

# Institutsbericht 2005



**Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg**  
**Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik**

**Institut für Elektrische Energiesysteme**

### Anschrift:

Institut für Elektrische Energiesysteme (IESY)  
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg  
Universitätsplatz 2  
39106 Magdeburg

Postfach 4120  
39016 Magdeburg

### Sekretariate:

Frau Baumgarten  
Gebäude: 09, Raum 124  
Tel.: (0391) 67 18592  
Fax: (0391) 67 12408  
E-mail: melanie.baumgarten@et.uni-magdeburg.de

Frau Honymus  
Gebäude: 03, Raum 129  
Tel.: (0391) 67 18596  
Fax: (0391) 67 12481  
martina.honymus@et.uni-magdeburg.de

### URL:

Institut  
Lehrstuhl für Leistungselektronik  
Lehrstuhl Allgemeine Elektrotechnik/Elektrische Aktorik  
Fachgebiet Elektrische Antriebssysteme  
Lehrstuhl Elektrische Netze und Alternative Elektroenergiequellen

[www.uni-magdeburg.de/iesy](http://www.uni-magdeburg.de/iesy)  
[www.uni-magdeburg.de/llge](http://www.uni-magdeburg.de/llge)  
[www.uni-magdeburg.de/ieat/Lehrstuhl/lehrst.html](http://www.uni-magdeburg.de/ieat/Lehrstuhl/lehrst.html)  
[www.uni-magdeburg.de/iesy/homepage/hprief.htm](http://www.uni-magdeburg.de/iesy/homepage/hprief.htm)  
[www.uni-magdeburg.de/fet/iesy/lena](http://www.uni-magdeburg.de/fet/iesy/lena)

## Vorwort

Mit diesem Institutsbericht möchten wir einen Einblick geben in das Wirken unseres Instituts für Elektrische Energiesysteme an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg im Jahr 2005. Innerhalb der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik zeichnen die vier zugehörigen Professuren verantwortlich für Lehre und Forschung auf den Gebieten der elektrischen Aktorik und Antriebstechnik, der Netze und alternativen Elektroenergiequellen, sowie der Leistungselektronik.

Das Angebot von Lehrveranstaltungen wird im Grund- und Hauptstudium von Studierenden der Diplomstudiengänge unserer Fakultät gehört, für welche die Vertiefungsrichtungen Elektrische Energietechnik bzw. Informationstechnik elektrischer Energiesysteme angeboten und in erfreulichem Maße angenommen werden, wie die am Institut durchgeführten studentischen Studien- und Diplomarbeiten belegen. Eine nicht unerhebliche Zahl von Studierenden wird außerdem im deutschsprachigen Masterstudiengang Elektrische Energiesysteme ausgebildet; hier findet ein reger Austausch mit Partnerhochschulen, insbesondere der TU Donetsk sowie der TU Wroclaw/Breslau statt. Nicht unerwähnt bleiben sollen außerdem Lehrveranstaltungen für gemeinsam mit anderen Fakultäten ausgerichtete Studiengänge sowie darüber hinaus elektrotechnische Grundlagenausbildung innerhalb verschiedener Curricula. Maßgeblich sind wir darüber hinaus an einer die Qualität der Lehre beibehaltenden und sichernden Weiterentwicklung der Studiengänge Elektrotechnik und Informationstechnologie unter Einführung einer gestuften Struktur beteiligt.

Das Institut möchte so einen Beitrag zur Ausbildung junger Menschen leisten, deren Qualifikation in elektrischer Energietechnik beständig in Industrie und Wissenschaft nachgefragt wird. Die praktizierte internationale Kooperation bereichert hierbei den Erfahrungshorizont unserer Studierenden, die an wissenschaftlichem Austausch über Grenzen hinweg und europäischer Integration unmittelbar teilhaben.

Die Forschung am Institut ist durch enge Verzahnung grundlagenorientierter, theoretischer Untersuchungen mit experimentellen Arbeiten gekennzeichnet, so dass die Ergebnisse der ersteren mit den letzteren verifiziert werden können. In verschiedenen Projekten erfolgt darüber hinaus ein Transfer anwendungsorientierter Technologie zu Partnern, so dass eine für beide Seiten vorteilhafte und effiziente Zusammenarbeit wachsen kann. Ausdrücklich danken möchten wir an dieser Stelle all jenen öffentlichen Institutionen und Unternehmen, die unsere Arbeiten durch Bereitstellung umfangreicher Mittel und Kooperationen unterstützt haben, ohne die viele Projekte nicht umsetzbar gewesen wären. Für die Zukunft planen wir, uns mit fachspezifischen Beiträgen am hochschulweiten Forschungsschwerpunkt Automobiltechnik zu beteiligen.

Die Ergebnisse der Forschungsarbeiten aus diesem Jahr sind in verschiedenen Veröffentlichungen dokumentiert, zu denen erfreulicherweise auch wieder Dissertationschriften zählen.

So haben einige Doktoranden nach ihrer Promotion unser Institut verlassen, um ihre Karriere in der Industrie fortzusetzen; erfreulicherweise konnten die entstehenden Lücken mit jungen wissenschaftlichen Mitarbeitern wieder geschlossen werden. Allen unseren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern möchten wir an dieser Stelle Dank und Anerkennung für ihren Einsatz in Lehre, Forschung, Verwaltung und allem weiteren, das einen gedeihlichen Institutsbetrieb auszeichnet, aussprechen.

