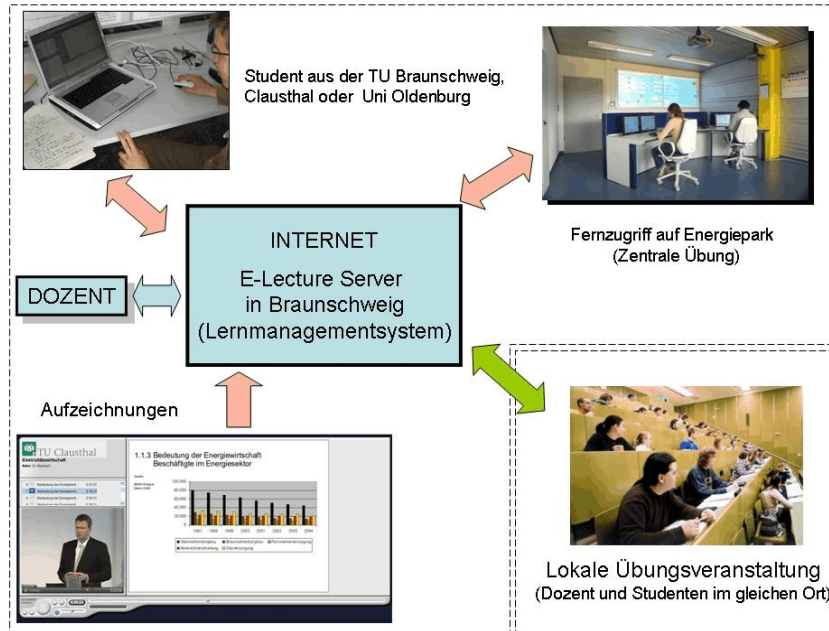


Bild 2: Rund um die Uhr stehen die Vorlesungsaufzeichnungen und Skripten (Vorlesungen und Übungen) online zur Verfügung. Der Student kann Ort- und Zeitunabhängig an der Veranstaltung “teilnehmen”. Als Ergänzung werden eine Zentrale Übung mit einem Fernzugriff auf Demonstrationsanlagen (Clausthaler Energiepark) und die regelmäßigen lokalen Übungsveranstaltungen für die Studenten angeboten.

**Bearbeiter:** Dr.-Ing. Aimé Mbuy (Tel.: 72-3702)  
mbuy@iee.tu-clausthal.de

**Projektleiter:** Dr.-Ing. Ernst-August Wehrmann (Tel.: 72-2595)

**Projekt:** Netzintegration von Offshore-Großwindanlagen  
- Grundlast von der Nordsee -

---

**Problem:** In Zeiten knapper werdender Ressourcen an fossilen Energien und dem daraus resultierenden Ziel der Bundesregierung, den Anteil von Strom aus Erneuerbaren Energien bis zum Jahr 2020 zu verdoppeln, wächst die Bedeutung der Off-Shore-Windenergieanlagen beträchtlich. Aufgrund ihrer technischen und wirtschaftlichen Größenordnung ist bei Off-Shore-Windenergiesystemen können derartige Projekte nur unter Führerschaft von großen Unternehmen realisiert werden. Bis 2030 wird eine installierte Leistung auf See zwischen 20 und 25 GW erwartet. Eine besondere Herausforderung dabei ist der Transport der Energie vom Windpark bis ins binnenwärtige elektrische Energieversorgungsnetz.

Der Rahmen für die Errichtung von Offshore-Windparks in der deutschen ausschließlichen Wirtschaftszone wird durch die Entfernungen zur Küste mit 60 km, Wassertiefen von bis zu 40 m, ein an der Küste relativ schwach ausgebautes elektrisches Netz und die besonderen Anforderungen aus dem Umweltschutz bestimmt. Von besonderer Bedeutung ist dabei der Off-Shore-Windpark „Alpha Ventus“, in dem zwölf Anlagen der 5-MW-Klasse installiert werden.

**Ziel:** Durch die Integration unterschiedlicher Ressourcen zur Netzanbindung sind die durch die Windfluktuationen entstehenden Nachteile in der Belastung und Ausnutzung des Netzes durch eine Vergleichmäßigung des Energieangebotes bereits an der Energiequelle zu beseitigen. Dadurch wird eine gute Ausnutzung der elektrischen Übertragungsleitung gewährleistet (Bild 1).

Das Clausthaler Konzept sieht vor, dass die Schwierigkeiten für einen Offshore-Windpark, wie die tages- und jahreszeitlichen Schwankungen der Windenergie und folglich die Vorhaltung der Reserven für den Netzbetrieb hinsichtlich Frequenz- und Spannungshaltung (Vorrangregelung), gelöst werden. Mit einem integrierten Einsatz von Windkraft, Kavernenbau, Gaslagerstätten, Schwachgasverstromung und Gaskraftwerk kann eine regenerative Energieerzeugung offshore erfolgen, so dass das Verbundnetz mit Grundlast von der Nordsee versorgt wird.

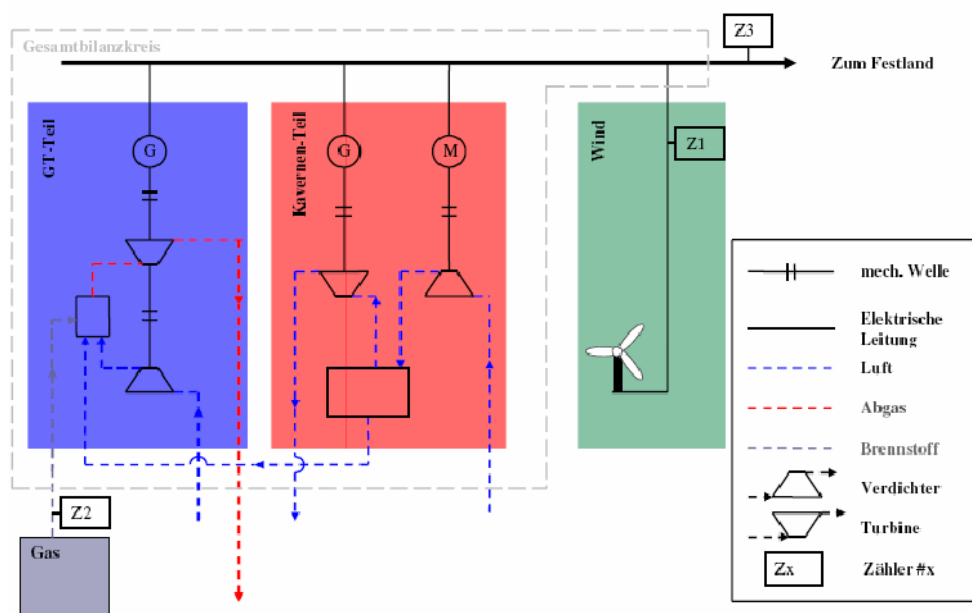


Bild 1: “Clausthaler Konzept” - Integration der fluktuierender Windenergie und unterschiedlicher anderer Ressourcen zur netzverträglichen Anbindung an das elektrische Energieversorgungsnetz - Grundlast aus der Nordsee

Das bedeutet, dass die fluktuierende Offshore-Windenergie-Produktion gleichmäßiger nutzbar wird durch

- Bereitstellung einer windunabhängigen Energiequelle durch Verstromung von Erdgas, um bei fehlendem Wind weiterhin Energie erzeugen zu können und/oder
- Absorption von Überschuss-Leistung in Zeiten starken Windaufkommens bei gleichzeitig geringer Last durch Druckluftspeicher-Gasturbinen-Kraftwerke und die zeitversetzte Erzeugung bei hoher Nachfrage.

Langfristig soll in einem Verbund aus Windenergie, Druckluftkavernen und Schwachgasvorkommen im deutschen Nordseebereich ein abgestimmtes Konzept unterschiedlicher Ressourcen zur Netzintegration von Offshore-Windkraftleistung entstehen.



**Projekt:** Netzintegration von Offshore-Großwindanlagen  
- Grundlast von der Nordsee -

**Stand der Technik:** Die Einzelkomponenten innerhalb des Clausthaler Konzeptes (Offshore-Windpark, Untertagedruckluftspeicher, Schwachgas) können an unterschiedlichen Orten (Offshore/Onshore) betrieben werden und müssen auf elektrischem Wege (Drehstrom/HGÜ) gekoppelt werden um eine Netzintegration zu ermöglichen. Dabei ist die Größe/Leistung von Windpark, Gaskraftwerk, Speicher und Transport-Leitung besonders zu berücksichtigen.

**Lösungsweg:** Zunächst wurde am Institut ein Modell für einen Offshore-Windenergiepark zum Zwecke der Auslegung und Dimensionierung eines Verbundkraftwerks nach dem „Clausthaler Konzept“ entwickelt. Dabei wird anhand des Modells die abgegebene elektrische Augenblicks-Wirkleistung in Abhängigkeit von Windgeschwindigkeit simuliert (Bild 2).

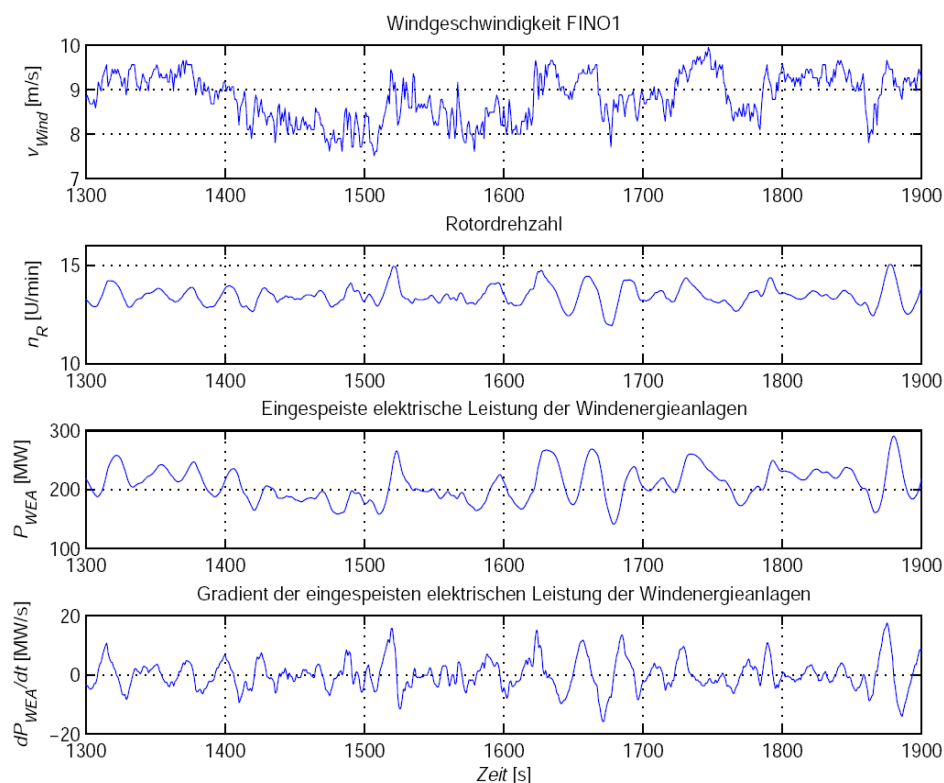


Bild 2: Ausschnitt der Zeitreihe der elektrischen Leistung in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit - Ergebnisse der Simulation bei den Parametern  $T = 600$  s,  $T_{ERS} = 2$  s,  $T_n = 8$  s;  $n_R = 13,45 \text{ min}^{-1}$ ,  $n_{R,Min} = 12 \text{ min}^{-1}$ ;  $n_{R,Max} = 15 \text{ min}^{-1}$

Einen weiteren Schwerpunkt bilden die Anschlusskonzepte des Hybridkraftwerks an das Binnennetz. Während beim Windpark „Alpha Ventus“ ein 110-kV-Drehstromsystem genügt, werden bei größeren Offshore-Windparks auf Gleichspannung basierte Systeme bevorzugt. Dabei ist zu beachten, dass derzeit unterschiedliche Regelungen für den Anschluss der Windparks und anderer Komponenten gelten. Die Rahmenbedingungen sind derzeit nur bedingt geeignet, derartig innovative Lösungen zu fördern.

Im Rahmen des Projekts sind über den Betrieb als Gundlastkraftwerk hinaus, wo eine konstante Leistung je Viertelstunde abgegeben wird, auch andere Betriebsarten abzugrenzen. So kann neben einer konstanten Abgabe einer vorgegebenen Augenblickswirkleistung – wie es im wesentlich kleineren Maßstab im „Energiepark Clausthal“ in einem Verbund aus mehreren kleinen dezentralen Erzeugern und Batteriespeicher im Rahmen der Teilprojekte 3 und 9 des Forschungsverbundes Energie Niedersachsen erprobt wird – auch die sogenannte „Windstromveredlung“ gefahren werden. Dabei wird mit Hilfe von Gas- und Speicherkraftwerk die fluktuierende Windstromerzeugung so ergänzt, dass sich in der Summe ein marktkonformes Angebot ergibt. Gleichzeitig kann durch den Einsatz des Speichers die notwendige Übertragungskapazität des Netzanschlusses der Windparks gesenkt werden (Bild 3).

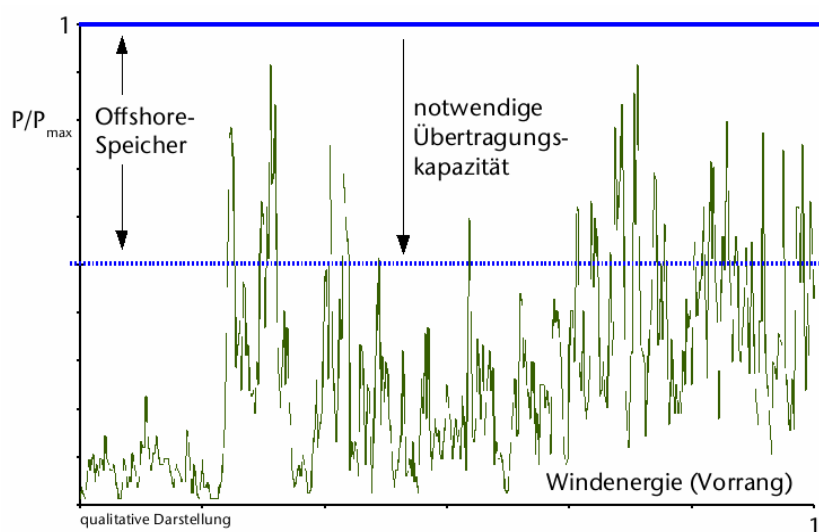


Bild 3: qualitative Darstellung der notwendigen Übertragungskapazität bei Einsatz des Druckluftspeichers als Zwischenspeicher für „Windenergie“

<b>Projekt:</b>	Netzintegration von Offshore-Großwindanlagen - Grundlast von der Nordsee -
<b>Projektstand:</b>	Das Projekt ist abgeschlossen. Der Abschlussbericht ist verfügbar TU Clausthal (Herausgeber); Dietz Peter (Projektleitung): Netzin- tegration von Offshore-Großwindanlagen – Grundlast von der Nord- see. Papierflieger, Clausthal-Zellerfeld, 2008.
<b>Projektpartner:</b>	Arbeitsgemeinschaft Windenergie, bestehend aus <ul style="list-style-type: none"><li>● Institut für Aufbereitung und Deponietechnik (IFA)</li><li>● Institut für Erdöl- Erdgastechnik (ITE)</li><li>● Institut für Energieverfahrenstechnik und Brennstofftechnik (IEVB)</li><li>● Institut für Elektrische Energietechnik (IEE)</li><li>● Institut für Maschinenwesen (IMW)</li><li>● Institut für Wirtschaftswissenschaft (WiWi)</li></ul>
<b>Förderung:</b>	Das Projekt wird gefördert durch <ul style="list-style-type: none"><li>● Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin</li><li>● EWE AG, Oldenburg</li></ul>
<b>Bearbeiter:</b>	Dipl.-Wirtsch.-Ing. Marko Schmidt (Tel.: 05323/3816-8059) marko.schmidt@efzn.de
<b>Projektleiter:</b>	Prof. Dr. Hans-Peter Beck

**IEE**

---

<b>Projekt:</b>	FEN, TP 10 Erprobung von innovativen Umrichtersystemen in Arealnetzen
<hr/>	
<b>Problem:</b>	<p>Der Schwerpunkt liegt auf der Untersuchung des Inselbetriebes unter dem Einfluss dezentraler Energieerzeuger. Der Inselbetrieb wird unter bestimmten Bedingungen im Energiepark Clausthal (CUTEC-Institut) realisiert. Der Energiekonditionierer, bestehend aus einer Batterie und einem Stromrichter, übernimmt die Netzführung. Zwei Blockheizkraftwerke laufen im Parallelbetrieb mit, ein Biodiesel-BHKW mit 4-Takt TDI-Motor und einem Biogas-BHKW mit 4-Takt Ottomotor. Die Blockheizkraftwerke sind mit Asynchrongeneratoren ausgestattet.</p> <p>Das Zusammenlaufen verursacht einen starken Flicker in der Netzspannung mit einer dominierenden Frequenz von 8 Hz. Die Störungen, die aus dem Verbrennungsablauf stammen, sind auch stark ausgeprägt (siehe Bild 1 und 2). Der Dauerbetrieb ist in dieser Konfiguration jedoch nicht möglich, da nach einer bestimmten Zeit der Schutz ausgelöst wird. Darüber hinaus zeigte sich, dass das Netz in dieser Situation auf die Dauer nicht stabil ist.</p>
<b>Ziel:</b>	Ziel ist die Untersuchung der betriebs- und dämpfenden Eigenschaften „Virtueller Synchronmaschine“ (VISMA) mit Maschinenmodell im Testnetz des Energiepark Clausthal. Stabilitätsuntersuchung des Netzes mit verteilten VISMA-Systemen.
<b>Stand der Technik:</b>	Der Energiekonditionierer und die BHKWs sind einsatzbereit. Die Inbetriebnahme und der Einsatz der VISMA im Energiepark Clausthal mit Maschinenmodell wird vorbereitet (Stand 11/2009).
<b>Lösungsweg:</b>	Einsatz der VISMA mit Kompensationsmodell oder mit Maschinenmodell.
<b>Projektstand:</b>	Die Fortsetzung des Teilprojektes TP 9 wurde genehmigt. Das nächste Fortsetzungsteilprojekt TP 10 wurde am 01.04.09 gestartet. Die VISMA mit Kompensationsmodell wurde im Energiepark Clausthal erprobt (siehe Bild 3). Die dämpfenden Eigenschaften der VISMA wurden mit Hilfe der Simulation in MATLAB-Simulink, NEPLAN untersucht.