Die Gliederung des vorliegenden Berichtes lehnt sich im wesentlichen an die Ausführungen in diesem Vorwort an: Einem Überblick zur personellen Besetzung folgen nach Lehrstühlen sortierte Informationen zu Lehrveranstaltungen sowie studentischen Arbeiten und zu den

Forschungsgebieten bzw. -projekten einschließlich daraus hervorgegangener Publikationen und Dissertationen.

Wir danken Ihnen, unseren Freunden, Förderern, Partnern und Kollegen für Ihr Interesse und wünschen eine informative Lektüre.

im Dezember 2005

Prof. Dr.-Ing. A. Lindemann

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Personalia.....</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Studium und Lehre.....</b>	<b>7</b>
2.1	Lehrstuhl Allgemeine Elektrotechnik/Elektrische Aktorik.....	7
2.1.1	Vorlesungen, Übungen und Praktika.....	7
2.1.2	Abgeschlossene Studienarbeiten und Forschungsprojekte.....	11
2.1.3	Abgeschlossene Diplom- und Masterarbeiten.....	11
2.2	Fachgebiet Elektrische Antriebssysteme.....	12
2.2.1	Vorlesungen, Übungen und Praktika.....	12
2.2.2	Abgeschlossene Studienarbeiten und Forschungsprojekte.....	16
2.2.3	Abgeschlossene Diplom- und Masterarbeiten.....	16
2.3	Lehrstuhl Elektrische Netze und Alternative Elektroenergiequellen.....	17
2.3.1	Vorlesungen, Übungen und Praktika.....	17
2.3.2	Abgeschlossene Studienarbeiten und Forschungsprojekte.....	21
2.3.3	Abgeschlossene Diplom- und Masterarbeiten.....	22
2.4	Lehrstuhl für Leistungselektronik.....	23
2.4.1	Vorlesungen, Übungen und Praktika.....	23
2.4.2	Abgeschlossene Studienarbeiten und Forschungsprojekte.....	29
2.4.3	Abgeschlossene Diplom- und Masterarbeiten.....	29
2.5	Institutsebene.....	30
2.5.1	Kooperationen.....	30
2.5.2	Exkursionen.....	35
2.5.3	Studienwerbung.....	38
<b>3</b>	<b>Forschung.....</b>	<b>39</b>
3.1	Lehrstuhl Allgemeine Elektrotechnik/Elektrische Aktorik.....	39
3.1.1	Forschungsprofil.....	39
3.1.2	Forschungsprojekte.....	40
3.1.3	Promotionen.....	53
3.1.4	Veröffentlichungen.....	55
3.2	Fachgebiet Elektrische Antriebstechnik.....	57
3.2.1	Forschungsprofil.....	57
3.2.2	Forschungsprojekte.....	57
3.2.3	Veröffentlichungen.....	62

3.3	Lehrstuhl Elektrische Netze und Alternative Elektroenergiequellen.....	63
3.3.1	Forschungsprofil.....	64
3.3.2	Forschungsprojekte.....	65
3.3.3	Promotionen.....	97
3.3.4	Veröffentlichungen.....	99
3.4	Lehrstuhl für Leistungselektronik.....	102
3.4.1	Forschungsprofil.....	102
3.4.2	Forschungsprojekte.....	104
3.4.3	Promotionen.....	118
3.4.4	Veröffentlichungen.....	120
3.5	Institutsebene.....	122
3.5.1	Kooperationen.....	122
3.5.2	Kolloquien.....	123

# 1 Personalia

## **Institutsvorstand:**

Prof. Dr.-Ing. Andreas Lindemann (geschäftsführender Leiter)

Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Palis

Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Riefenstahl

Prof. Dr.-Ing. Zbigniew Antoni Styczynski (Dekan)

Dr.-Ing. Reinhard Döbbelin

## **Hochschullehrer:**

Prof. Dr.-Ing. Andreas Lindemann

Lehrstuhl für Leistungselektronik

Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Palis

Lehrstuhl Allgemeine Elektrotechnik/Elektrische Aktorik

Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Riefenstahl

Fachgebiet Elektrische Antriebssysteme

Prof. Dr.-Ing. Zbigniew Antoni Styczynski

Lehrstuhl Elektrische Netze und Alternative Elektroenergiequellen

## **Lehrbeauftragte:**

Dr.-Ing. Rainer Krebs / Dr.-Ing. Waldemar Rebizant

Netzschutz- und Leittechnik

Dr.-Ing. Antje Orths

Windenergie

## **Sekretariate:**

Melanie Baumgarten

Martina Honymus

## **Wissenschaftliche Mitarbeiter:**

M. Sc. Angel Angelov

Dipl.-Ing. Andreas Bannack

Dr.-Ing. Reinhard Döbbelin

M. Sc. Denis Draganov

Dipl.-Ing. Cezary Dzienis

Dipl.-Ing. Andreas Ecklebe

Dr.-Ing. Wolfgang Fischer

Dipl.-Ing.(FH) Stefan Förster (seit 01.06.2005)

Dr.-Ing. Biljana Hadzi-Kostova

M. Sc. Jens Haubrock

Dipl.-Ing. Günter Heideck

Dipl.-Ing. Chris-Oliver Heyde (seit 15.10.2005)

Dipl.-Phys. Ronny Herms

Dipl.-Ing. Enrico Hettkamp

M. Sc. Przemyslaw Komarnicki  
M. Sc. Mykhaylo Konyev  
Dipl.-Ing. Jens Kroitzsch  
M. Sc. Oleksandr Krykunov  
Dipl.-Ing. Anna Lebioda  
Dr.-Ing. Igor Merfert  
Dipl.-Ing. Hans-Dieter Musikowski  
Dr.-Ing. Antje Orths (bis 31.05.2005)  
Dr.-Ing. Mathias Purmann (bis 31.05.2005)  
Dr.-Ing. Klaus Riemekasten  
Dipl.-Ing. Krzysztof Rudion  
Dipl.-W.-Ing. Thomas Schallschmidt  
M. Sc. Tomasz Smieja (seit 15.06.2005)  
Dr.-Ing. Oleksandr Sobolyev (bis 15.09.2005)  
Dipl.-Ing. Sergiy Sokolov  
M. Sc. Oleksandr Tyshakin  
Dr.-Ing. Erhard Weise  
Dipl.-Ing. Thoralf Winkler  
M. Sc. Yuriy Zavgorodniy

**Ökonomie:**

Martina Krieger

**Leiterplattenlabor/Rechnernetz\*):**

Dipl.-Ing. Uwe Göranson

**Werkstofflabor/HS-Videotechnik\*):**

Dipl.-Ing. Katharina Mecke

**Bibliothek/Reprotechnik\*):**

Elke Schwarz

**Institutswerkstatt\*):**

Jens-Uwe Schulz (Meister)

Bernd Hoppe

Lothar Griep

Marco Neumann (Auszubildender)

Benjamin Werner (Auszubildender)

Thomas Ebert (Auszubildender)

Marie Spitschan (Auszubildende)

---

\*)gemeinsam mit dem Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Elektromagnetische Verträglichkeit (IGET)



## 2 Studium und Lehre

### 2.1 Lehrstuhl Allgemeine Elektrotechnik/Elektrische Aktorik

#### 2.1.1 Vorlesungen, Übungen und Praktika

Legende:

SS	Sommersemester
WS	Wintersemester
V	Vorlesung
Ü	Übung
P	Praktikum
SWS	Semesterwochenstunden

#### **Digitale Antriebsregelung**

SS V 2 SWS:  
Ü 1 SWS:

Inhalt:

In der Lehrveranstaltung werden anwendungsorientierte Kenntnisse zur digitalen Regelung am Beispiel von geregelten elektrischen Antrieben vermittelt. Es werden die grundlegenden mathematischen Methoden zur Berechnung digitaler Systeme (z-Transformation, w-Transformation, diskreter Zustandsraum) betrachtet. Am Beispiel von elektrischen Antriebssystemen werden die gebräuchlichsten Methoden zur Auswahl und Dimensionierung digitaler Regler behandelt. Spezielles Augenmerk wird hierbei auf die Echtzeitfähigkeit der behandelten Regelalgorithmen gelegt. In mathematisch verständlicher Form wird auf robuste Reglerkonzepte eingegangen. Die theoretischen Zusammenhänge werden in den Übungen in der Regel durch Matlab/Simulink-Simulationen anwendungsnah demonstriert.

#### **Digital control of electrical drives**

Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Palis  
Dipl.-W.-Ing. Thomas Schallschmidt

#### **Elektrische Antriebe und Aktorik**

SS V 2 SWS:  
Ü 1 SWS:

Inhalt:

Stationäres und nichtstationäres Betriebsverhalten elektrischer Antriebe, Drehzahlstellmöglichkeiten, mathematische Beschreibung des Betriebsverhaltens elektrischer Antriebe in Raumzeigerdarstellung, leistungselektronische Stellglieder für elektrische Antriebe, Grundbegriffe der Regelung elektrischer Antriebe, Feldorientierte Regelung von Drehfeldmaschinen, Auswahl und Dimensionierung elektrischer Antriebssysteme, Systemintegration elektrischer Antriebe und Aktoren (allgemeingültige Herangehensweise und Betrachtung typischer Einsatzbeispiele).

#### **Electrical drives and actuator systems**

Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Palis  
Dr.-Ing. Klaus Riemekasten

**Elektrische Maschinen und Aktoren      Electrical machines and actuators**

SS    V 2 SWS:                                      Dr.-Ing. Klaus Riemekasten  
      Ü 1 SWS:                                      Dr.-Ing. Klaus Riemekasten

**Inhalt:**

Es werden der grundsätzliche technische Aufbau sowie das elektrische und mechanische Verhalten elektrischer Maschinen und Aktoren, die Betriebsbedingungen und Normen von Maschinen und Geräten behandelt. Die Fertigkeiten zur Berechnung des elektrischen und magnetischen Verhaltens; zum Erstellen von Ersatzschaltbildern, Zeigerdiagrammen und Ortskurven; zur Entwicklung technischer Anwendungen aus physikalischen Wirkprinzipien, zur Abschätzung der Einsatzfelder hinsichtlich Stellmöglichkeiten, Betriebsbedingungen und Leistungen werden vermittelt.

**Elektrische Antriebe II (Praktikum)      Laboratory electrical drives II**

WS    P 1 SWS:                                      Dr.-Ing. Klaus Riemekasten  
    Dr.-Ing. Erhard Weise  
    Dipl.-Ing. Andreas Bannack

**Inhalt:**

Es werden 5 Versuche angeboten, von denen 4 Versuche erfolgreich durchgeführt werden müssen.