---

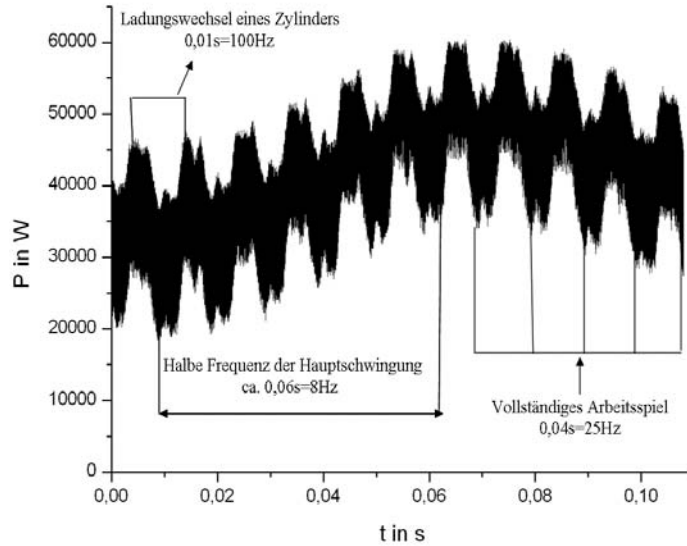


Bild 1: gemessener Wirkleistungsverlauf der Ausgangsleistung ( $\approx 30 \text{ kW}$ ) des Biodiesel-BHKWs ohne VISMA

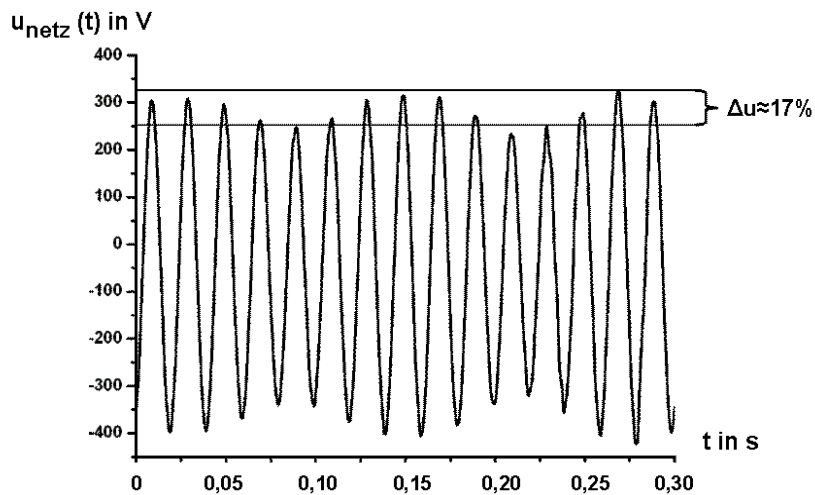


Bild: gemessene Inselnetzspannung bei einer Wirkleistung von  $\approx 30 \text{ kW}$  des Biodiesel-BHKW ohne VISMA

**Projekt:** FEN, TP 10 Erprobung von innovativen Umrichtersystemen in Arealnetzen

---

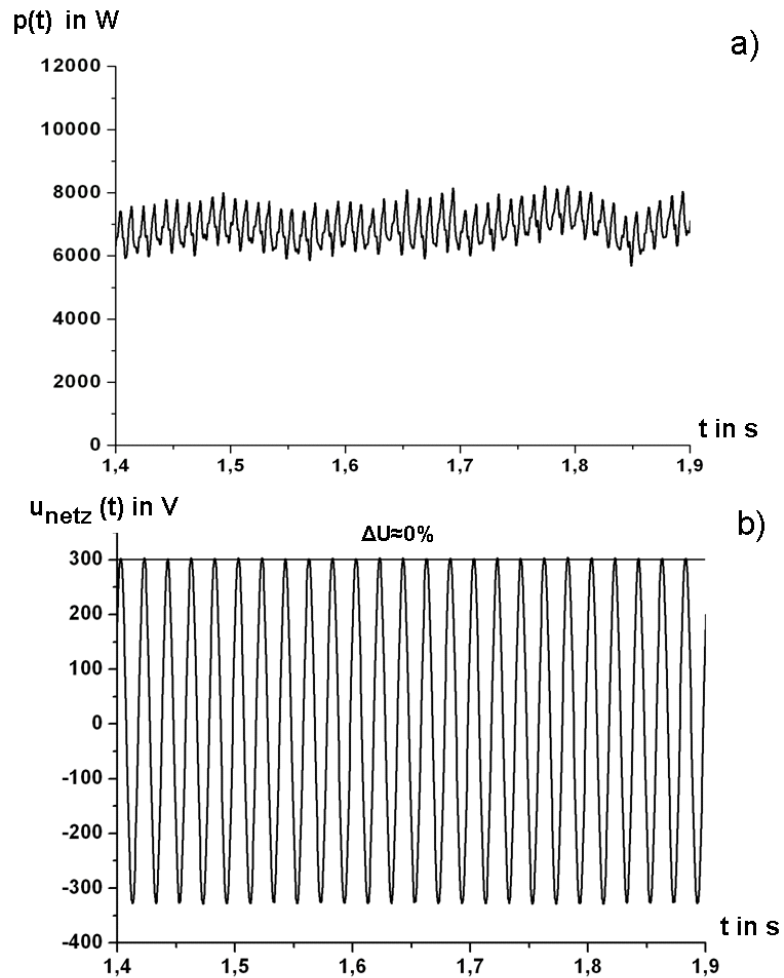


Bild 3: gemessener Wirkleistungsverlauf des Biodiesel-BHKWs (a) und die Netzspannung (b) mit der VISMA (Kompensationsmodell)

**Förderung:** Forschungsverbund Energie Niedersachsen (FEN)

**Bearbeiter:** Dr.-Ing. Oleg Osika (Tel.: 72-2593)  
 oleg.osika@tu-clausthal.de

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

**IEE**



**Projekt:** Ausregelung fluktuierender Einspeisung regenerativer Energien durch dezentrale Kraft-Wärme-Kopplung

---

**Problem:** In Zukunft wird ein verstärkter Anteil erneuerbarer Energien (EE) in unserer Stromversorgung erwartet. Diese zeichnen sich im Falle der Wind- und Sonnenenergie dadurch aus, dass keine Speicherung der Primärenergie vor Wandlung möglich ist. Damit sind EE zwar prognostizierbar, aber nur eingeschränkt steuerbar.

Der konventionelle Kraftwerkspark und steuerbare, regenerative Einspeisungen durch z. B. Biogasanlagen oder wärmegepufferte solarthermische Kraftwerke werden benötigt, um die Stochastik des Verbrauches dem Einspeiseverhalten nicht-planbarer EE-Quellen anzupassen. Virtuelle Bilanzkreise aus Quellen, Senken und Speichern helfen dabei, das Elektroenergiesystem bereits auf Verteilnetzebenen in Balance zu halten.

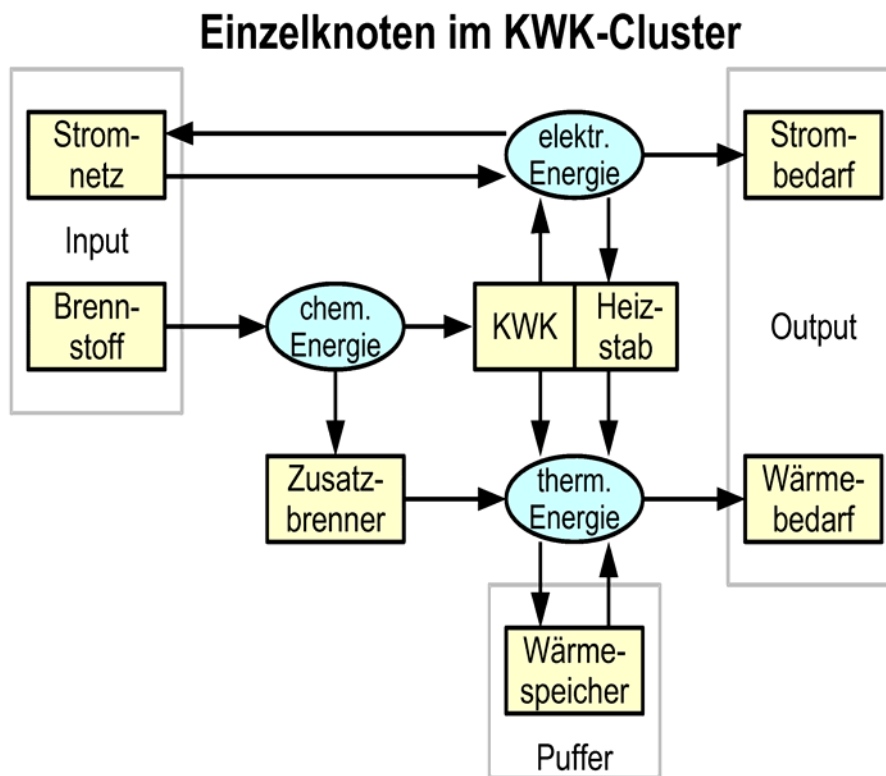
**Ziel:** Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchungen der Möglichkeiten, welche die dezentrale Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) zum Ausgleich fluktuierender Leistungen bietet, wo die wirtschaftlichen Grenzen ihres Einsatzes liegen und inwieweit ein Mehrwert durch das Erbringen von Systemdienstleistungen erbracht werden kann. Die Fähigkeit der Kuppelproduktion von Strom und Wärme zur funktionalen Stromspeicherung ist zu bewerten.

**Stand der Technik:** Kleine KWK-Anlagen werden als Blockheizkraftwerke, die ein Nahwärmenetz oder objektintegriert einzelne Gebäude versorgen, meist wärmegeführt betrieben. Damit passt sich der Betriebszustand dem aktuellen Wärmebedarf an. Mit dem Hinzufügen eines Wärmespeichers und dem Ausnutzen der thermischen Trägheit des Wärmeverteilsnetzes sowie des Versorgungsobjektes kann von dieser Fahrweise temporär abgewichen werden. Im strom- oder auch netzgeführten und jeweils wärme gedeckelten Betrieb wird die zeitliche Produktion des höherwertigen Gutes Strom optimiert.

In Dänemark werden über 50 % des Stromes in KWK erzeugt, gleichzeitig kommt rund 20 % des Stromes aus Windkraft. Das dänische MV-Cell-Konzept schlägt vor. Die Fluktuationen aus der Windkraft wenn möglich schon auf Verteilnetzebene in Mittelspannungszellen und nicht nur zentral im Transportnetz auszuregeln. Dabei spielen Blockheizkraftwerke (BHKW) eine wesentliche Rolle,

---

die nach “dänischem Design” mit großem Wärmepuffer ausgelegt sind und von der Leistung bis zu 2/3 der Wärmelast tragen können. Des Weiteren wird überlegt, die Wandelung von Strom in Wärme zu Starkwindzeiten zuzulassen.



### Lösungsweg:

Zielführende Optimierungs- und Kommunikationsstrategien unterscheiden sich in Abhängigkeit der Anlagengröße. Bei großen BHKW ist eine zentrale Optimierung zweckmäßig, die zwar eine hohe Anforderung an die Kommunikation stellt, aber das globale Optimum genauer trifft. Bei der Mikro-KWK (stromerzeugende Heizungen) ist aus Gründen der Komplexitätsreduktion eine kommunikationsarme Koordination vorzuziehen. Intelligente Anlagen passen auf Basis lokaler Größen und nur wenigen zentralen Signalen ihre Fahrweise an. Der KWK-Cluster wirft auf Eigenschaften von Schwarmintelligenz untersucht. Ein energie-bzw. Ertragsoptimaler Regelungsansatz ist zu erarbeiten.

**Projekt:** Ausregelung fluktuierender Einspeisung regenerativer Energien  
durch dezentrale Kraft-Wärme-Kopplung

---

**Projektstand:** Das Projekt wurde Anfang 2008 gestartet.

**Projektpartner:** Siemens AG, München

**Bearbeiter:** Dipl.-Wi.-Ing. Gunnar Kaestle (Tel.: 72-2572)  
gunnar.kaestle@tu-clausthal.de

**Projektleiter:** Dr.-Ing. Ernst-August Wehrmann (Tel.: 72-2595)

***IEE***

**Projekt:** Innovationen mit Normen und Standards:  
Dezentrale Netzstützung

---

**Problem:** Der Anteil dezentraler Stromeinspeisungen nimmt durch die verstärkte Nutzung der Windenergie und der Photovoltaik sowie den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung zu. Zur Garantie eines stabilen Netzbetriebes wurden bereits die Richtlinien für den Parallelbetrieb dieser Erzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz angepasst. Eine Ausdehnung dieser Regeln auf die Niederspannungsebene, über die in Deutschland ca. 50 % des Stromes abgenommen wird, steht bevor. Dezentrale Stromerzeuger werden in Zukunft einen Beitrag zu den sog. Systemdienstleistungen erbringen müssen, wie z. B. der Frequenz- und Spannungshaltung, damit zentrale Kraftwerksleistung in all ihren Facetten substituiert werden kann.

Neben Erzeugungsanlagen können prinzipiell auch Verbraucher Systemdienstleistungen erbringen. Einer Teilnahme am Markt für Regelleistung stehen jedoch die hohen spezifischen Transaktionskosten entgegen. Es fehlt noch der Anreiz, Geräte mit der Funktionalität zur Erbringung von Systemdienstleistung auszustatten.

**Ziel:** Ziel des INS-Projekts “Dezentrale Netzstützung” ist es , über die Normungsarbeit die wirtschaftliche Integration auch von kleinsten steuerbaren Leistungen sowohl auf Erzeuger- als auch Verbraucherseite zu vereinfachen. Über ein optionales Systemverhalten mit einem standardisierten Katalog von Eigenschaften werden Geschäftsmodelle mit minimierten Transaktionskosten ermöglicht. Es ist denkbar, dass über einen statistischen Ansatz und pauschale Vergütungen eine Marktdurchdringung der selbstorganisierenden Netzstützung beschleunigt wird.

**Stand der Technik:** Die Primärregelung der Wirk- und Blindleistung bei Großkraftwerken erfolgt über sogenannte Frequenz- bzw. Spannungsstatiken. Dies sind lineare Kennlinien, anhand derer über lokale Messung von Frequenz und Spannung am Netzanschlusspunkt die Wirk- und Blindleistung eingestellt wird.

Diese Systematik wurde bereits auf Geräte im Niederspannungsnetz übertragen, erste Blockheizkraftwerke und Batteriewechselrichter für Inselnetzanwendungen sind kommerziell erhältlich. Im Inselnetz sind diese Funktionen unabdingbar - im größeren Verbundnetz nützlich,

---

da hier zentral erbrachte Systemdienstleistungen substituiert bzw. ergänzt werden können.

Weiterhin werden dezentrale Einspeisungen meist über Wechselrichter realisiert. Ein Wechselrichter als Schnittstelle zum Netz hat den Vorteil, dass er hochdynamisch Ströme einprägen kann. So sind aktive Filter immer dort im Einsatz, wo Oberschwingungen und Unsymmetrien die Netzqualität beeinträchtigen. Des Weiteren kann man Wechselrichtern auch das Verhalten einer Synchronmaschine aufprägen (vgl. mit dem VISMA- und VSYNC-Ansatz). Alle oben genannten Funktionalitäten können dabei helfen, die Stabilität des elektrischen Netzes zu stützen und die Qualität der Stromversorgung zu verbessern.

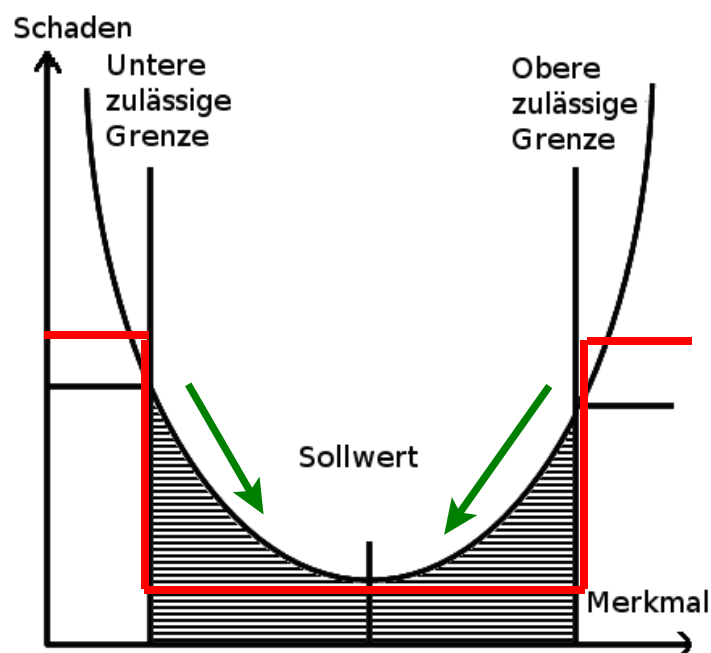


Bild 1: parabelförmige Qualitätsfunktion nach Taguchi, in rot die klassische Einteilung des gültigen / nicht-zulässigen Bereichs mit unstetigem Übergang

**Lösungsweg:** Sensibilisierung der möglichen Akteure für die oben genannten Handlungsoptionen und Erarbeitung einer Spezifikation für den Katalog optionaler Eigenschaften netzfreundlicher Niederspannungsgeräte.

**Projekt:** Innovationen mit Normen und Standards:  
Dezentrale Netzstützung

---

**Projektstand:** Das Projekt wurde im Frühjahr 2009 gestartet. Neben der Teilnahme an DKE-Fachgremien wurde Ende Oktober ein Workshop zur Dezentralen Netzstützung am EFZN (Energie-Forschungszentrum Niedersachsen) in Goslar veranstaltet.

**Projektpartner:** DKE im DIN und VDE, Frankfurt

**Bearbeiter:** Dipl.-Wi.-Ing. Gunnar Kaestle (Tel.: 72-2572)  
gunnar.kaestle@tu-clausthal.de

**Projektleiter:** Dr.-Ing. Ernst-August Wehrmann (Tel.: 72-2595)

**IEE**



**Projekt:** Effiziente Integration dezentraler Erzeuger in Verteilnetze

---

**Problem:** Mit der fortschreitenden Liberalisierung der Strom- und Gasnetze, der deutlichen Erhöhung des Anteils dezentral und regenerativ erzeugter Energie sowie des voranschreitenden technischen Fortschritts hinsichtlich neuartiger Energieerzeugungsanlagen sind erhebliche Anforderungen an die bestehenden und historisch gewachsenen elektrischen Netze verbunden. Der vormals unidirektionale Lastfluss vom Energieerzeuger zum Endkunden, welcher eine gute Abschätzung des Netzzustandes mit einer geringen Ausstattung an Messtechnik erlaubte, ist damit nicht mehr gegeben. Der nunmehr zunehmende bidirektionale Lastfluss stellt insbesondere die Netzbetreiber vor neue Herausforderungen, um den von ihnen verlangten stabilen und sicheren Betrieb der Versorgungsnetze bei einem weiter steigenden Anteil der dezentralen Erzeugungskapazität zu garantieren. Ein Beispiel der aktuell anzutreffenden Belastungssituationen zeigt Bild 1. Dieser Strukturwandel ist politisch gewollt und wird insbesondere durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) und das Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz (KWKG) gefördert. Trotz der geänderten Ausgangslage muss sich dieser Betriebszustand im Einklang mit den Anforderungen der geltenden Normen und technischen Regelwerke befinden, insbesondere mit den Anforderungen der DIN EN 50160. Die Integration von dezentralen Erzeugungsanlagen in Verbindung mit den genormten Ansprüchen an die Versorgungsqualität zwingt die Netzbetreiber immer häufiger zu einem massiven Netzausbau mit entsprechend hohen Investitionskosten.