**Elektromechanische Aktorsysteme      Electromechanical actuator systems**

SS    V 2 SWS:                                      Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Palis  
    Dipl.-W.-Ing. Thomas Schallschmidt  
WS    V 2 SWS:                                      Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Palis  
      Ü 1 SWS:                                      Dipl.-W.-Ing. Thomas Schallschmidt

**Inhalt:**

Die Lehrveranstaltung behandelt unkonventionelle Wirkprinzipien zur Wandlung von elektrischer in mechanische Energie und deren Anwendung in elektromechanischen Aktoren. Es wird schwerpunktmäßig auf die physikalische Erscheinung des piezoelektrischen und magnetostriktiven Effektes sowie auf die Besonderheiten von elektrorheologischen Flüssigkeiten und Formgedächtnismetallen eingegangen. Parallel dazu werden Möglichkeiten und spezielle Konstruktionsformen zur Ausnutzung dieser Effekte in der Aktorik dargestellt. Hierbei werden neben den einzelnen Aktortypen auch spezielle Fragen der dazugehörigen leistungselektronischen Stellglieder und der Regelung von Aktorsystemen behandelt. Es wird auf spezielle Anwendungen eingegangen.

**Elektrotechnische Grundlagen I**

WS V 2 SWS:

Inhalt:

Es werden die Grundlagen der elektrischen Felder dargelegt (Strömungsfeld, elektrostatisches Feld). Energie- und Kraft- und Kapazitätsberechnungen werden für ausgewählte Beispiele demonstriert. Ebenso werden die Grundlagen der Magnetfeldberechnung (Energie und Kräfte), das Induktionsgesetz, transformatorische und translatorische Induktionsvorgänge sowie Selbst- und Gegeninduktion werden erläutert und Berechnungsmethoden dargelegt. Die Berechnung von Wechselstromkreisen (symbolische Berechnung, Zeigerbild-darstellungen) wird vermittelt. Resonanzerscheinungen, Leistungsberechnung sowie die Blindleistungskompensation werden an Hand von Beispielen erläutert. Drehstromsysteme, Verkettung, Leistungs- und Stromberechnungen werden an Hand praktischer Beispiele vorgestellt. Schutzmaßnahmen in Niederspannungsanlagen (Grund-, Fehler- und Zusatzschutz) werden erläutert, Schaltungen werden vorgestellt und deren Wirkungsweisen erklärt.

**Fundamentals of electrical engineering**

Dr.-Ing. Erhard Weise

**Elektrosicherheit**

WS V 1 SWS:

Inhalt:

Diese Lehrveranstaltung gibt Einblick in den Komplex der Sicherheitstechnik in der Elektrotechnik. Sie ist für „Nichtfachleute“ der Elektrotechnik konzipiert und setzt die universitäre Ingenieurausbildung „Elektrotechnik im Nebenfach“ voraus. Auf der Basis einer Rechtsanalyse für Errichter, Betreiber und Konstrukteure werden speziell für elektrische Niederspannungsanlagen und elektrische Geräte (< 1000V Betriebsspannung), die geltenden Schutzmaßnahmen, Schutzklassen und Schutzgrade erläutert. Es wird die Zielsetzung dieser elektrischen Sicherheitstechnik, bestehend aus Basisschutz, Fehlerschutz und Zusatzschutz, erklärt. Schaltungstechnische Wirkungsweisen, Klassifizierungen und Schutzgrade werden erläutert. Die Prüfungen elektrischer Geräte und Anlagen hinsichtlich Nutzbarkeit, Sicherheit und Verantwortlichkeiten werden vorgestellt. Grundgedanken zu Elektromog und elektromagnetischer Verträglichkeit werden dargelegt.

Dr.-Ing. Erhard Weise

**Elektrotechnik/Elektronik**

SS V 2 SWS:

Ü 1 SWS:

P 2 SWS:

WS V 2 SWS:

Ü 1 SWS:

**Electrical engineering and electronics**

Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Palis

Dr.-Ing. Erhard Weise

Dr.-Ing. Klaus Riemekasten,

Dr.-Ing. Erhard Weise

Dipl.-W.-Ing. Thomas Schallschmidt

Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Palis

Dipl.-W.-Ing. Thomas Schallschmidt

Dipl.-Ing. Hans-Dieter Musikowski

Dr.-Ing. Reinhard Döbbelin

Dr.-Ing. Erhard Weise

Dipl.-Ing. Stefan Förster

Inhalt:

Die Lehrveranstaltung wendet sich an Studenten nichtelektrotechnischer Studienrichtungen und vermittelt anwendungsbezogenes Grundwissen und läuft über 2 Semester. Sie beginnt im Wintersemester mit einer kurzen Darstellung der Grundgrößen der Elektrotechnik und der Betrachtung von Gleichstromkreisen. Dadurch wird der Hörer in die spezifische Betrachtungsweise des Elektrotechnikers eingeführt. Daran schließen sich die Komplexe „Elektrisches und magnetisches Feld“ und „Wechselstromtechnik“ an. Es wird eine kurze Einführung in die Halbleitertechnik gegeben.

### **Netzrückwirkungen**

SS, V 2 SWS:

WS Ü 1 SWS:

Inhalt:

In dieser Lehrveranstaltung werden die im Zusammenwirken von Stellgliedern mit dem Elektroenergienetz auftretenden Oberwellen und Resonanzerscheinungen systematisiert und erläutert. Die wichtigsten ingenieurtechnischen Berechnungsverfahren, mit deren Hilfe die Einhaltung der bestehenden Elektroenergiequalitätsforderungen berechnet werden können, werden vorgestellt und in zugehörigen Seminaren an praktischen Beispielen erläutert. Dem Studierenden wird damit die Lösung der Aufgaben, beim Einsatz von Stromrichtern den Nachweis der Sicherung der Energiequalität zu erbringen, die dazu notwendigen Geräte und Einrichtungen auszuwählen und zu dimensionieren, dargelegt. Dem Ingenieur - und damit Verbraucher und Energielieferer, werden praktisch verwertbare Kenntnisse vermittelt, um nicht nur unter - worst case - Bedingungen entsprechende Anlagen zu projektieren, sondern ökonomisch und technisch sinnvoll wirksam zu werden.