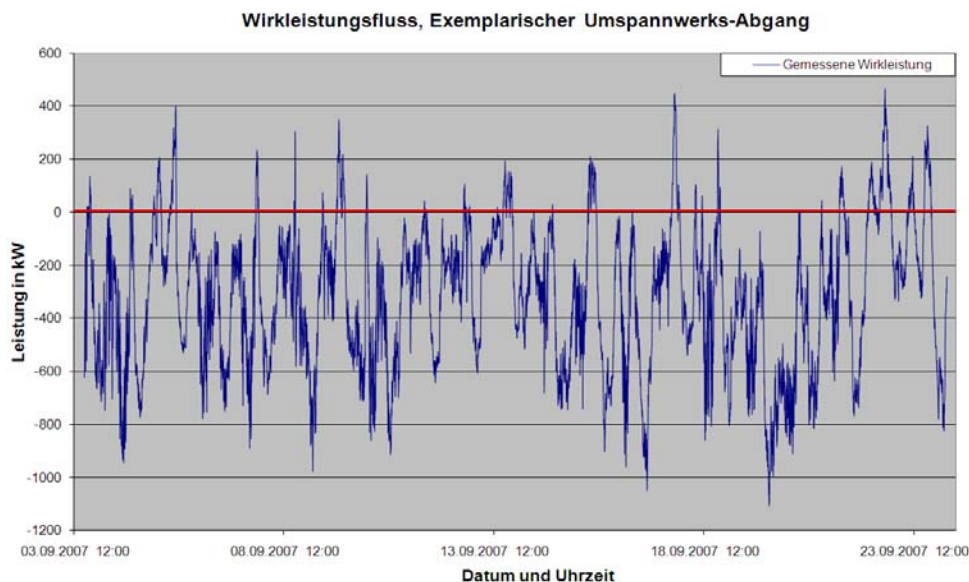


Bild 1: Gemessener Wirkleistungsfluss eines exemplarischen Umspannwerks-Abgangs (20 kV) mit hoher dezentraler Einspeisung (negative Leistung bedeutet Rückspeisung)

**Ziel:**

Das Forschungsvorhaben soll neuartige Integrationsmöglichkeiten aufzeigen bzw. bereits bekannte aber nicht angewendete Methoden hinsichtlich ihrer technischen Durchführbarkeit und ihrer Wirtschaftlichkeit überprüfen und somit dem Netzbetreiber Alternativen zu einem traditionellen Netzausbau anbieten. Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es, konkrete Hinweise und Hilfestellungen für die Planungsgrundsätze der Netzbetreiber und für den Umgang mit dezentralen Erzeugungsanlagen zu erarbeiten und hierdurch eine effizientere Einbindung der betrachteten Anlagen zu ermöglichen.

**Stand der Technik:**

Dezentrale Erzeugungsanlagen werden als negative Lasten angenommen. Sowohl Verbraucher als auch Erzeugungseinheiten werden im Normalbetrieb als nicht beeinflussbar und damit als passive Elemente des Energiesystems angenommen. Durch den Neubau von Leitungen bzw. durch die Verstärkung vorhandener Leitungen wird die Kurzschlussleistung des Netzes an den entsprechenden Stellen erhöht und damit der zu erwartende Spannungsabfall (-hub) durch einen Verbraucher (Erzeuger) auf erlaubte Werte begrenzt. Zur Bestim-

**Projekt:** Effiziente Integration dezentraler Erzeuger in Verteilnetze

---

mung des notwendigen Netzausbaus werden hauptsächlich zwei Worst-Case-Berechnungen (maximale Last ohne dezentrale Energieerzeugung, minimale Last mit maximaler dezentraler Erzeugung) durchgeführt. Verteilnetze sind mit einer geringen Messinfrastruktur ausgestattet und werden daher bezgl. dezentraler Spannungs- und Stromwerte „blind“ betrieben.

**Lösungsweg:** Zu Beginn ist eine messtechnische Überprüfung der Spannungs- und Belastungsverhältnisse in den bestehenden Netzen durchzuführen. Zur Optimierung der Messinfrastruktur und zur Vervollständigung der Messdaten sollen modernste Simulationstools und Berechnungsmodelle Anwendung finden. Bereits im Vorfeld innerhalb der E.ON Avacon und der TU Clausthal durchgeführte Arbeiten können als Grundlage herangezogen werden und sollen mit in die Überlegungen und Arbeiten einfließen. Alle Untersuchungen werden auf Basis von quasistationären Lastgangrechnungen, welche auf gemessenen 1-min-Mittelwerten und realen Kundendaten basieren, durchgeführt. Besondere Bedeutung haben die Inhalte der „Richtlinie für Anschluss und Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz“ und die „Richtlinie für Anschluss und Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz“, welche sich derzeit in der Überarbeitung befinden. Eine Bewertung der Auswirkungen und Möglichkeiten, die sich aus der Überarbeitung ergeben, insbesondere der sich abzeichnenden Etablierung einer aktiven Spannungsbeeinflussung durch gezielte Blindleistungsbereitstellung der dezentralen Erzeugungsanlagen, sollen zentrale Elemente dieses Projektes bilden.

Die gegenseitige Beeinflussung der untersuchten Spannungsebenen muss dabei immer mit beachtet werden. Die notwendigen Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen, welche eine Bewertung der Verlustenergiekosten enthalten, finden unter Berücksichtigung der geänderten Randbedingungen eines regulierten Strommarktes statt. Abschließend sind nach Möglichkeit die theoretisch gewonnenen Erkenntnisse praktisch durch weitere Messungen in bestehenden Netzen zu belegen.

**Projektstand:** Für die messtechnische Überprüfung der Spannungs- und Belastungsverhältnisse wurde zunächst ein repräsentatives Netz

---

ausgewählt. Dabei zeigte sich, dass keines der potenziellen Verteilnetze der E.ON Avacon eine ausreichende Messinfrastruktur für weitergehende Untersuchungen aufwies. Aus diesem Grund wurde in enger Zusammenarbeit mit dem Projektpartner ein umfangreiches Messkonzept entwickelt. Nach theoretischen Überlegungen hinsichtlich der optimalen Messstellenanordnung wurde diese auf ihre praktische Durchführbarkeit hin untersucht und dabei technischen und wirtschaftlichen Restriktionen unterworfen. In diesem Zusammenhang wurde ebenfalls die Möglichkeit der Verwendung bestehender Messungen, welche für Schutzzwecke installiert sind, betrachtet und die erzielbaren Genauigkeiten sowie notwendige Parameterumstellungen ermittelt. Neben dieser Erweiterung der bestehenden Messpunkte werden zusätzliche Messpunkte im Netz installiert. Alle Punkte werden fernauslesbar ausgeführt, sodass die Messwerte online im Leitsystem der E.ON Avacon zur Verfügung stehen und dort zusätzlich zur Optimierung der Betriebsführung beitragen können. Zur Realisierung des Messaufbaus, welcher in Bild 2 zu erkennen ist, investiert der Projektpartner über 100 T€.

Parallel zu diesen Arbeiten wird die Last- und Erzeugungssituation im betrachteten Netzgebiet betrachtet. Hierfür werden zunächst die Kundenstruktur und alle Erzeugungsanlagen ermittelt und anschließend mit Hilfe von einer am IEE entwickelten Lastverteilungssoftware und gemessener Lastgänge den realen Verhältnissen angepasst. Des Weiteren wurde die Netztopologie in einer geeigneten Simulationssoftware nachgebildet.

Im Ergebnis kann mit diesen Daten ein reales Abbild der Spannungs- und Belastungsverhältnisse in dem untersuchten Netzgebiet angegeben werden. Im weiteren Verlauf des Projektes müssen diese Daten mit den bisherigen Annahmen der E.ON Avacon abgeglichen und validiert werden. Anschließend können mit Hilfe der Kenntnis eines realen Istzustandes verschiedene Szenarien hinsichtlich der Netzausbau- und / oder Integrationsstrategien erstellt und miteinander verglichen und bewertet werden.

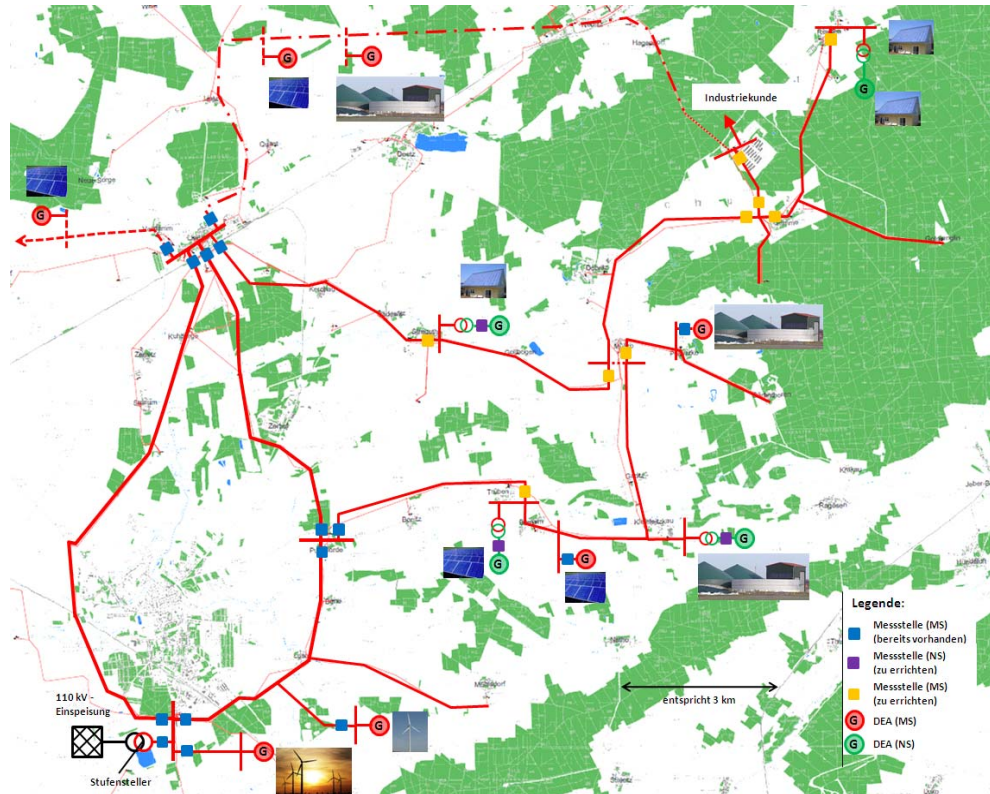


Bild 2: Untersuchungsgegenstand und umgesetztes Messkonzept. Zu erkennen ist ein 20 kV Mittelspannungsring mit zwei abgehenden Strängen und einer Vielzahl dezentraler Erzeugungsanlagen

**Industriepartner:** E.ON Avacon AG

**Bearbeiter:** Dipl.-Ing. Andreas Becker (Tel.: 05321/3816-8058)  
andreas.becker@efzn.de

**Fachliche Begleitung:** Dr.-Ing. Ernst-August Wehrmann (Tel.: 05323/72-2572)

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

***IEE***

**Projekt:** Entwicklung und Erprobung einer Hochtemperaturbrennstoffzelle (SOFC) mit einer parallelen Systemarchitektur

---

**Problem:** Bei den heute bekannten Konzeptionen der SOFC sind vor allem die Probleme der Gasdichtigkeit, der elektrischen Leistungsabnahme durch Degradation und des Temperaturmanagements im System sowie zu hohe System- und Funktionskosten die wesentlichen Technologiebarrieren. In einer Serienschaltung wird die niedrige Einzelzellenspannung auf höhere Werte geführt.

**Ziel:** In diesem Ansatz wird eine parallele Architektur des Einzelstapels verfolgt. Sie erzeugt eine hohe Ausfallsicherheit, außerdem werden die Probleme der Gasdichtigkeit und elektrischen Isolierung der Zellen gegeneinander verringert. Durch den Einsatz von Blechverarbeitungstechnologien kann eine kostengünstige Fertigung erreicht werden.

Die niedrige Ausgangsspannung am Einzelstapel (bei hoher Stromstärke) wird unter modernen Methoden der Leistungselektronik auf ausreichende Endspannung erhöht, um damit Verbraucher speisen zu können.

**Projektstand:** Im Institut für Elektrische Energietechnik wurden verschiedene Konzepte zur Umsetzung der elektrischen Leistung untersucht. Um eine Leistung von 220 W bei einer Eingangsspannung von 2,8 V auf 12 V mit hohem Wirkungsgrad hochsetzen zu können, wurde ein Parallelkonzept umgesetzt, bei dem mehrere einzelne Hochsetzstellereinheiten versetzt angesteuert werden. Bild 1 zeigt das Grundkonzept.

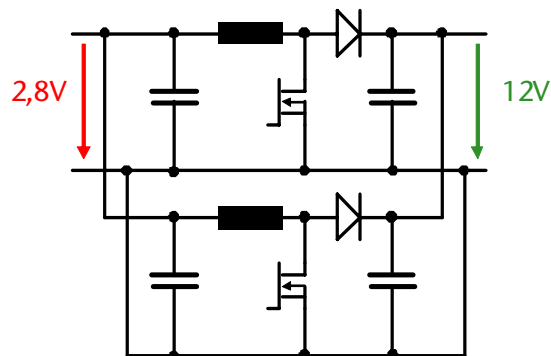


Bild 1: Grundkonzept des einzusetzenden Gleichspannungswandlers. Um den Stromfluss in den einzelnen Bauteilen gering zu halten und zusätzlich eine Vergleichmäßigung des Stromflusses zu erzielen, werden mehrere Hochsetzeleinheiten (im Bild zwei Einheiten gezeigt) parallel geschaltet und versetzt angesteuert

Für erste Tests wurden Doppelwandler entwickelt, die eine Leistung von 50 W übertragen können. Außerdem wurde ein 8-fach Hochsetzsteller entwickelt, der eine Leistung von 200 W bei einem Schaltungswirkungsgrad von 90 % übertragen kann. In allen Schaltungen werden modernste Bauelemente in SMD-Technik eingesetzt.

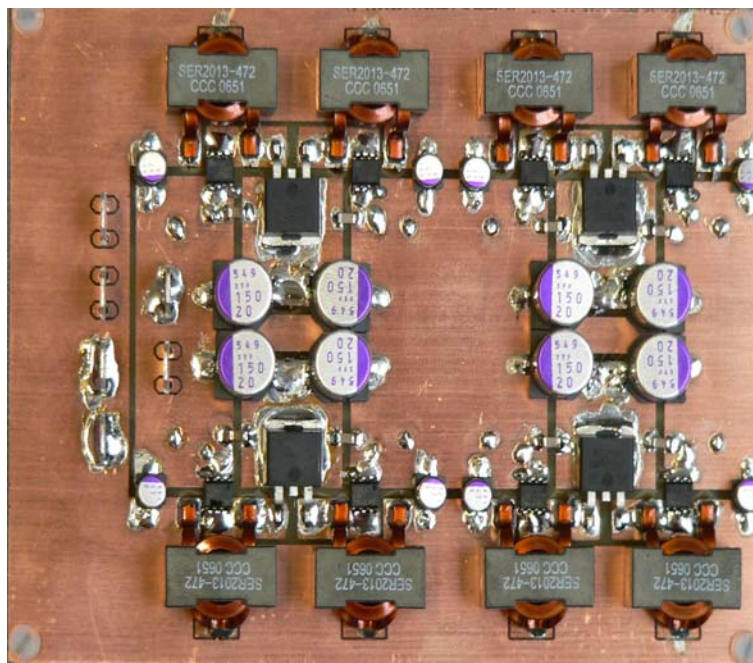


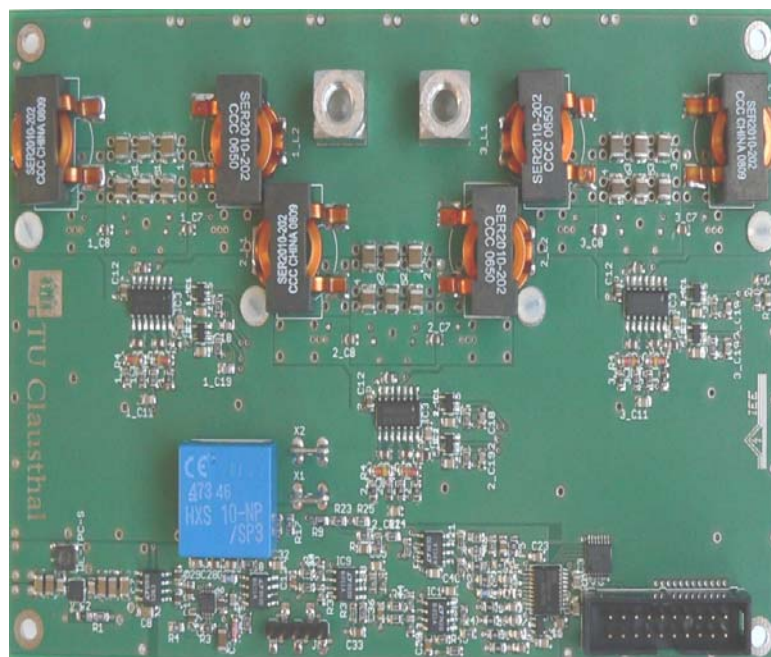
Bild 2: Foto des 8-fach Hochsetzstellers für eine Ausgangsleistung von 200 W. Die Ansteuerung befindet sich auf der Rückseite der Platine.



**Projekt:** Entwicklung und Erprobung einer Hochtemperaturbrennstoffzelle (SOFC) mit einer parallelen Systemarchitektur

---

Weitere Verbesserungen wurden durch Einsatz eines Synchron-MOSFETs anstelle der Diode erreicht. Außerdem wurden moderste MOSFETs mit geringem Innenwiderstand und geringen Schaltverlusten eingesetzt und die Elektrolytkondensatoren durch keramische Kondensatoren ersetzt. Die Verbesserungen führten zu einer Reduzierung des Hochsetzstellers bei gleich bleibender Ausgangsleistung auf 6 parallele Einheiten. Der Wirkungsgrad im Nennbetriebspunkt beträgt 94.0 %.



**Bild 3:** Foto des 6-fach Hochsetzstellers mit angepassten Bauelementen für eine Leistung von 200 W. Die Ansteuerung, Eigenversorgung und Messtechnik befinden sich auf der Oberseite der 4-lagigen Platine. Die Leistungs-MOSFETs befinden sich auf der Rückseite.

**Projektpartner:** CUTEC Institut GmbH, Clausthal-Zellerfeld  
GEA Ecoflex GmbH, Sarstedt

**Bearbeiter:** Dipl.-Ing. Hanno Stagge (Tel.: 72-2594)  
stagge@iee.tu-clausthal.de

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

---

**IEE**

**Projekt:** Entwicklung eines propanbetriebenen SOFC-Brennstoffzellensystems mit partieller Anodenabgas-Rückführung (AAGR)

**Problem:** Das diesem Forschungsantrag zugrunde liegende neuartige Konzept verfolgt einen integrativen Ansatz für das Gesamtsystem Reformierung und Brennstoffzelle, wobei der Wirkungsgrad erheblich verbessert werden soll. Die Zielsetzung wird durch partielle Rückführung des Anodenabgases der Brennstoffzelle erreicht. Dieses Gas verfügt über Wasserdampf und Kohlendioxid, welche effizient für die Reformierung (mit Wasserdampf – steam-reforming bzw. mit Kohlendioxid – dry-reforming) zu neuem Brenngas für die SOFC-Brennstoffzelle eingesetzt werden können. Zugleich kann die thermische Energie des heißen Anodenabgases in direkter Wärmerückführung ergiebig eingekoppelt werden (Bild 1).

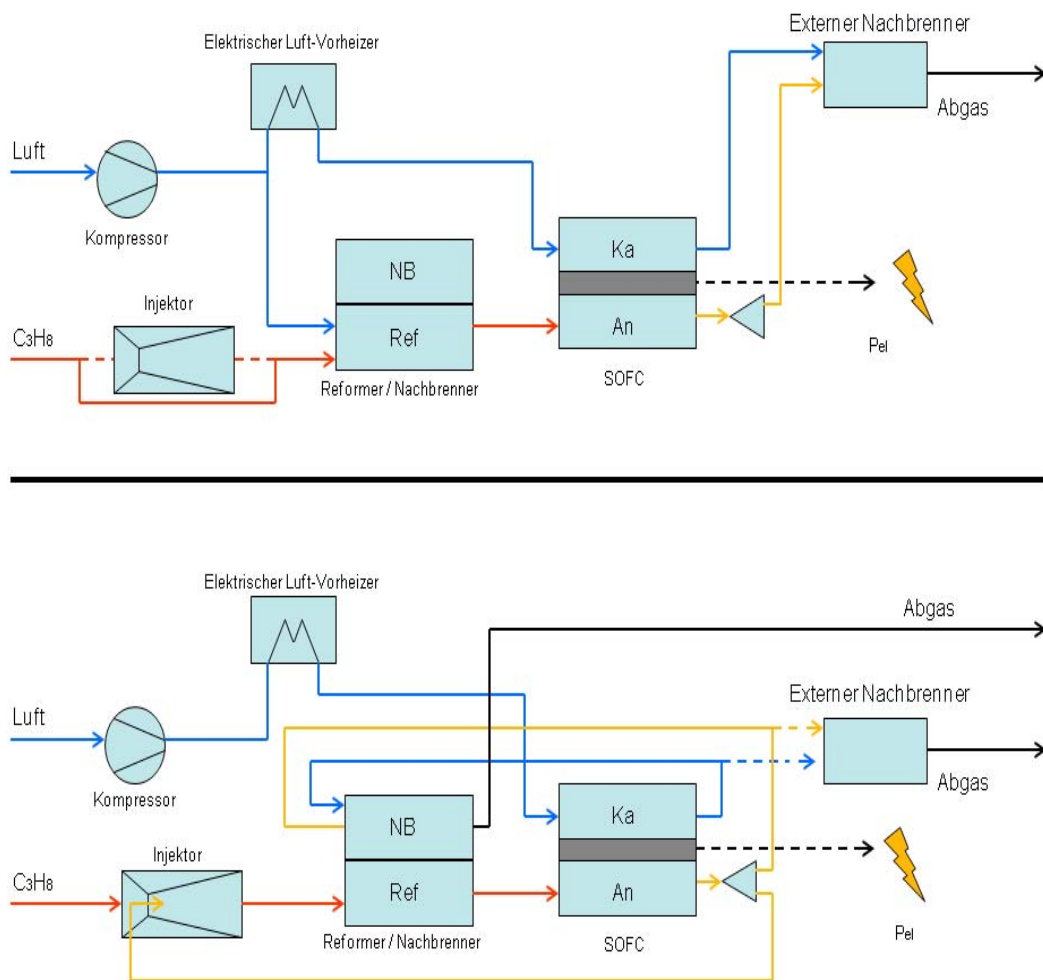


Bild 1: Schematische Flussdarstellung des POX- (oben) und AAGR-Betriebs (unten)

**Ziel:** Das Forschungsprojekt weist einen stark interdisziplinären Charakter auf, in dem verfahrenstechnische Herausforderungen (Anlagen- und Reaktordesign) mit regelungstechnischen Fragestellungen (Gasrückführung, Umschalten vom Anfahrprozess zur AAGR) gekoppelt sind. Das Institut für Elektrische Energietechnik ist in diesem Projekt für die Konzipierung der Regelung des AAGR-Systems und die Umsetzung der Steuerung für den Prüfstand verantwortlich.

**Projektstand:** Die SOFC wird in diesem Projekt durch den hohen Grad an Kopplungen in einem regelungstechnisch komplexen System betrieben. Die Rückführung des Anodenabgases bringt es mit sich, dass der Reformer im AAGR-Betrieb, im Gegensatz zum Anfahrbetrieb mit exotherm arbeitender partieller Oxidation (POX), endotherm arbeitet und Wärmezufuhr aus der Nachbrennkammer benötigt. Gleichzeitig muss zur Erzeugung von Anodenabgas an der SOFC elektrische Leistung abgenommen werden, ohne dass der Stack seinen optimalen Temperaturbereich verlässt. Eine weitere Herausforderung ist der Umschaltbetrieb zwischen POX und AAGR, in dem die Produktion von Anodenabgas gewährleistet sein muss.

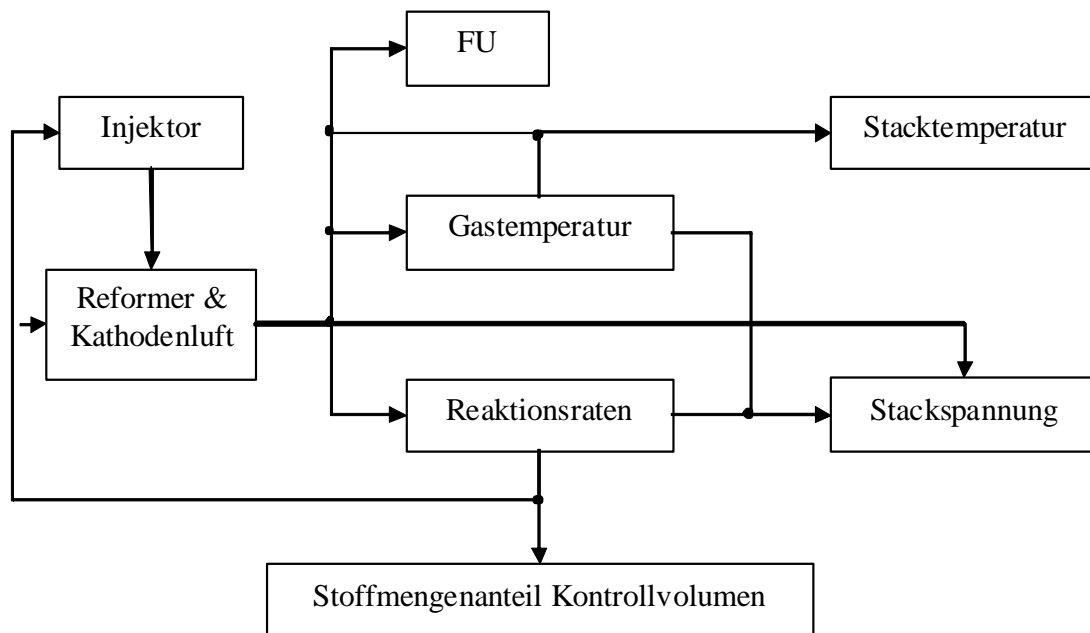


Bild 2: Funktionaler Zusammenhang der Subsysteme in der zeitdiskreten Simulation

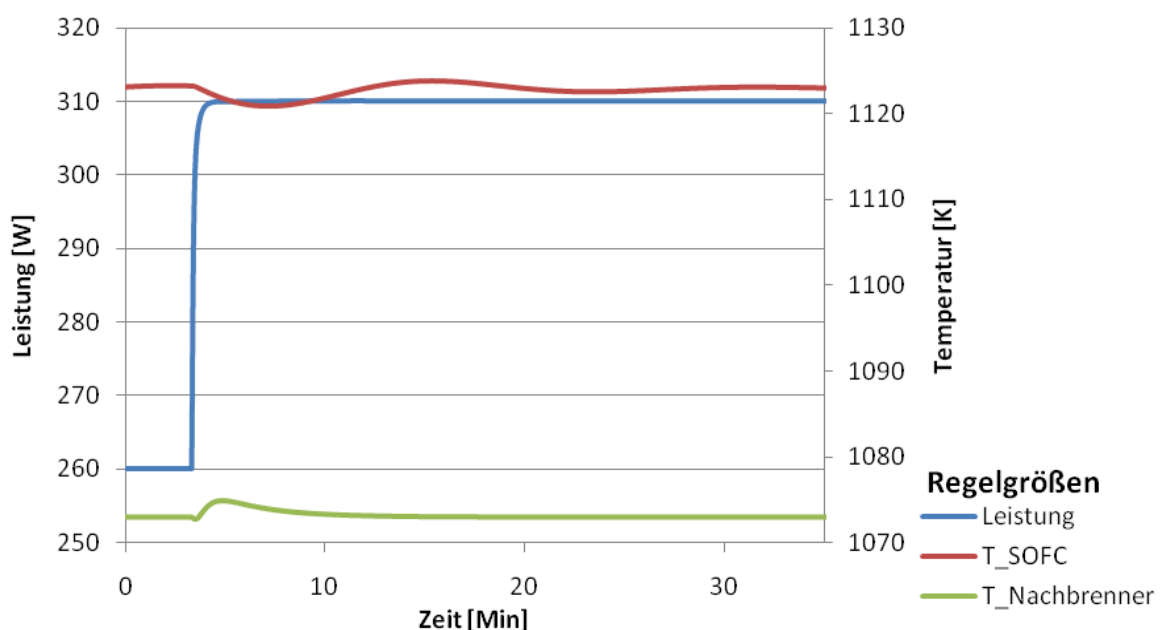
**Projekt:** Entwicklung eines propanbetriebenen SOFC-Brennstoffzellensystems mit partieller Anodenabgas-Rückführung (AAGR)

Um eine möglichst optimale Regelung zu gewährleisten, sind sowohl Ein-, als auch Mehrgrößenregler ausgelegt und miteinander verglichen worden.

Zur Bestimmung der Reglereinstellung wurde mit vorgelagerter Modellbildung statt Einstellregeln gearbeitet, um Stabilität, Sollwertfolge sowie ggf. Übergangsverhalten optimal gestalten zu können. Um das System auf die für den Betrieb wesentlichen Bestandteile zu reduzieren, wird eine auf einfache Rechenoperationen verdichtete zeitdiskrete Simulation gewählt (Bild 2), die sich auch leicht in Hardware-in-the-loop-Systeme übertragen lässt. Zur Überprüfung der Abbildungsqualität diente zum einen das dynamische Prozessmodell des IWBT, zum anderen die exakten Messwerte des Teststands.

Die mathematische Abbildung der Regelstrecke wird über Linearisierung aus der zeitdiskreten Simulation gewonnen.

Bei der Auslegung der Regler sind als Stellgrößen Kathodenluft, Nachbrennerluft und Propanzufuhr, sowie als Regelgrößen Stacktemperatur, Reformertemperatur und elektrische Leistung gewählt worden.



**Bild 3:** Reaktion der Eingrößenregler in der dynamischen Prozesssimulation auf eine Sollwertsteigerung der Leistung im AAGR-Betrieb um 50 W

Die entworfenen Regler zeigen über alle drei Stufen hinweg, POX, Umschaltung und AAGR, stabiles Verhalten. Sollwertfolge konnte mit den Eingrößenreglern und einem über Wenn-Dann-Beziehungen erweiterten Regler erzielt werden, wie Bild 3 beispielhaft zeigt.

Das Projekt ist erfolgreich abgeschlossen.

**Industriektpartner:** CUTEK Institut GmbH, Clausthal-Zellerfeld  
ZBT GmbH, Duisburg

**Bearbeiter:** Dipl.-Ing. Torben Küster (Tel.: 72-2938)  
torben.kuester@tu-clausthal.de

Dipl.-Ing. Hanno Stagge (Tel.: 72-2594)  
stagge@iee.tu-clausthal.de

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

**Projekt:** Dezentrale Netzqualitätsverbesserung in Niederspannungsnetzen mit virtuellen Synchronmaschinen

**Problem:** Die Zukunft des elektrischen Energieversorgungsnetzes ist deutlich geprägt von einem zunehmenden Anteil dezentraler, zum Teil stochastischer, elektrischer Energieerzeugung. Dies hat zur Folge, dass am Niederspannungsnetz neben den Verbrauchern immer mehr dezentrale Erzeuger zu finden sein werden. Diese tragen nach derzeitigem Stand der Technik nicht zur Verbesserung der Spannungsqualität bei, sondern sind darauf ausgelegt die Leistung des Erzeugers mit möglichst hoher Effizienz in das Niederspannungsnetz einzuspeisen und führen dabei unter Umständen auch zu einer weiteren Verzerrung der Netzspannung. Darüber hinaus erfolgt die Auslegung der Niederspannungsnetze in Gebieten geringer Siedlungsdichte vor allem nach dem Aspekt der Spannungshaltung und der Kurzschlussleistung, d.h. die Leitungen sind in Bezug auf die zu übertragende Leistung in vielen Fällen aufgrund der erforderlichen Leitungslängen deutlich größer dimensioniert um die Spannungsqualität an allen Anschlusspunkten zu gewährleisten.

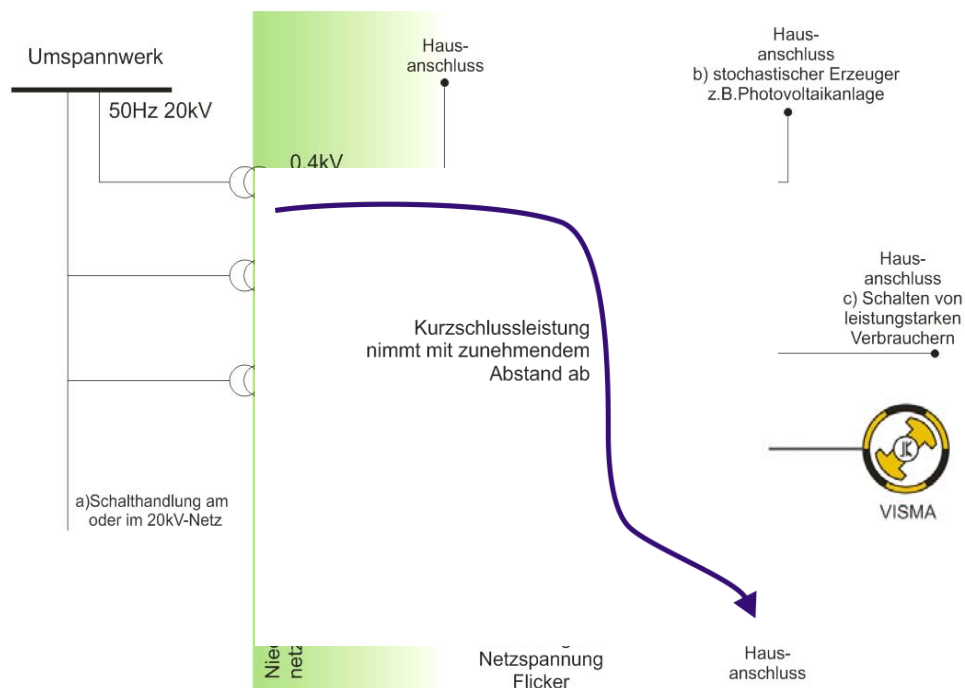


Bild 1: Beispielhafte Netzstruktur eines Niederspannungsnetzes: Mit zunehmender Entfernung vom Ortsnetztransformator ergibt sich eine geringere Kurzschlussleistung

Insbesondere in ländlichen Regionen stehen daher Netzbetreiber vor schwierigen Entscheidungen: Zum einen ist die Spannungsqualität zu gewährleisten, zum anderen entstehen substantielle Investitionskosten bei der Erweiterung der Erdverkabelung. Erschwerend kommen demographische Aspekte hinzu, denn wenn in der näheren Zukunft mit einer negativen Bevölkerungsentwicklung in der betroffenen Region gerechnet werden muss ist eine Investitionsentscheidung noch schwieriger.

Dennoch ist es bisher erforderlich diese Investitionen in Kauf zu nehmen die aufgrund der relativ geringen transportierten Energiemenge und damit geringen durchschnittlichen Leitungsauslastung zwangsläufig überdurchschnittlich hohe Netzkosten für den betrachteten Netzbereich ergeben.

**Ziel:**

Aufgabe dieses Projektes ist es eine Alternative zur bisherigen Ausbaupraxis für schwache Niederspannungsnetzbereiche aufzuzeigen. Der Kernansatz des Projektes „Dezentrale Netzqualitätsverbesserung in Niederspannungsnetzen“ ist die Ausstattung des betroffenen Netzabschnitts mit einem hochdynamischen Speichersystem in einem schnellen umrichterbasierten System.

Am IEE wird zur Regelung von netzgekoppelten Umrichtern dabei seit einiger Zeit das Konzept der Virtuellen Synchronmaschine (VISMA) untersucht, das in diesem Projekt im Rahmen eines abschließenden Feldtest in der spezifischen Anwendung zur direkten Netzqualitätsverbesserung zum Einsatz kommt.

Primäres Ziel ist in betroffenen Gebieten mittels der virtuellen Synchronmaschine geregelt Leistung bereitzustellen um den Effektivwert der Netzspannung zu stabilisieren und bei Inbetriebnahme von Verbrauchern mit hohem Anlaufstrom diesen dezentral bereitzustellen um Flicker zu vermindern. Ferner kann die virtuelle Synchronmaschine Verzerrungen kompensieren und erreicht somit eine Verbesserung der Netzqualität unter den Anforderungen und Rahmenbedingungen der zukünftigen Entwicklung der Niederspannungsnetze.