### **Electrical power quality**

Dr.-Ing. Erhard Weise

Dr.-Ing. Erhard Weise

### **Neuro- und Fuzzycontrol**

SS V 2 SWS:

Ü 1 SWS:

Inhalt:

Die Lehrveranstaltung behandelt die Grundlagen der Fuzzy Set Theory und Grundstrukturen neuronaler Netze. Es wird die Wirkungsweise eines Mamdani- und Sugeno-reglers dargestellt und ihre Besonderheiten an einem Beispiel praktisch illustriert. Ausgehend von der biologischen Struktur eines Neurons werden verschiedene Modelle künstlicher Neuronen und mögliche Netzstrukturen behandelt. Es wird ausführlich auf Lernmethoden eingegangen und ihre Vor- und Nachteile an Hand von Simulationsaufgaben demonstriert. Als praktisches Anwendungsgebiet für neuronale Netze wird auf die Regelung nichtlinearer Elektroantriebssysteme eingegangen und es werden verschiedene Regelkonzepte betrachtet. Den Abschluss der Lehrveranstaltung bilden Neuro-Fuzzysysteme, die am Beispiel des ANFIS näher untersucht werden.

### **Neural and fuzzy control**

Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Palis

Dipl.-W.-Ing. Thomas Schallschmidt

### **Robotersysteme**

SS V 2 SWS:

Ü 1 SWS:

Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Palis

Dipl.-W.-Ing. Thomas Schallschmidt

### 2.1.2 Abgeschlossene Studienarbeiten und Forschungsprojekte

- ♦ Becker, S.:  
**Optimierung eines sechsbeinigen Schreitroboters**
- ♦ Schmidt, M.:  
**Kontaktregelung von kooperierenden Robotern**
- ♦ Kotelnitzki, D.:  
**Reinforcement learning für mobile Roboter**
- ♦ Ruta, D.:  
**Mamdani-Regler mit ANFIS**
- ♦ Vasilyev, S.:  
**Datenanalyse für selbstorganisierende Netzwerke**
- ♦ Gladchenko, M.:  
**Reinforcement Learning Algorithmen für ANFIS**
- ♦ Gorbutyak, M.:  
**Regelung eines Magnetlagers mit Kalmanfilter**
- ♦ Andriy, T.:  
**Entwicklung eines vernetzten mikrocontrollergestützten Steuerungssystems für mobile Roboter**

### 2.1.3 Abgeschlossene Diplom- und Masterarbeiten

- ♦ Luft, T.:  
**Regelung eines Einfreiheitsgradmagnetlagers**
- ♦ Biryukov, K.:  
**Entwicklung von on-line Lernalgorithmen für Fuzzysysteme**
- ♦ Zvonarov, A.:  
**Entwurf und Modellierung eines Kraft/Position Reglers für Joystick mit 6 Freiheitsgraden und Krafrückführung**
- ♦ Demidov, M.:  
**Impedanzregelung von Robotern**
- ♦ Shevchenko, M.:  
**Experimentelle und Simulationsuntersuchungen der statischen Eigenschaften von elektromagnetischen Aktoren**

## 2.2 Fachgebiet Elektrische Antriebssysteme

### 2.2.1 Vorlesungen, Übungen und Praktika

Legende:

SS	Sommersemester
WS	Wintersemester
V	Vorlesung
Ü	Übung
P	Praktikum
SWS	Semesterwochenstunden

#### **Elektrische Antriebe I**

WS V 2 SWS:

Ü 1 SWS:

P 1 SWS:

#### **Electric drives I**

Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Riefenstahl

Dr.-Ing. Klaus Riemekasten

Dipl.-Ing. Andreas Bannack

Dipl.-Ing. Andreas Bannack

**Inhalt:**

Aufgaben und Struktur eines elektrischen Antriebssystems, Kenngrößen von Bewegungsvorgängen, Mechanik des Antriebssystems (Bewegungsgleichung und Beschreibung der Bewegungsgrößen), typische Widerstandsmomenten-Kennlinien von Arbeitsmaschinen, Anlauf und Bremsung eines Antriebssystems, stabiler Arbeitspunkt, das mechanische Übertragungssystem), stationäres und dynamisches Verhalten von ausgewählten elektrischen Maschinen (Gleichstrom-Nebenschlussmaschinen, Asynchronmaschinen mit Schleifring- und Kurzschlussläufer, Synchronmaschinen), Schaltungsanordnungen für Anlauf, Bremsung und Drehzahlstellung elektrischer Antriebe, Strukturen binär gesteuerter Antriebe mit Asynchronmaschinen, Strukturen drehzahl geregelter elektrischer Antriebe und von elektrischen Antrieben in Lageregelungen.