**Lösungsweg:**

Zunächst wurde an Praxisbeispielen die Anlagenanforderungen ermittelt. Zur lokalen dynamischen Kurzschlussleistungsbereitstellung ergibt sich danach eine vergleichsweise begrenzte Leistungsanforderung an den Umrichter.



**Projekt:** Dezentrale Netzqualitätsverbesserung in Niederspannungsnetzen mit virtuellen Synchronmaschinen

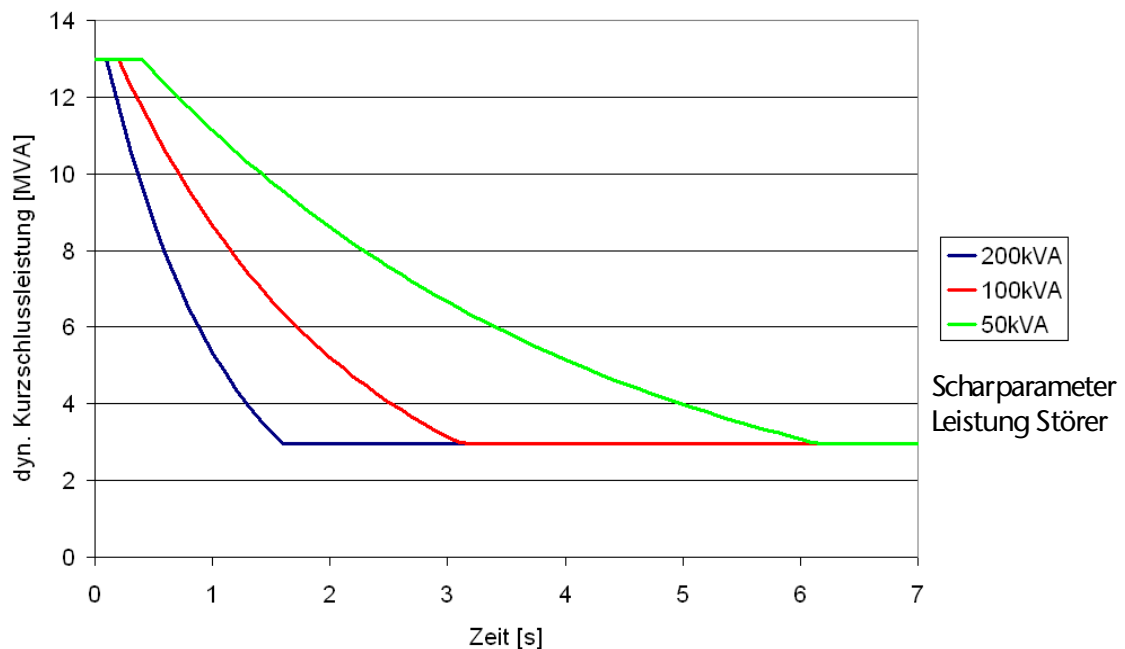


Bild 2: Analyseergebnis der Wirksamkeit der betrachteten Anlage auf Basis des VISMA-Prinzips mit einer Leistung von 200 kVA

Die Ergebnisse zeigen dabei, dass die Kurzschlussleistung ausgehend von einem Niederspannungsnetz mit einer bauseits vorhandenen Kurzschlussleistung von 3 MVA unter Einsatz des VISMA basierten Systems deutlich gesteigert werden kann. Die für z.B. Anlaufvorgänge vorgehaltene dynamische Kurzschlussleistung kann dabei unter Einsatz eines 200 kVA Umrichters um bis zu 10 MVA auf 13 MVA gesteigert werden. Dabei wird diese Leistung natürlich für den Kurzschlussfall selbst nicht bereitgestellt werden, vielmehr ist im Fehlerfall die tatsächlich verfügbare Kurzschlussleistung auf 3,2 MVA begrenzt. Daher ist keine Anpassung der lokalen Schutztechnik und Schaltanlagen nötig, jedoch verhält sich die Netzspannung im normalen Betrieb des Netzes als wenn physikalisch eine Kurzschlussleistung von 13 MVA verfügbar wäre.

**Projektpartner:** Inensus GmbH, Goslar

**Förderung:** in Kooperation mit:



**Bearbeiter:** Dipl.-Ing. Thomas Hesse (Tel.: 72-2939)  
thomas.hesse@tu-clausthal.de

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

**Projekt:** Windgetriebeprüfstand

---

**Problem:** Getriebe in Windkraftanlagen sind nach wie vor für die meisten Ausfälle von Windkraftanlagen verantwortlich. Dabei ist noch immer nicht vollständig geklärt, was die Ursachen für die Schäden sind und wie beziehungsweise ob man diesen konstruktiv vorbeugen kann. Der Industriepartner Hansen Transmissions, ein Hersteller von Windgetrieben, testet derzeit in Forschungsvorhaben Getriebe nur mit statischen Lasten. Tatsächlich wird das Getriebe in Windkraftanlagen aber dynamisch belastet: einerseits ist die Windlast nicht konstant, andererseits können Fehler in der Leistungselektronik oder im Stromnetz zu hochdynamischer Drehmomentbildung im Generator führen. Diese Drehmomente liegen dann auch unmittelbar an der schnell drehenden Welle des Getriebes an. Um die dynamischen Lasten auch im Prüfstandbetrieb nachbilden zu können, entwickelt die Firma Converteam einen neuen 13,2 MW Getriebeprüfstand für Hansen Transmissions. Im Gegensatz zu statischen Tests ergibt sich bei dynamischen Tests das Problem, dass das Getriebespiel (mehrere  $10^\circ$ ) der eingesetzten Planetenradgetriebe in der Regelung nicht vernachlässigt werden kann.

**Ziel:** Aufbau eines 22 kW-Modellgetriebeprüfstands im Institut für Elektrische Energietechnik (IEE) als Entwicklungsplattform für das Regelungssystem. Parallel dazu soll ein Simulink-Modell entstehen, das Regelung, Leistungselektronik und Mechanik des Prüfstandes möglichst exakt wiedergibt. Der Aufbau des Prüfstands und die Modellentwicklung gehen dabei Hand in Hand und werden fortlaufend miteinander abgeglichen. Das Modell soll bei der Inbetriebnahme des 13,2 MW-Prüfstandes mit Getrieben dazu dienen, folgenschwere Fehlbedienungen soweit wie möglich auszuschließen. Bei richtiger Konfiguration muss das Gesamtsystem in der Lage sein, definierte dynamische Lasten unter Berücksichtigung des Getriebespiels einzuregeln und dabei gleichzeitig gegebene Randbedingungen (zum Beispiel maximale Netzleistung) einzuhalten.

**Stand der Technik:** Bislang wurden bei Hansen Transmissions lediglich Prüfstände für statische Lasten aufgebaut, auch seitens Converteam gibt es bislang keine Erfahrungen im Bereich der dynamischen Regelung mit Getriebespielen. Der Kleinleistungsprüfstand am IEE soll allen Projektpartnern helfen, die nötigen Erfahrungen zu sammeln, bevor man

---

diese am 13,2MW Prüfstand einfließen lässt.

**Projektstand:**

Der 22 kW-Prüfstand wurde im IEE aufgebaut und in zwei Phasen in Betrieb genommen. In der ersten Phase wurden die beiden Antriebsmaschinen direkt gekoppelt, um die allgemeine Funktionsfähigkeit des Prüfstands zu zeigen. In der zweiten Phase wurden zwei Getriebe zwischen den Maschinen installiert und die Regelung auf die Getriebe angepasst. Abgeschlossen ist das Projekt, wenn die am Kleinleistungsprüfstand entwickelte Regelung bei Hansen Transmissions installiert und der 13,2 MW-Prüfstand damit in Betrieb genommen wurde.

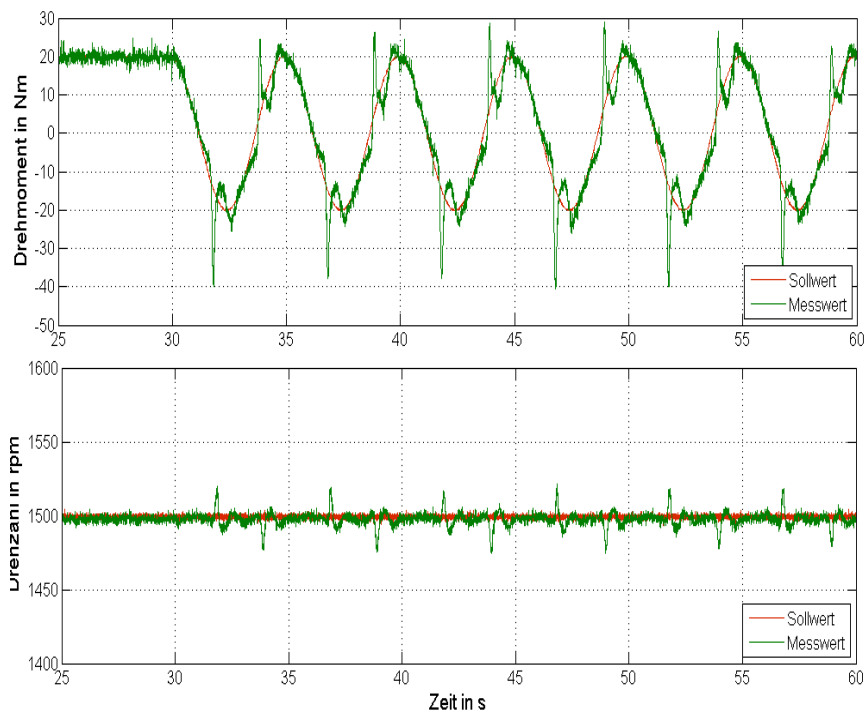


Bild 1: Ein dynamischer Lastfall. Bei konstanter Drehzahl schwankt das Drehmoment mit einer Amplitude von 20 Nm um null. Deutlich erkennbar ist, dass der Regler beim Durchfahren der Getriebe das Drehmoment nicht mehr korrekt einregelt.

**Projekt:** Windgetriebeprüfstand

---



Bild 2: Kleinleistungsprüfstand im IEE, außen sind die Antriebsmaschinen zu sehen in der Mitte zwei Getriebe (Detail links oben), die an ihren langsam drehenden Wellen verbunden sind.

**Projektpartner:** Hansen Tansmissions  
Converteam

**Bearbeiter:** Dipl.-Ing. Markus Stubbe (Tel.: 72-3728)  
markus.stubbe@tu-clausthal.de

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

***IEE***

**Projekt:** Global adaptive model for prediction, characterization and damping of vibrations in hot strip mills (CHATTER)

---

**Problem:** Ein Problem des Kalt- und Warmwalzens ist das Auftreten von selbsterregten Schwingungen. Diese selbsterregten Schwingungen werden beim Kaltwalzen als *Brummer* und beim Warmwalzen als *Rattern* bezeichnet. Sie treten bei verschiedenen Walzgerüstkonstruktionen, z.B. bei Anlagen mit Kammwalzgetriebe und Anlagen mit Zwillingsantrieben auf und beeinflussen die Qualität des Walzgutes nachteilig. So kommt es beim Rattern zu *Rattermarken* auf dem Walzgut. Die Frequenz der Schwingung liegt beim Warmwalzen in einem Band von 30 bis 70 Hz und beim Kaltwalzen zwischen 90 und 250 Hz. Einflußgrößen für diese selbsterregte Schwingung sind die Bandgeschwindigkeit, der Schmierstoff, die Materialbeschaffenheit des Walzguts, unrund geschliffene Walzen und Lagerdefekte.

**Ziel:** Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, ein Modell des Walzgerüsts und des Walzspaltes zu entwickeln, um die Verhältnisse beim Rattern besser zu verstehen und Vorhersagen über die Ratterneigung an realen Anlagen zu machen. Weiterhin soll ein hochdynamisches Stellglied zum Einsatz kommen, mit dem es möglich ist, eine auftretende Schwingung zu unterdrücken.

**Projektstand:** Verschiedene Dämpfungsregler wurden bereits am Prüfstand getestet. Zur Zeit wird ein High-Torque-Motor zum Einbau im Prüfstand vorbereitet. Ein Simulationsmodell wird, welches sowohl die Torsionsschwingung als auch die Vertikalschwingung abbildet wird derzeit mit den Parametern eines realen Walzgerüsts getestet

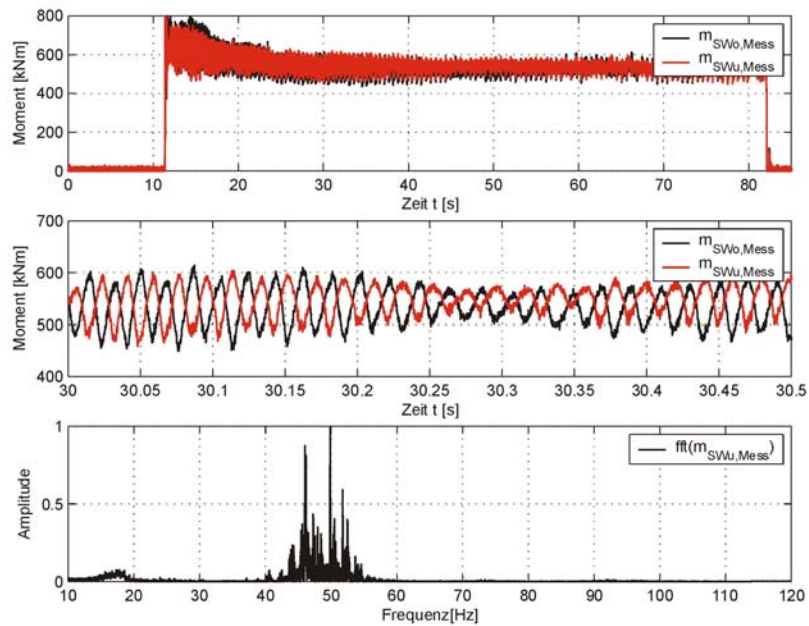


Bild 1: Messung des Ratterphänomens an einem Walzwerktrieb. Dargestellt ist das untere und obere Spindelmoment. Das angeregte Frequenzband liegt zwischen 40 und 60 Hz. (Messung von Geirhofer, R.; Sonderrmann, H.; Nettelbeck, L.; Ungerer, W.: Optimising and monitoring the impact of friction, wear and lubrication in hot rolling. Technical steel research, Final report, EUR 20209 EN, 2002)

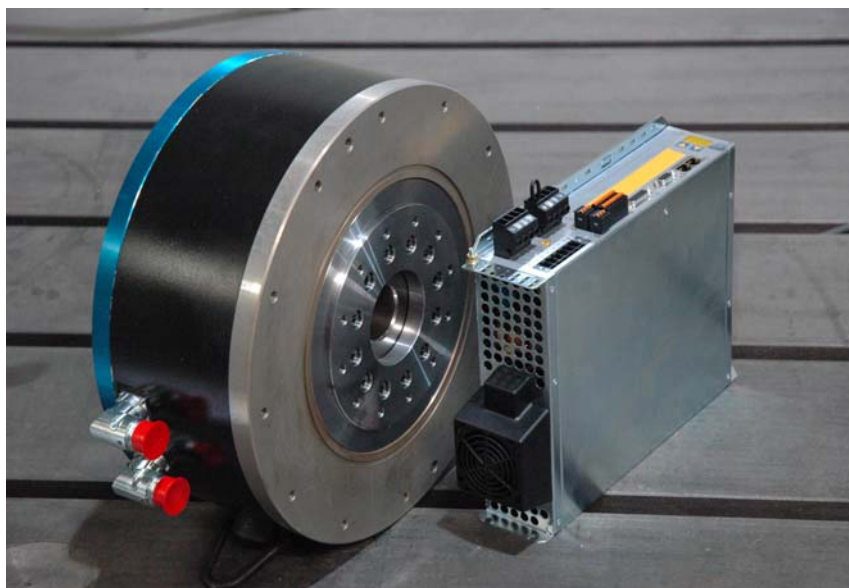


Bild 2: Antriebsmotor DH141M (400 V) mit schnellem Antriebsregler S700.



**Projekt:** Global adaptive model for prediction, characterization and damping of vibrations in hot strip mills (CHATTER)

---

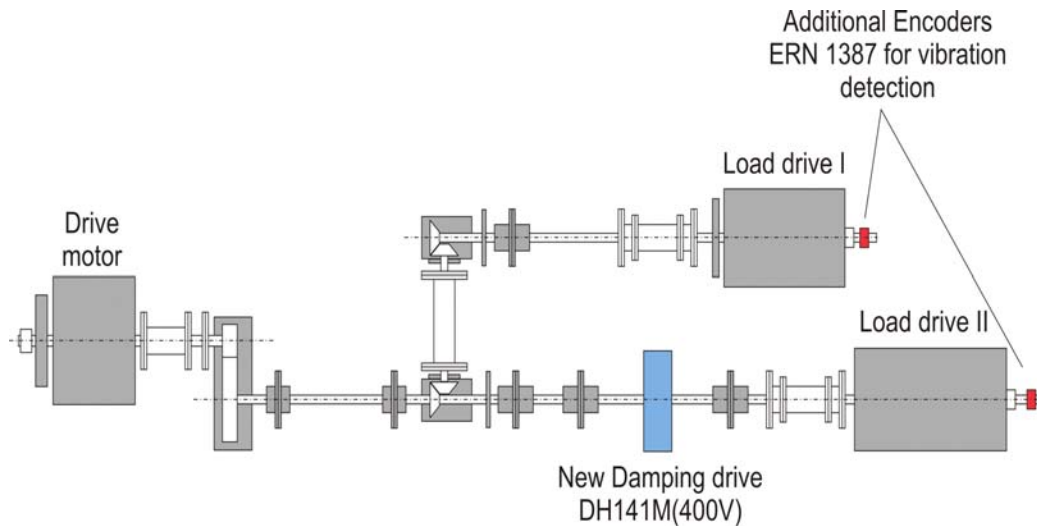


Bild 3: Einbau neuer Sensorik und Aktorik am Prüfstand (IEE)

**Projektpartner:**

- EU-Projekt
- Research Programme of the Research Fund for Coal and Steel
- ThyssenKrupp (Bochum)
- Acelormittal (Aviles, Spanien)
- Universität Oviedo (Spanien)
- Universität Pisa (Italien)
- Cetto (Ratingen)

**Bearbeiter:** Dipl.-Ing. Wei Xiong (Tel.: 72-3720)  
wei.xiong@tu-clausthal.de

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

***IEE***

**Projekt:** Influence of electrical phenomena on the drive train of wind power plants

---

**Problem:** In addition to the stress caused by the natural environment in which a wind power unit stands, it will also experience stresses due to disturbances in the electrical conditions of the power grid it is supplying. Electrical disturbances may result from the loss of a large power consumer or producer from the power system, leading to fluctuations in voltage level and/or frequency, and the voltage may even completely collapse when one or more phases fall out or are short-circuited.