#### **Elektrische Antriebe II**

SS V 2 SWS:

Ü 1 SWS:

WS P 1 SWS:

#### **Electric drives II**

Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Riefenstahl

Dipl.-Ing. Andreas Bannack

Dipl.-Ing. Andreas Bannack

Dr.-Ing. K. Riemekasten

Dr.-Ing. E. Weise

**Inhalt:**

Auswahl elektrischer Maschinen (Auswahlkriterien, Verlustleistung und thermische Vorgänge in elektrischen Maschinen, thermische Auswahl elektrischer Maschinen, Betriebsarten und Nennbetriebsarten), Bestimmung der Typenleistung elektrischer Maschinen (Verluste in elektrischen Maschinen, Effektivwert des Motordrehmoments, Schaltverluste, Drehmomenten-Überlastbarkeit elektrischer Maschinen), Motorschutz (Anforderungen, Schutzgrade, Geräte und Einstellungen), leistungselektronische Stellglieder für elektrische Antriebe (Übersicht und Einteilung der Stellglieder, Schaltverhalten leistungselektronischer Bauelemente), Leistungselektronische Stellglieder für Gleichstromantriebe (Grundsaltungen und Kennwerte, Ersatzschaltung, Oberschwingungsgehalt, Übertragungsverhalten, Stromrichtertransformator, Schutz von Stromrichteranlagen), stromrichtergespeiste Gleichstromantriebe (Stationäres und dynamisches Verhalten, Gleichungen und Kennlinienfeld, dynamisches Verhalten, Stromrichter-Reversierantriebe), stromrichtergespeiste Drehstromantriebe (Prinzipielle Realisierungsarten, Stellgrößen und Stellglieder, Kennlinien, Regelstruktur, Einsatzbereiche).

**Intelligente Bewegungssteuerungen  
elektromechanischer Systeme**

SS V 2 SWS:  
Ü 1 SWS:

**Intelligent motion control**

Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Riefenstahl  
Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Riefenstahl

Inhalt:

Optimale Steuerung von Bewegungsvorgängen (Arten und mathematische Beschreibung, Ziel- und Gleichlaufsteuerung, Freiheitsgrade, Zustandsgleichung, Gütefunktional, zeit- und energieoptimale Bewegungsvorgänge, polyoptimale Steuerungen), Anwendung optimaler Bewegungsvorgänge im Maschinen- und Anlagenbau (Werkzeugmaschinen, Schachtförderanlagen, automatisierte Krane, Walzwerksanlagen, Anlagen zur Textil- und Papierherstellung sowie -verarbeitung), Realisierung optimaler Zielsteuerungen (Zielsteuerungen mit nicht-linearen Reglern sowie mit Sollwertrechnern und parameteroptimierter Folgeregelung), Optimierung des Folgeverhaltens von elektrischen Antrieben (Führungs- und Störverhalten, Sollwertvorsteuerung, Störgrößenkompensation, Zustandsregelung elastischer Antriebe mit Beobachter), Gleichlaufregelung von technologisch verketteten Antrieben (Zugkraft- und Lastausgleichsregelung, Regelung von Wickelantrieben, Gleichlaufregelung von Twin-drive-Antrieben, Sollwertführung von technologisch verketteten Mehrmotoren-Antriebsanlagen)

**Intelligente Elektroantriebssysteme**

SS V 2 SWS:  
Ü 1 SWS:  
WS V 3 SWS:  
Ü 1 SWS:  
P 1 SWS:

**Advanced electric drives**

Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Riefenstahl  
Dipl.-Ing. Andreas Bannack  
Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Riefenstahl  
Dipl.-Ing. Andreas Bannack  
Dipl.-Ing. Andreas Bannack

Inhalt:

Struktur und Funktionsgruppen intelligenter elektrischer Antriebssysteme, Steuer- und Regeleinrichtung, Regelverfahren, Drehzahlregelung von Gleichstromantrieben (Regelstrecke, Signalflussplan, Zeitkonstanten, Drehzahlregelung mit unterlagerter Ankerstromregelung, Regelung von Umkehrantrieben, adaptive Ankerstromregelung im Stromlückbereich, Drehzahlregelung im Feldschwächbereich), Regelstrukturen von Drehfeldantrieben (Regelstrukturen für Asynchronmaschinen und Synchronmaschinen), Feldorientierte Regelung von umrichter gespeisten Drehfeldantrieben (Signalflussplan in Feldkomponenten, Strangstrom-, Drehzahl- und Feldregelung), Elektrische Stellantriebe (Schrittantriebe, Lage- und Positionierregelungen), Regelung von Antrieben mit elastischen Übertragungsgliedern (Einfluss der Lose und der elastischen Übertragungsglieder, Maßnahmen zur Schwingungskompensation).

### **Intelligent Motion Control**

SS V 2 SWS:

Ü 1 SWS:

Inhalt:

Optimale Steuerung von Bewegungsvorgängen (Arten und mathematische Beschreibung, Ziel- und Gleichlaufsteuerung, Freiheitsgrade, Zustandsgleichung, Gütefunktional, zeit- und energieoptimale Bewegungsvorgänge, polyoptimale Steuerungen), Anwendung optimaler Bewegungsvorgänge im Maschinen- und Anlagenbau (Werkzeugmaschinen, Schachtförderanlagen, automatisierte Krane, Walzwerksanlagen, Anlagen zur Textil- und Papierherstellung sowie -verarbeitung), Realisierung optimaler Zielsteuerungen (Zielsteuerungen mit nichtlinearen Reglern sowie mit Sollwertrechnern und parameteroptimierter Folgeregelung), Optimierung des Folgeverhaltens von elektrischen Antrieben (Führungs- und Störverhalten, Sollwertvorsteuerung, Störgrößenkompensation, Zustandsregelung elastischer Antriebe mit Beobachter), Gleichlaufregelung von technologisch verketteten Antrieben (Zugkraft- und Lastausgleichsregelung, Regelung von Wickelantrieben, Gleichlaufregelung von Twin-drive-Antrieben, Sollwertführung von technologisch verketteten Mehrmotoren-Antriebsanlagen)