An interest of the project lies in specifying different possible load cases caused by the electrical grid in real wind power plants. A further motivation is to determine to which degree the simulation model's mechanical reaction corresponds to that of the laboratory model during grid disturbances. Wind power plants with gearbox are in the main focus of this investigation, because the damages in use are especially high here.

**Object:** The main motivation of this work is to determine to which degree the simulation model's mechanical reaction corresponds to that of the laboratory model during grid disturbances. The heaviest mechanical stress occurs at the mechanical resonance frequency, and the most affected part in the WPU's mechanics is the shaft linking the wind turbine to the generator due to its length and thickness.

**Project status:** With a special test equipment it is possible to simulate different load cases like fluctuations in voltage level and/or frequency, short circuits or phase shift at the test stand at the institute. The simulation agrees with with the measurement.

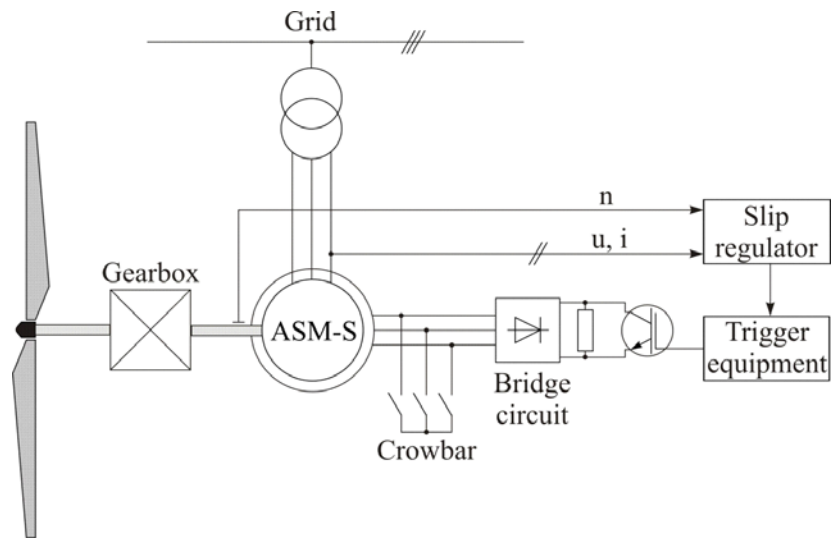


Fig 1: Wind power plant with doubly fed generator and variable resistor in the rotor circuit

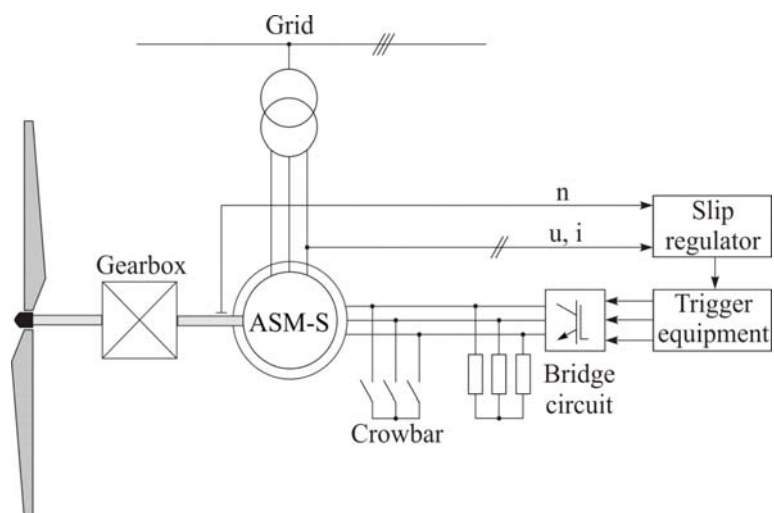


Fig 2: Wind power plant with doubly fed generator and rotor voltage supply

**Projekt:** Influence of electrical phenomena on the drive train of wind power plants

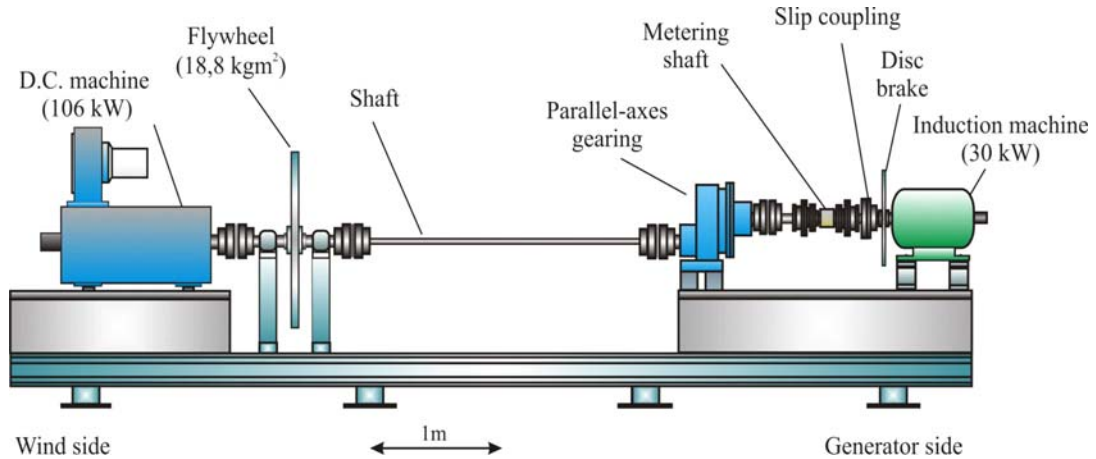


Fig. 3: General view of the test bed at the Institute of Electrical Power Engineering

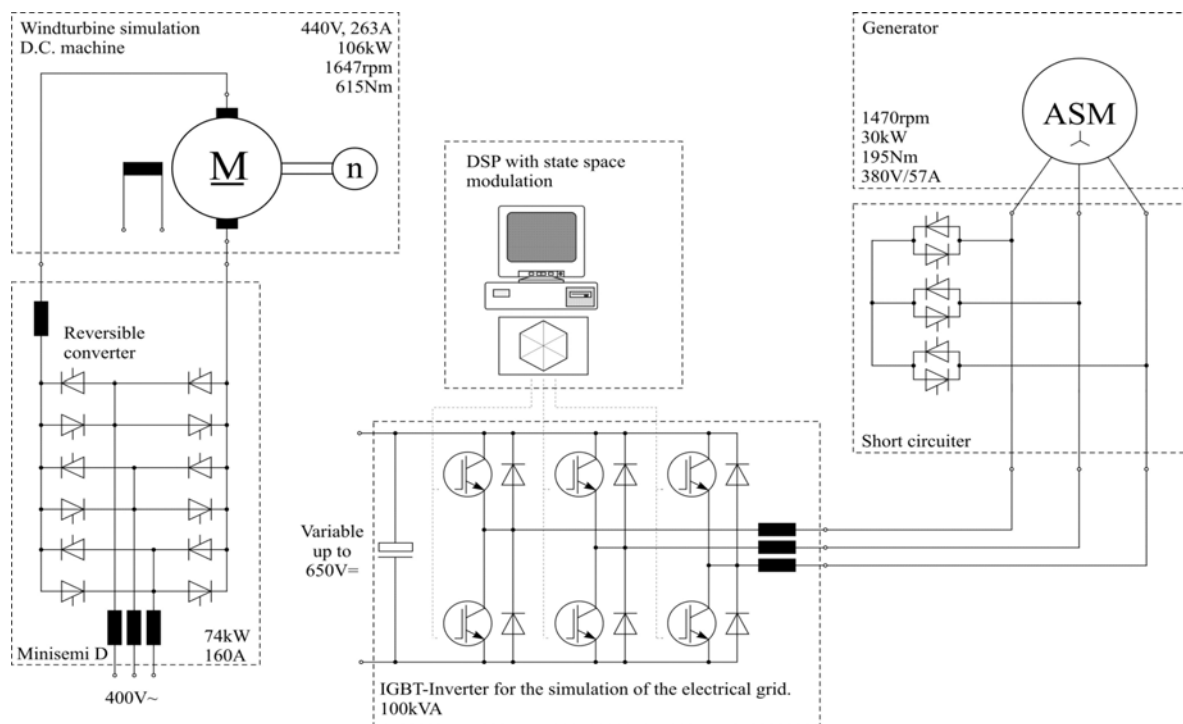


Fig 4: Electrical description of the test bed

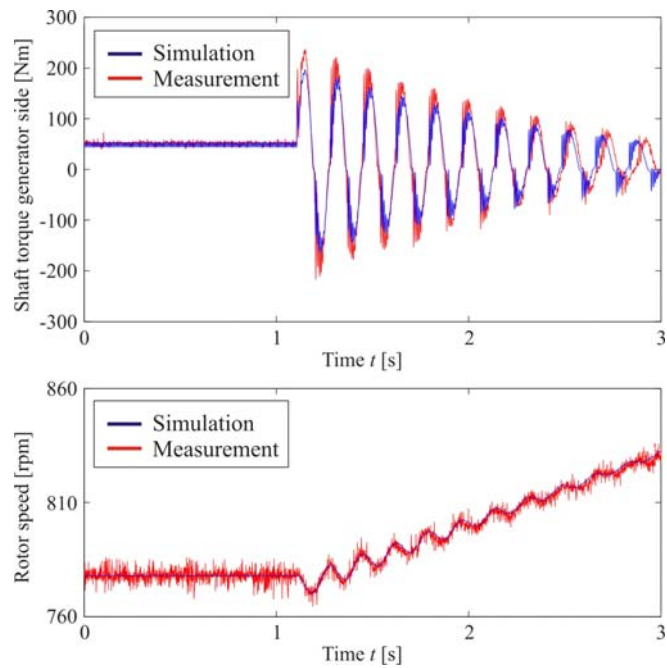


Fig. 5: Rotor speed and shaft torque of the generator side during a 3-phase short-circuit of the stator windings

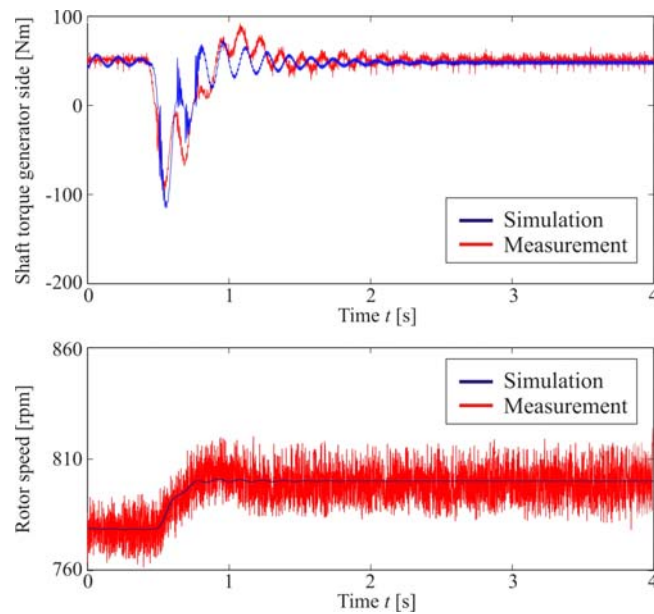


Fig.: 6: Rotor speed and shaft torque of the generator side during a frequency step from 50 Hz to 51.5 Hz

**Projekt:** Influence of electrical phenomena on the drive train of wind power plants

---

**Partner:** Universität Kaiserslautern  
HansenTransmission (Belgien)

**Project person responsible:** Dipl.-Ing. Nikola Ell (Tel.: 72-3821)  
nikola.sophia.ell@tu-clausthal.de

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

***IEE***



**Projekt:** Entwicklung eines Starthilfegerätes

---

**Problem:** In der Pannenstatistik des ADAC finden sich startunwillige Batterien all-winterlich auf dem vordersten Platz. Fast 850 000 Mal mussten die ADAC-Straßenwachtfahrer im letzten Jahr Starthilfe wegen entladener oder defekter Batterien geben - und das keineswegs nur bei älteren Autos. Zum Einsatz kommen in der Regel relativ große und schwere Starthilfegeräte, die mit einer Bleibatterie ausgerüstet sind. Für einen mobilen Einsatz sind diese Geräte somit nur begrenzt geeignet. Zudem können diese Art von Starthilfegeräte in der Regel nicht über das Bordnetz eines Fahrzeugs nachgeladen werden. Die Forderung, die sich daraus ergibt, ist die Konstruktion eines leichten portablen Starthilfegeräts, welches einen hohen Startstrom für wenige Sekunden zur Verfügung stellen kann und eine geringe Ladezeit benötigt. Das direkte Nachladen des Speichers über das Kfz-Bordnetz, nach der erfolgten Starthilfe, ist ebenfalls wünschenswert. Das Starthilfesystem wird dabei direkt an die Startbatterie angeschlossen, wobei zu diesem Zeitpunkt keine Entladung des internen Speichers erfolgen darf.

**Ziel:** Ziel der Arbeiten ist die Entwicklung eines tragbaren, universellen Geräts, das in Kfz-Werkstätten zur Analyse und zur Behandlung von Bleistarterbatterien eingesetzt werden und Startvorgänge von Verbrennungsmotoren unterstützen kann. Das System soll zudem in der Lage sein, sich nach dem Startvorgang eigenständig wieder über das Bordnetz nachzuladen, so dass ein funktionsfähiges Gerät auch nach der Starthilfe zur Verfügung steht.

**Stand der Technik:** Testgeräte für Bleistarterbatterien, mit denen der aktuelle Zustand der Batterie analysiert werden kann, sind kommerziell erhältlich. Für die Zuverlässigkeit der Aussage gibt es wenig bis gar keine Auswertungen. Nur ein Teil der Geräte kann für Batterien genutzt werden, die im Fahrzeug installiert werden. Eine Trennung der Batterie vom Bordnetz ist aber nicht nur unerwünscht, sondern auch mit manchmal hohem Aufwand für die Demontage von Einbauteilen des Fahrzeugs verbunden. Üblicherweise arbeiten diese Geräte auf der Basis von Wechselstrombelastungen mit geringen Strömen und Frequenzen im Bereich von ca. 100 Hz bis einigen Kilohertz. Aus den gemessenen Impedanzwerten können Rückschlüsse auf den Innenwiderstand und

Ladezustand der Batterie gezogen werden.

**Lösungsweg:**

- Entwicklung von Batteriemodellen für eine naturwissenschaftliche Beschreibung der verwendeten Prüf- und Ladeverfahren.
- Bestimmen des Istzustands der Batterie mit konventionellen sowie ergänzenden Methoden
- Verfahren zur schnellen Verbesserung des Batteriezustandes
- Aufbau eines kleinen tragbaren Prototypen mit dem sowohl das Fahrzeug gestartet, wie auch eine Diagnose der Bleistarterbatterie durchgeführt werden kann.
- Verifizierung und Prototypenentwicklung



Bild 1: Prototyp mit vollem Funktionsumfang

**Projektstand:**

Das Projekt wurde am 01.09.06 gestartet und endete im Oktober 2008. Es wurden verschiedene Konzepte zur Batterie(lade)-zustandsdiagnose evaluiert und die mögliche Implementierung in ein Diagnoserät überprüft. Zudem wurde ein Batteriemodell entwickelt, das insbesondere das Klemmenverhalten der Batterie bei hohen Lade- und Entladeströmen richtig wiedergibt. Für den ersten Teil der Zustandsdiagnose wurden Strom- und Spannungsantworten während des eigentlichen Startvorgangs analysiert und über entsprechende Algorithmen bewertet. Anhand dieser Startfähigkeitsanalyse ist eine erste Bewertung des Batteriezustands möglich. Nachstehende Ab-

bildungen zeigen den Startvorgang eines Peugeot 206 mit einer neuen und einer gealterten Batterie im Vergleich. Deutliche Unterschiede sind bei den Werten des Spitzenstroms, der minimalen Spannung und der Dauer des Startvorganges zu erkennen.

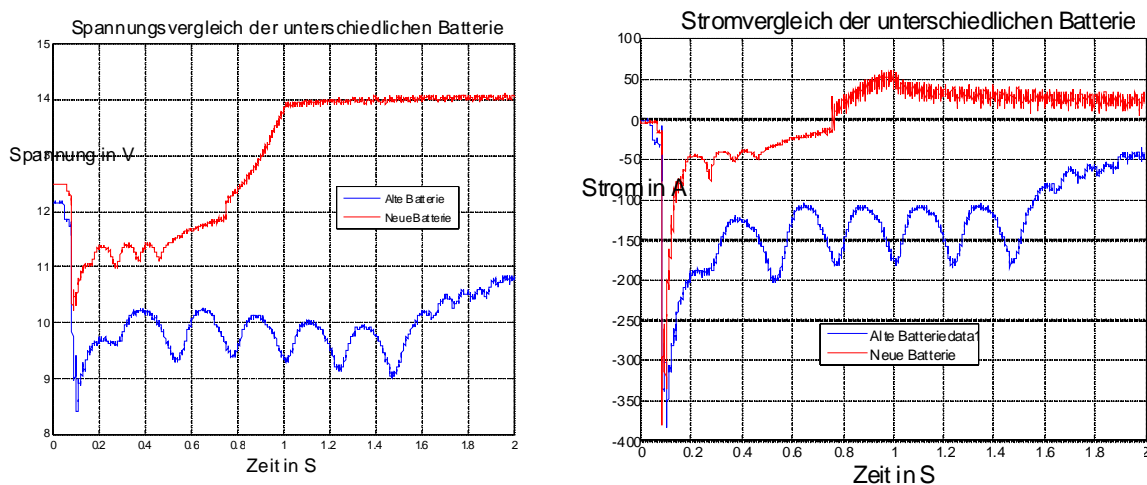


Bild 2: Vergleich der Strom- (rechts) und Spannungsverläufe (links) eines Startvorgangs bei einem Benzinmotor der mit unterschiedlich gealterten Batterien gestartet wurde, Peugeot 206 (1124 cm<sup>3</sup>, 44 Ah Neu / Alt)

Anhand der oben beschriebenen Vergleichsmessung lassen sich nun verschiedene Bewertungsmethoden untersuchen. Hierzu gehören:

- Bewertung der Startzeit
- Auswertung des mittleren Spannungsgradienten
- Bewertung des Innenwiderstandes
- Bewertung der Belastungskennlinie

Für ein Belastungsprofil kann über die Darstellung der Klemmspannung über den Belastungsstrom ein Verlauf dargestellt werden, der die Leistungsfähigkeit der Batterie widerspiegelt.