### **Intelligent Motion Control**

Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Riefenstahl

Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Riefenstahl

### **Regelung elektrischer Energiesysteme**

WS V 2 SWS:

Ü 1 SWS:

Inhalt:

Struktur und Funktionsgruppen intelligenter elektrischer Energiesysteme, Steuer- und Regeleinrichtung, Beschreibungsmodelle für das dynamische Verhalten kontinuierlicher und diskontinuierlicher Regelstrecken, Optimierung kontinuierlicher und diskontinuierlicher einschleifiger Regelkreise bei Führungs- und Störgrößenänderungen, Abtastregelungen, Kaskadenregelungen, Zustandsregelung und adaptive Regelungen, typische Anwendungsbeispiele.

### **Control of electrical power systems**

Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Riefenstahl

Dipl.-Ing. Andreas Bannack

### **Speicherprogrammierbare Antriebssteuerungen**

WS V 2 SWS:

Ü 1 SWS:

Inhalt:

Aufgaben und Einsatzgebiete, Steuerschaltungen für Asynchronmaschinen (zum Anlassen, Bremsen, Reversieren und zur Drehzahlsteuerung), binäre Steuerungstechnik (Realisierungsarten, Automatenstrukturen, dynamisches Verhalten und Optimierung binärer Steuerungen, Vollständigkeit und Widerspruchsfreiheit), SPS-Anlagen für Antriebssteuerungen (Darstellung, Beschreibungsarten, Fachsprachen, Programmierung, Testung und Inbetriebnahme), binäre Maschinen- und Anlagensteuerungen, Programmierübungen an SPS-gesteuerten Antriebsanlagen, Steuerung von Industrierobotern (Grundbegriffe, Roboterantriebe, Bewegungsraum, Koordinatentransformation, Fachsprachen, Positioniergenauigkeit, praktische Programmierübungen), speicherprogrammierbare Antriebsregelungen (Realisierungsarten, Programmstrukturen, digitale Messwerterfassung von Strom, Spannung, Drehzahl und Lage, Beschreibungsarten und Programmieroberflächen, Parametrierung von Umrichteranlagen, praktische Übungen an einer Antriebsautomatisierungsanlage mit einem DSP-Netzwerk).

### **Programmable controlled electrical drives**

Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Riefenstahl

Dipl.-Ing. Andreas Bannack



**Umrichtergesteuerte  
Drehstromantriebe**

WS V 2 SWS:

Ü 1 SWS:

Inhalt:

Signalflussplan von Drehfeldmaschinen mit Ständerstrom- und Ständerspannungssteuerung in Feldkomponenten, Umrichterstellglieder (Arten, Schaltungstopologien, der Umrichter als Zustandsautomat, Realisierungsarten der Pulssteuerung), Prinzip der Feldorientierten Regelung, Strangstromregelung mit unterschiedlichen Stellgliedern, Drehzahl- und Feldregelung von Asynchron- und Synchronmaschinen.

**Inverter-fed A.C. drives**

Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Riefenstahl

Dipl.-Ing. Andreas Bannack

## 2.2.2 Abgeschlossene Studienarbeiten und Forschungsprojekte

- ♦ Friedenberger, J.:  
**Identifikation einer Regelstrecke**
- ♦ Bessarab, Y.:  
**Funktionsmodell einer feldorientierten Regelung (HIL)**

## 2.2.3 Abgeschlossene Diplom- und Masterarbeiten

- ♦ Kononenko, O.:  
**Feldorientierte Regelung einer Asynchronmaschine mit einem zweistufigen Direktumrichter als Stellglied**
- ♦ Bezuglyy, A.:  
**Untersuchung der Minimalzugregelung in Profilwalzstraßen**
- ♦ Medvedyeva, K.:  
**Polyoptimale Bewegungssteuerung von Stellantrieben**

## 2.3 Lehrstuhl Elektrische Netze und Alternative Elektroenergiequellen

### 2.3.1 Vorlesungen, Übungen und Praktika

Legende:

SS	Sommersemester
WS	Wintersemester
V	Vorlesung
Ü	Übung
P	Praktikum
SWS	Semesterwochenstunden

#### **Alternative Energien / Regenerative Elektroenergiequellen**

WS V 2 SWS: Prof. Dr.-Ing. Zbigniew Antoni Styczynski  
Ü 1 SWS: Dipl.-Ing. Hans-Dieter Musikowski

**Inhalt:**

Energiebilanz der Erde, photovoltaische Stromerzeugung (physikalische Grundlagen, systematische Beschreibung, Potentiale, Kosten), Stromerzeugung aus Wind (physikalische Grundlagen, systematische Beschreibung, Potentiale, Kosten), Brennstoffzelle (Grundlagen, Systeme), andere alternative Energiequellen (Wasserkraft, Erdwärme, Biomasse), Energiespeicher (Supraleiter, Schwungrad, Batterien). Netzkonzepte mit alternativen Energiequellen. Stand und Perspektiven des Einsatzes (technisch, wirtschaftlich).