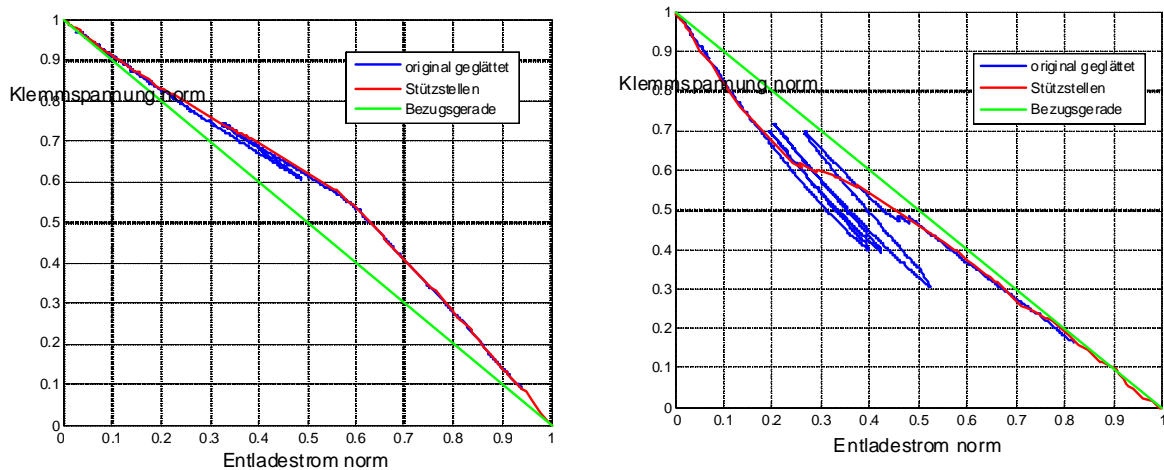


Bild 3: Klemmspannung in Abhängigkeit vom Entladestrom in normierter Darstellung bei einer hochdynamischen kurzzeitigen Belastung; links eine minder gealterte Batterie; recht eine stark gealterte Batterie

Bei einer gealterten Batterie fällt die Spannung bei vorgegebenem Strom stärker ab, als bei einer neuen, leistungsfähigeren Batterie. Für die Diagnose können die normierten Klemmspannungswerte über dem normierten Entladestrom dargestellt werden. Die Abweichung der Messpunkte von der Bezugsgeraden, sind ein Maß für die Leistungsfähigkeit bzw. die Restkapazität.

Ebenso kann der Gradient der dargestellten Stützstellenkurve zur Bewertung herangezogen werden. Grundsätzlich gilt hierbei: je geringer der Gradient, desto größer der Kapazitätsverlust. Die aufgetragenen Strom- und Spannungswerte können für die Auswertung ebenfalls über eine Dichtefunktion abgebildet werden.

Der Startvorgang des Fahrzeugs erfolgt letztendlich über eine Starthilfeunterstützung mit erhöhter Systemspannung. Hierzu wurde ein Patent angemeldet. Die Umsetzung in ein Seriengerät und die Erprobung im Feldeinsatz erfolgt derzeit in Kooperation mit einem großen deutschen Automobilzulieferer. Bei dem Verfahren handelt es sich um eine lastabhängige Zuschaltung der Hilfsbatterie, die resultierend deutlich kleiner und leichter ausgelegt werden kann. Ebenso wird der Einsatz einer von Blei abweichenden Zelltechnologie favorisiert.

**Projekt:** Entwicklung eines Starthilfegerätes

---

Die schnelle Verbesserung des chemischen Speichers sollte durch weiterentwickelte Ladeverfahren ermöglicht werden. Hier wurde speziell die hochfrequente Pulsladung, sowie das so genannte IR-freie Laden untersucht. Signifikante Vorteile gegenüber dem Standard IU-Ladeverfahren konnten nicht nachgewiesen werden.

**Projektpartner:** Ingenieurbüro Prof. Dr. Heinz Wenzl, Beratung für Batterien und Energietechnik, Osterode am Harz

**Förderung:** Europäischer Fonds für regionale Entwicklung (EFRE)  
EFRE 2005.188

**Bearbeiter:** Dipl.-Ing. André Haubrock (Tel.: 72-3597)  
andre.haubrock@tu-clausthal.de

Dipl.-Ing. Jian Yang (Tel.: 72-2594)

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

***IEE***

**Projekt:** Alterung von Lithium-Ionen Batterien in Hybridfahrzeugen unter Berücksichtigung zusätzlicher netzstabilisierender Maßnahmen

**Problem:** Im Rahmen des geplanten Vorhabens sollen die Lebensdauerauswirkungen auf Batterien in Hybridfahrzeugen untersucht werden, wenn diese zusätzlich durch Netzdienstleistungen mit sehr großen dynamischen Leistungsanforderungen bei gleichzeitig geringem Ladungsmengenumsatz belastet werden. Der Schwerpunkt der Arbeiten wird die Alterungsuntersuchung der zukünftig in Plug-In-Fahrzeugen eingesetzten Speichertechnologie sein. Des Weiteren sollen, die Auswirkungen bei der Anbindung der Fahrzeuge an das Energieversorgungsnetz als mobile dezentrale Netzstabilisierungsspeicher auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten des Energieversorgers und des Fahrzeugeigentümers bewertet werden. Die vorgesehenen Arbeiten werden sich an den Anforderungen der öffentlichen Elektrizitätsversorgung mit hohem Anteil dezentraler Stromproduktion und des Automobilsektors orientieren.

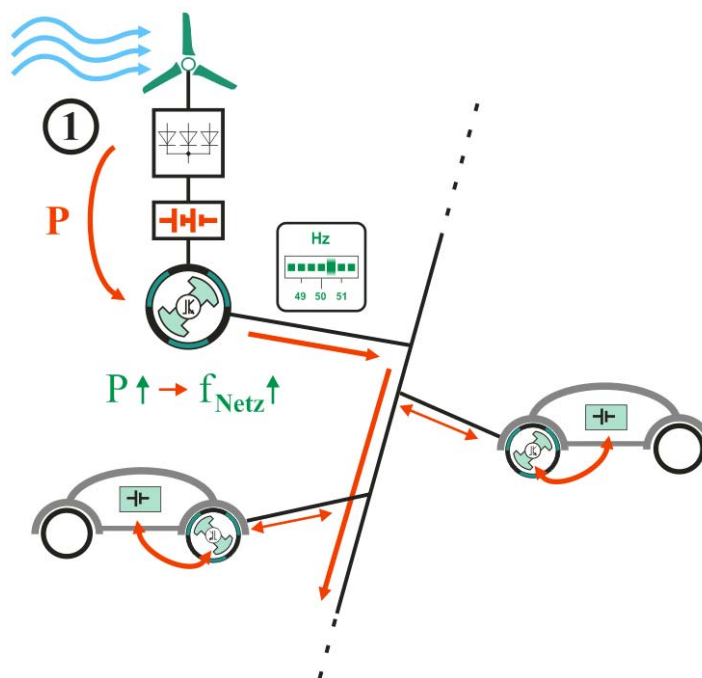


Bild 1: Vision eines autonomen Energiesystems (Fahrzeug als Plug-In Hybridvariante basierend auf dem VISMA-Konzept) eingebunden in ein Versorgungsnetz (nach Ralf Hesse): dezentrales VISMA System zur Anbindung regenerativer Erzeuger und Mini-VISMA Systeme in jedem Fahrzeug

**Ziel:**

Im Rahmen des geplanten Forschungsvorhabens sollen zwei Labormuster eines intelligenten On-Board-Chargers (iOBC) auf Basis eines am Institut für Prozess- und Produktionsleittechnik der TU Clausthal vorhandenen Elektroauto-Versuchsträgers erstellt werden, anhand dessen die Vehicle2Grid-Funktionalitäten im netzgekoppelten Modus untersucht werden können. Dabei sollen die folgenden drei Themenfelder des Konzepts betrachtet werden.

- Untersuchung der zukünftig in Plug-In-Hybrid und Elektrofahrzeugen eingesetzten Speichertechnologie bzgl. der Lebensdauer- auswirkungen bei erhöhter Belastung durch Nutzung für Systemdienstleistungen des elektrischen Netzes
- Untersuchungen zur Anbindung des Elektrofahrzeugs an das Energieversorgungsnetz über eine virtuelle Synchronmaschine (d. h. intelligentes Batterieladegerät auf Basis eines bidirektionalen VISMA-Systems)
- Untersuchung der Auswirkungen der mobilen dezentralen Einspeiser bzgl. der Netzstabilisierung auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten des Energieversorgers und des Fahrzeugeigentümers

**Stand der Technik:**

Hinderlich für eine schnelle Markteinführung von Plug-In-Hybridfahrzeugen ist der erhöhte Aufwand für den komplexeren Antriebsstrang, vor allem aber für die kostenträchtige Batterie. Die wirtschaftliche Gesamtsituation und damit die Markteinführung könnte aber für alle verbessert werden, wenn das Fahrzeug bei entsprechender Gestaltung der Ladeelektronik dank des lokalen Systems Netzdienstleistungen für das Netz erbringen würde. Eine wichtige Systemdienstleistung ist die Bereitstellung von Regelleistung bzw. Lieferung von Regelenergie, um die Stromverbrauchs- und Erzeugungsseite in Balance zu halten. In der üblichen Klassifizierung (vgl. Bild 2) wird dabei zwischen primärer (1), sekundärer (2) und tertiärer (3) Regelleistung (=Minutenreserve) unterschieden. Bei transienten Vorgängen wird darüber hinaus durch die Trägheit der rotierenden Generatormassen eine instantane Leistungsänderung (0) angeregt, welche für die Wahrung der Kurzzeitstabilität wichtig ist. Der für die Bereitstellung von Regelleistung gezahlte Preis steigt dabei, je kürzer die Reaktionszeit ist. Eine entsprechend gesteuerte Leistungs-



**Projekt:** Alterung von Lithium-Ionen Batterien in Hybridfahrzeugen unter Berücksichtigung zusätzlicher netzstabilisierender Maßnahmen

elektronik-Einrichtung kann aber auch diese Systemdienstleistung erbringen und zudem die Spannungsqualität durch Kompensation von Ober- und Unterschwingungen sowie Unsymmetrien ausgleichen. Wenn das Plug-In Hybridfahrzeug im Park- bzw. Ladebetrieb diesen Mehrwert liefert, dann kann es dazu beitragen, den Technologiewandel im automobilen Sektor zu beschleunigen, sofern es gelingt, finanzielle Anreize für den Nutzer daraus zu generieren.

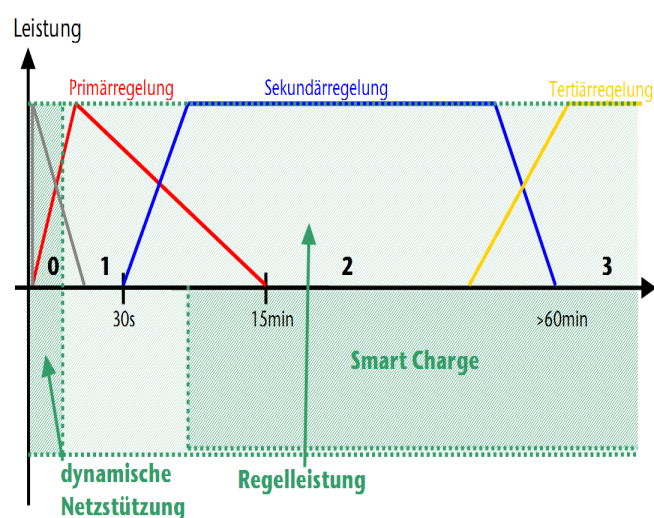


Bild 2: Darstellung der unterschiedlichen Regelleistungen mit den möglichen Arbeitsbereichen eines Fahrzeugspeichers

**Lösungsweg:**

- Untersuchung der zukünftig im Fahrzeug eingesetzten Speichersysteme hinsichtlich grundlegender Alterungsmechanismen
- Einteilung der Alterungsmechanismen in kalendarische Alterung und zyklische Alterung, wobei die zyklische Alterung durch den herkömmlichen Fahrbetrieb, wie auch durch den Netzstützungsbetrieb hervorgerufen wird
- Ermittlung der zu erwartenden Belastung und Klassifizierung der Lastkollektive in Ereignisse
- Erweiterung des bestehenden Batteriemodells hinsichtlich alterungsbedingter Parameteränderung mit dem Ziel ein ereignisbasiertes Alterungsmodell zu erstellen
- Verifikation des Simulationsmodells anhand realer Fahrzeugdaten

- Aufbau eines intelligenten On-Board-Charges (iOBC) für elektrifizierte Fahrzeuge PH(EV) mit dem Ziel Netzstützungsfunktionen bei minimaler Speicherdegradation bereitzustellen
- simulationstechnische Bewertung des Ladealgorithmus, die zeigt, in welchem Ausmaß elektrifizierte Fahrzeuge das Niederspannungsnetz beeinflussen können
- energiewirtschaftliche Analyse des Konzepts

**Projektstand:**

Das Projekt wurde Anfang 2009 gestartet. Die grundlegenden Alterungsmechanismen in Lithium-Ionen Zellen konnten herausgearbeitet und in kalendarische und zyklische Alterungsmechanismen selektiert werden. Derzeit erfolgt die Parametrisierung des Simulationsmodells und dessen Erweiterung hinsichtlich der Alterungsmechanismen auf Basis konkreter Messdaten. Parallel wurden Lastkollektiv-Zählverfahren bewertet und ausgewählt, so dass anhand der messtechnisch ermittelten Fahrprofile eine Ereignisklassifizierung vorgenommen werden kann, die letztlich als Eingangsgröße für das ereignisbasierte Alterungsmodell der Lithium-Ionen Zelle dient. Das Institut für Prozess- und Produktionsleittechnik der TU Clausthal baute eine Elektroauto-Versuchsträger auf, der sich derzeit in der Erprobungsphase befindet. In einem weiteren Arbeitsschritt wurde der VIMSA-Umrichter, der als Ladeeinrichtung dem Fahrzeug dient, aufgebaut. Derzeit erfolgt die Erweiterung des VISMA-Algorithmus hinsichtlich SmartCharge- und Vehicle2Grid-Funktionalitäten.

**Projektpartner:**

Daimler AG

**Bearbeiter:**

Dipl.-Ing. André Haubrock (Tel.: 72-3597)  
andre.haubrock@tu-clausthal.de

**Projektleiter:**

Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Beck

**Projekt:** Leistungsstarke Kurzzeit-Energiespeichersysteme

---

**Problem:** Für viele technische Anwendungen werden Energiespeicher mit großer Dynamik und kurzer Reaktionszeit bei der Abgabe und Aufnahme hoher elektrischer Leistung gefordert. Der Energieinhalt des Energiespeichers darf bei diesen Anwendungen oft im Verhältnis zur maximalen Leistung gering sein. Üblicherweise werden für diese Anwendungen Doppelschichtkondensatoren, Schwungmassenspeicher und supraleitende magnetische Energiespeicher als Lösungen gegenüber Batterien bevorzugt, ohne systemtechnische Lösungen durch geschickte Kombination verschiedener Technologien hinreichend in die Problemlösung einzubeziehen.

**Ziel:** Ziel dieses Projekts ist, durch geeignete Betriebsführungskonzepte die Einsatzgrenzen von Batterien für Anwendungen mit sehr hohem Leistungsbedarf über einen großen Frequenzbereich zu erforschen und gegenüber konkurrierenden Energiespeichern hoher Leistung wie z. B. Schwungmassenspeichern und Doppelschichtkondensatoren (DSK) abzugrenzen. Insbesondere sollen für Anwendungen, bei denen neben einer Batterie ein paralleler Einsatz weiterer Energiespeichersysteme vorgesehen ist, ein geeignetes Systemkonzept bestimmt und Betriebsführungskonzepte erarbeitet werden, wobei der Aufwand jeweils zu minimieren ist.

**Stand der Technik:** In der jüngeren Vergangenheit wurde an verschiedenen Stellen über Kombinationen von unterschiedlichen elektrischen Speicher- bzw. Erzeugersysteme (z. B. DSK und Batterie, DSK und Brennstoffzelle, Batterie und Brennstoffzelle, usw.) für Hybrid- und Elektrofahrzeuge berichtet. Dabei ist beachtenswert, dass die Behandlung von Speicheranforderungen bei stationären Anwendungen wenig bearbeitet wird, obwohl sie angesichts der immer weiteren Durchdringung der Niederspannungs- und Mittelspannungsnetze mit dezentral verteilten stochastischen Stromerzeugern offensichtlich immer wichtiger wird.

Es werden im wesentlichen zwei verschiedene Ansätze verfolgt:

1. die Sollwerte für die verschiedenen Quellen werden zeitverzögert übertragen, um der unterschiedlichen Dynamik gerecht zu werden und
2. das (bekannte) Leistungssignal wird mittels Signalanalyse in seine Frequenzanteile zerlegt und bzgl. der zu erwartenden Dynamik

auf die einzelnen Quellen so “verteilt”, dass jede Komponente jeweils einen bestimmten Frequenzbereich abdeckt. Im allgemeinen werden dem DSK die höchsten Frequenzanteile und die kleinste (bzw. keine) Verzögerung zugeordnet, der Batterie mittlere Frequenzanteile und der Brennstoffzelle die Anteile mit der geringsten Fluktuation zugeordnet. An anderen Stellen wird die Zwischenkreisspannung allein durch den DSK geregelt, Batterie und Brennstoffzelle sind als reine Stromquellen ausgelegt, um den DSK bzw. die Batterie in einem bestimmten Ladezustandsbereich zu halten. Es werden keine belastbaren Aussagen zum Wirkungsgrad, der Wirtschaftlichkeit und der Lebensdauer getroffen. Eine modellbasierte Regelung ermöglicht eine zielgerichtete Leistungsverteilung auf die unterschiedlichen Speicher. Es lassen sich verschiedenen Optimierungsziele formulieren, die jeweils veränderte Regelparameter nach sich ziehen.

**Lösungsweg:**

Zur Identifikation des Strom/Spannungsverhaltens der verschiedenen Energiespeicher werden Messungen durchgeführt, die eine Modellierung der Speicher in einem Frequenzbereich von einigen Millihertz bis einigen Kilohertz ermöglichen. Besonders für hohe dynamische Anwendungen sind bekannte Modellvorstellungen zu erweitern oder zu modifizieren, um eine quantitativ und qualitativ gute Übereinstimmung zwischen Modell und Realität zu erreichen.

Es wird ein Gleichspannungszwischenkreis mit bis zu 800 V Spannung aufgebaut. Der Zwischenkreis besteht aus Blei-Säure-Batterie, Doppelschichtkondensator, Schwungmassenspeicher sowie Elektrolyt- und Snubberkondensatoren und wird dynamisch von einem elektronischen Laststeller bidirektional belastet. Die Ankopplung von Batterie, Doppelschichtkondensator und Schwungmassenspeicher an den Zwischenkreis geschieht über Gleichstromsteller, deren Sollwerte auf Basis eines modellbasierten Leistungs- und Energiemanagements generiert werden.

Der aufgebaute Gleichspannungszwischenkreis erlaubt es anschließend, verschiedene Regler- und Speicherkonfigurationen für verschiedene Optimierungsziele zu untersuchen.

**Projekt:** Leistungsstarke Kurzzeit-Energiespeichersysteme

---

**Projektstand:** Die Identifikation der einzelnen Speichertypen wurde erfolgreich durchgeführt. Zurzeit erfolgen Messungen im Gleichspannungszwischenkreis im gesteuerten und geregelten Betrieb bei schnellen Leistungsänderungen durch den elektronischen Laststeller. Der Schwungmassenspeicher ist hardwareseitig angeschlossen, ein Betrieb mit Leistungsbereitstellung bzw. -aufnahme aus der Schwungmasse steht jedoch noch aus.

Die Bestimmung von Regelparametern und die experimentelle Verifikation der optimierten Betriebsführung bilden den Abschluss des Projekts.

Die Analyse, Quantifizierung und Bewertung der Signifikanz des Effektes der transienten Stromverdrängung bei elektrochemischen Speichern sind Gegenstand einer beantragten Projektverlängerung.

**Veröffentlichung:**

- Performance of electrochemical systems for HEV or EV application during fast current Steps, Advanced Automotive Battery Conference, Tampa, Florida, 12.-16. Mai 2008
- Behaviour of electrochemical systems like lithium ion, NiMH, lead acid batteries and ultra capacitors during fast current steps, 3. European Ele-Drive Conference, 11.-13. März 2008
- Requirements for Energy Storage Systems in Inverter-fed DC Circuits: DC distortion power and its Impact on the Lifetime of Batteries, Kraftwerk Batterie, Essen, 20.-21. Januar 2009-12-01
- Characterizing electrochemical systems used for high-current applications by measuring the short circuit current and the internal resistance, Electric Vehicle Symposium 24, 13.-16. Mai 2009
- Auswirkungen steiler Stromänderungen auf elektrochemische Systeme, etz Heft 3/2008
- Optimization of a multi energy storage system, 4<sup>th</sup> International Conference for Renewable Energy Storage Systems (IRES 2009, Berlin, 24.-25. November 2009

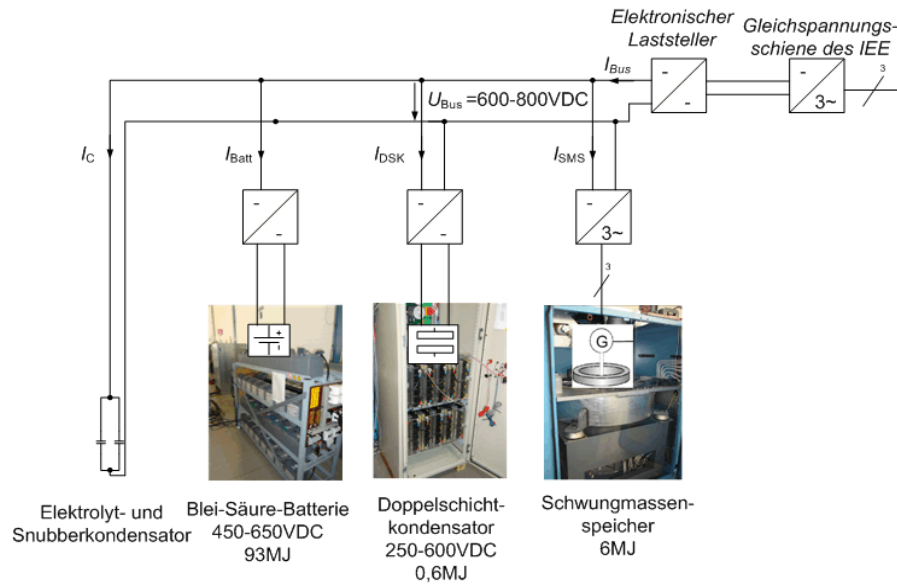


Bild 1: Aufbau des Gleichspannungszwischenkreises mit den über Gleichstromsteller gekoppelten Speichern



Bild 2: Hardware-Realisierung des in Bild 1 dargestellten Gesamtsystems

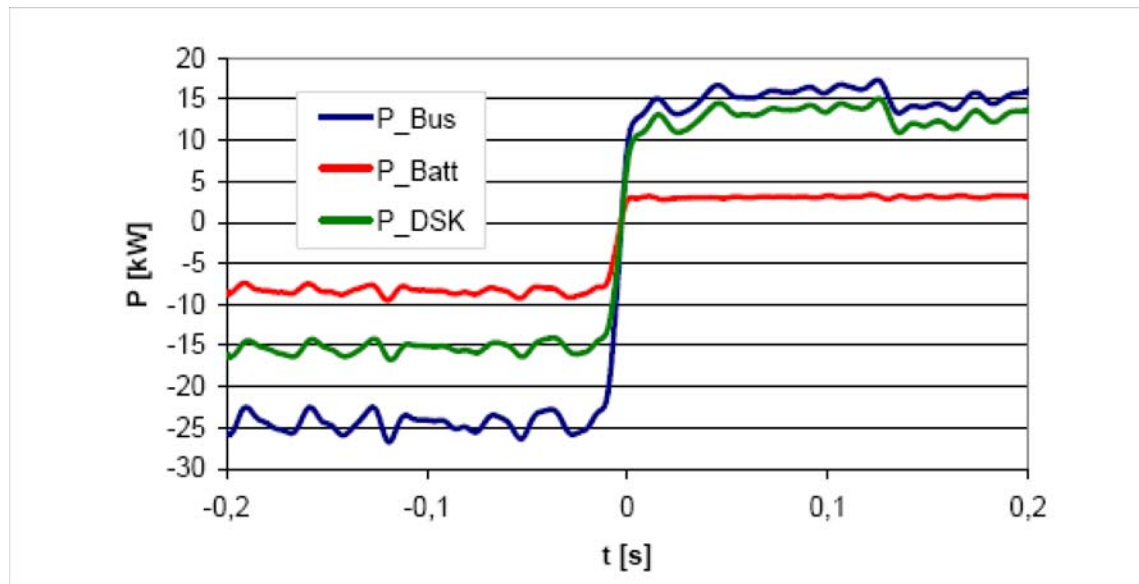


Bild 3: Verlauf der Leistung von Batterie und Doppelschichtkondensator bei einer Leistungsänderung im Zwischenkreis nach Bild 1 von 40 kW bei gesteuertem Betrieb der Gleichstromsteller. Ladezustand von Batterie und DSK 85 % bzw. 70 %.

- Förderung:** Das Projekt wird gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) unter dem Geschäftszeichen BE 1496/14-1
- Bearbeiter:** Dipl.-Ing. Ralf Benger (Tel.: 72-2176)  
benger@iee.tu-clausthal.de
- Projektleiter:** Dr. rer. nat. Heinz Wenzl

***IEE***



## 4 Personelle Besetzung

### 4.1 Hauptamtliche Mitarbeiter des Instituts

Hochschullehrer: (Institutsdirektor)	Prof. Dr.-Ing. H.-P. Beck
Akademischer Oberrat:	Dr.-Ing. E.-A. Wehrmann
Akademische Rätin a. Z.	Dr.-Ing. G. Sourkouni-Argirusi
Oberassistent:	Dr. rer. nat. H. Wenzl
Wiss. Assistent:	Dr.-Ing. D. Turschner
Habilitand:	Dr.-Ing. A. Mbuy Dr.-Ing. O. Osika
Wissenschaftliche Mitarbeiter:	Dipl.-Ing. A. Becker (EFZN) Dipl.-Ing. R. Bengler Dipl.-Ing. Y. Chen Dipl.-Ing. A. Dowrueng Dipl.-Ing. T. Hager Dipl.-Ing. A. Haubrock Dr.-Ing. R. Hesse Dipl.-Ing. T. Hesse Dipl.-Phys. R. Heyne (EFZN) Dipl.-Wi.-Ing. G. Kaestle (EFZN) Dipl.-Ing. T. Küster Dr.-Ing. B. Musasa (EFZN) Dipl.-Wirtsch.-Ing. M. Schmidt (EFZN) Dipl.-Ing. C. Schröder Dipl.-Ing. H. Stagge Dipl.-Ing. M. Stubbe Dipl.-Ing. N. Wang Dipl.-Ing. B. Werther

Dipl.-Ing. W. Xiong

Dipl.-Ing. J. zum Hingst

Freie wissenschaftliche Mitarbeiter:  
(externe Doktoranden)

Dipl.-Ing. Wieben, FH Wilhelmshaven

Dipl.-Ing. Lorenzen, FH Wilhelmshaven

Dipl.-Ing. Nicolai, FH Wilhelmshaven

Dipl.-Ing. Schmiesing, E.ON Avacon

Dipl.-Ing. vom Felde, E.ON Avacon

Dipl.-Ing. Vielhauer, E.ON Avacon

Dipl.-Ing. Becker, EFZN

Dipl.-Ing. Wendt, TU Dresden

MitarbeiterInnen im Technischen  
und Verwaltungsdienst (MTVD):

Frau E. Mendt

Frau C. Schönemann

Herr D. Fritze

Herr M. Kirchner

Herr R. Koschnik

Herr H. Schultze

Herr K. ter Smitten

Herr S. Joachim

Herr K. Bremer (Auszubildender)

Herr S. Stille (Auszubildender)

Herr M. Yilmaz (Auszubildender)

Herr A. Rohde (Praktikant)

## Die Mitarbeiter des Institutes für Elektrische Energietechnik



H.-P. Beck  
(Direktor)  
-2570



Frau Mendt  
(Sekretariat)  
-2299



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



G. Sourkouni-Argirusi  
(Akad. Rätin a. Z.)  
- 3189



D. Turschner  
(Wiss. Assistent)  
- 2592



H. Wenzl  
(Oberassistent)  
-2272



M. A. J. M'Buy  
(Habilitation)  
- 3702



O. Osika  
(Habilitation)  
- 2593



A. Becker  
(WiMa, Elektr.  
Netze)

-05321/3816-8058



R. Bengler  
(WiMa, Batterie-  
technik)

- 2176



Y. Chen  
(WiMa, Virtuelle  
Synchronma-  
schine)

-3821



A. Dowrueng  
(WiMa, Energie-  
informatik)



T. Hager  
(WiMa, Dezentrale Energieversorgung)  
-3736



A. Haubrock  
(WiMa, Batterietechnik)  
- 3597



R. Hesse  
(WiMa, Energiekonditionierer)



T. Hesse  
(WiMa, Dezentrale Energieversorgung)  
- 2939



R. Heyne  
(WiMa, Batteriesysteme)  
-2272



G. Kaestle  
(WiMa, Dezentrale Energieversorgung)  
- 2572



T. Küster  
(WiMa, Netzsimulation)  
- 3597



B. Musasa  
(WiMa, Hydrodyn.-Kupplung)



M. Schmidt  
(WiM, Dezentrale Energieversorgung)  
-05321/3816-8059



C. Schröder  
(WiMa, Dezentrale Energieversorgung)



H. Stage  
(WiMa, Brennstoffzellentechnologie)



M. Stubbe  
(WiMa, Walz-, -Antriebe)  
-3728

Mitarbeiterinnen / Mitarbeiter

Telefon: 05323/72-

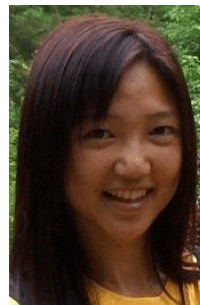


N. Wang  
(WiMa, Batterie-  
systeme



B. Werther  
(WiMa, Netz-  
stabilität

-05321/3816-8101



W. Xiong  
(WiMA, Walz-,  
- Antriebe

-3720



J. zum Hingst  
(WiMa, Netz-  
simulation)

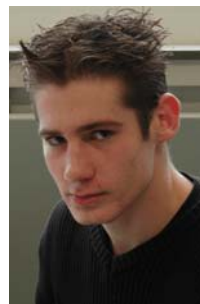
-05321/3816-  
8054



K. Bremer  
(Auszubildender)  
- 3839



D. Fritze  
(Elektrotechnik)  
- 2571



S. Joachim  
(ehem. Mitarbei-  
ter)



M. Kirchner  
(Elektronik)  
- 3839



R. Koschnik  
(Energieelektro-  
nik)  
- 5067



A. Rohde  
(ehem. Praktikant)



C. Schönemann  
(Techn. Zeich-  
nerin)  
- 2177



H. Schultze  
(Hausmeister)  
- 3810

Mitarbeiterinnen / Mitarbeiter

Telefon: 05323/72-



S. Stille  
(Auszubildender)



K. ter Smitten  
(Mechanik)  
- 2571



M. Yilmaz  
(Auszubildender)

## 4.2 Nebenamtlich tätige Hochschullehrer bzw. Lehrbeauftragte

	Lehrgebiete:
Prof. Dr.-Ing. E. Baake	Lehrgebiet Theorie Elektromagnetischer Felder
Dr.-Ing. Buddenberg	Fossile und regenerative Energieressourcen
Dipl.-Ing. H. Darrelmann	Autonome Netze
Dr.-Ing. J. Heldt	Sonderprobleme Elektrischer Maschinen
Dipl.-Phys. P. Kahlstatt	Energiesysteme: Kapitelteil Kernbrennstoffe
Dr.-Ing. J. Kühl	Regenerative Energiequellen
Prof. Dr.-Ing. B. Ludwig	Systemtechnik
Dr.- Ing. G. Lülff	Optimierung und Instandhaltung von Elektroenergieanlagen
Dr.-Ing. K.-D. Maubach	Elektrizitätswirtschaft
Prof. Dr. rer. nat. C. Salander	Energiemanagement
Dr.-Ing. H. Schmidt	Hochspannungstechnik
Prof. Dr.-Ing. habil. C. Sourkounis	Regenerative Elektrische Energietechnik
Dr. rer. nat. H. Wenzl	Batteriesystemtechnik und Brennstoffzellen

## 4.3 Wissenschaftliche Hilfskräfte

Herr E. Atanga Eloundou	Herr P. Klein	Herr A. Schmieder
Herr A. van Daake	Herr F. Leunig	Herr R. Schnieder
Frau N. Ell	Herr Ch. Luengjiranothai	Frau Y. Shao
Herr D. Erazo Pesantez	Herr M. Möller	Herr P. Stankat
Herr B. Fuhrmann	Herr A. Moghaddam	Frau S. Wahl
Herr M. Gibbels	Frau C. L. Ngogang Tekfang	Herr D. Wang
Frau C. Haaß-Ropeter	Herr M. Niemeyer	Frau W. Jin
Frau K. Heitmann	Frau K. Plagge	Herr F. Welck
Herr R. Herrling	Herr L. Propp	Herr J. Yang
Herr G. Hofbauer	Frau R. Rousseva	Herr Z. Zhang
Herr F. Kainer	Frau V. Schild	Herr N. Zimnicki

#### **4.4 Mitgliedschaften in wissenschaftlichen Vereinigungen und in den Selbstverwaltungsgremien der Universität**

- Prof. Dr.-Ing. H.-P. Beck
- Vizepräsident für Forschung und Hochschulentwicklung der TU Clausthal (bis 31.10.2009)
  - Vorstandsvorsitzender des Energieforschungszentrums Niedersachsen (ab 01.02.2008 bis heute)
  - Vorsitzender des Wissenschaftlichen Beirates des CUTEC Instituts GmbH (bis 31.10.2009)
  - Stellvertretender Vorsitzender der Lenkungsgruppe Landesstrategie Brennstoffzelle und Elektromobilität
  - Vorstandsmitglied des Forums Clausthal (FC)
  - Member of the International Scientific Committee for Electrical Power Quality and Utilisation
  - Ordentliches Mitglied der Braunschweigischen wissenschaftlichen Gesellschaft
  - ordentliches Mitglied der acatech (Akademie für Technikwissenschaften e. V.)
  - Senatbeauftragter Kooperation Petrosani
  - Stellv. Vorstandssprecher im Forschungsverbund Energie Niedersachsen (Dezentrale Energiesysteme)
  - Mitherausgeber des Handbuchs Energiemanagement
- Dr.-Ing. E.-A. Wehrmann
- Mitglied der Kommission zum wissen. Fehlverhalten
- Dr.-Ing. D. Turschner
- Mitglied der Jury bei “Jugend forscht”
- Herr R. Koschnik
- Ausbilder
  - Sicherheitsbeauftragter
  - Mitglied des Prüfungsausschusses für Energieelektroniker der IHK Braunschweig



## 4.5 Ressourcen des Institutes

- Verfügbare Gebäudefläche 1670 m<sup>2</sup>
  - Bürofläche 826 m<sup>2</sup>
  - Labor-/Prüffeldfläche 794 m<sup>2</sup>
  - Drittmittelhalle IEE/EFZN 300 m<sup>2</sup>
  
- Mitarbeiter (Stand Ende 2009)
  - wissenschaftliches Personal 20
  - techn.-/Verwaltungsangestellte 10
  - Lehrbeauftragte 6
  - Wissenschaftliche Hilfskräfte 25
  - externe Doktoranden 12
  - 73**
  
- Prüffeld
  - Maschinen-/Antriebslabor
  - Windenergie-Antriebsstrang (netz- und selbstgeführter Umrichter)
  - Energieelektroniklabor
  - Hochspannungs-/Energieanlagenlabor
  - Prüfstände für Walzwerksantriebe mit Umrichter
  - Batterie-Prüfstand mit Impulslade / -entladegerät und Impedanzspektrometer
  - Prüfstand für Windkraftanlagen zur Getriebeprüfung
  - Brennstoffzellen-Versuchseinrichtung mit eigensicherer Steuerung
  - Klimaschränke
  
- Forschungs- und Lehrinrichtungen (im Berichtszeitraum erweitert)
  - Energiekonditionierungsanlage (VISMA/d. h. Batterieumrichter)
  - Prozeßrechner-/Simulationstechniklabor (CIP-Pool, WAP-Pools)
  - Windenergieanlagen-Prüfstände
  - MATLAB-Simulink, SABER, PSPICE etc. - Software
  - Digitale Signalprozessoreinheiten (Einschübe der Firma dSpace)
  - Energiepark Clausthal (Lehr- und Demonstrationsanlage für dezentrale Energiesysteme)

## 5 Links

- [www.tu-clausthal.de](http://www.tu-clausthal.de)
- [www.iee.tu-clausthal.de](http://www.iee.tu-clausthal.de)
- [www.efzn.de](http://www.efzn.de)
- [www.fven.de](http://www.fven.de)
- [www.dresy.de](http://www.dresy.de) (Energiepark)
- [www.iee.tu-clausthal.de](http://www.iee.tu-clausthal.de), "Info-Präsentation"