#### **Elektrische Anlagen und Netze/ Elektrische Netze**

WS V 2 SWS: Prof. Dr.-Ing. Zbigniew Antoni Styczynski  
Ü 2 SWS: Dipl.-Ing. Jens Haubrock

**Inhalt:**

Die Vorlesung behandelt die Grundlagen des Netzbetriebes. Ersatzschaltungen der Betriebselemente; Energieübertragung über kurze Leitungen; Berechnung von Energieübertragungsanlagen und -netzen; Betrieb elektrischer Netze; Drehstromleitung, Synchrongenerator, Netzregelung, Leit- und Schutztechnik; Kurzschlussströme bei 3-poligem Kurzschluss; Symmetrische Komponenten, unsymmetrische Schaltungen in symmetrischen Komponenten; 1-poliger Kurzschluss und Erdkurzschluss; Sternpunktbehandlung; Schaltanlagenkonstruktion.

#### **Elektrische Netze (Praktikum)**

SS P 2 SWS: Dr.-Ing. Antje Orths

**Inhalt:**

Lastflussberechnung, Optimierung bei der Planung, Netzstabilität, Blindleistungskompensation, Distanzschutz, Kraftwerkeinsatzplanung, PLC-Technik, Kurzschlussberechnungen.

**Elektrische Netze und Anlagen  
(Praktikum)**

SS P 2 SWS:

Dipl.-Ing. Hans-Dieter Musikowski  
Dr.-Ing. Antje Orths

Inhalt:

Erwerb von Kenntnissen zur Auslegung und zur Wirksamkeit von Schutzeinrichtungen in Energieübertragungsnetzen, Erwerb von Fähigkeiten zum sicheren Umgang mit Hochspannung, Erwerb von Kenntnissen zur praktischen Anwendung hoher Spannungen.

**Energietechnisches  
Komplexpraktikum**

SS P 2 SWS:

Dipl.-Ing. Andreas Bannack  
Dr.-Ing. Reinhard Döbbelin  
Dr.-Ing. Wolfgang Fischer  
Dipl.-Ing. Hans-Dieter Musikowski  
Dr.-Ing. Antje Orths

Inhalt:

In den drei Komplexen Elektrische Antriebssysteme (KEA), Leistungselektronische Geräte und Anlagen (KLE) und Elektrische Netze und Alternative Elektroenergiequellen (KEN) werden jeweils 5-6 Versuche zur Auswahl angeboten.

**Expertensysteme in der elektrischen  
Energieversorgung**

SS V 2 SWS:

Prof. Dr.-Ing. Zbigniew Antoni Styczynski

Ü 1 SWS:

Dr.-Ing. Mathias Purmann

Inhalt:

Grundbegriffe der künstlichen Intelligenz. Einsatzgebiete der Expertensysteme in der Energieversorgung. Repetitorium der Prädikatlogik. Wissenserwerb und Wissensrepräsentation. Entscheidungen bei der nichtvollständigen Information. Fuzzy-Logik, Künstliche Neuronale Netze. Expertensysteme bei der Netzplanung und Netzdiagnose.

**Grundlagen der Elektrischen  
Energietechnik II**

WS V 2 SWS:

Ü 1 SWS:

**Introduction to electric power engineering -  
Power supply**

Prof. Dr.-Ing. Zbigniew Antoni Styczynski

Dipl.-Ing. Hans-Dieter Musikowski

Inhalt:

Elektrische Energieversorgung: Erzeugung elektrischer Energie (Wärme- und Kraftwerke regenerativer Energiequellen, Elektrizitätswirtschaft), Übertragung und Verteilung elektrischer Energie (Elektrische Netze, Kurzschlüsse in elektrischen Netzen, Elektrische Schaltanlagen, Personenschutz in elektrischen Anlagen).

gemeinsam mit dem Lehrstuhl für Leistungselektronik, vgl. Abschnitt 2.4.1

**Grundlagen elektrischer  
Energiesysteme**

SS V 2 SWS:  
Ü 1 SWS:

Inhalt:

Elektrische Energiesysteme – Hauptkomponenten; Thermische-, Wasser- und Kernkraftwerke; Drehstrom und Ersatzschaltbilder der Betriebsmittel; Kurzschlussrechnung; AC- und DC-Übertragung; Grundlagen der elektrischen Maschinen; Grundlagen der Leistungselektronik; Grundlagen der regenerativen Energieerzeugung; Netzbetrieb und Netzschutz - Grundlagen.

**Fundamental questions of power systems**

Prof. Dr.-Ing. Zbigniew Antoni Styczynski  
Dipl.-Ing. Hans-Dieter Musikowski

**Hochspannungstechnik/  
Elektroenergieversorgung**

SS V 2 SWS:  
Ü 1 SWS:

Inhalt:

Erwerb von Kenntnissen zum Aufbau und zur Funktion von Energieübertragungssystemen auf hohem Spannungsniveau, zur Beanspruchung von Isolierungen, zur hochspannungsgerechten Auslegung von Betriebsmitteln, zur Hochspannungsmesstechnik, Durchführung von Berechnungen zur Isolationsbeanspruchung, Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsrechnung in der Energietechnik – statische und dynamische Methoden; Zuverlässigkeitsrechnung; Aufgaben der Netzplanung: Organisation des deutschen Energiemarktes; Energiebörse

**High-voltage engineering**

Prof. Dr.-Ing. Zbigniew Antoni Styczynski  
Dr.-Ing. Heinz-Peter Scheibe

**Komplexpraktikum Elektrische  
Energietechnik**

SS P 3 SWS:

Inhalt:

Ergänzung und Vertiefung des Fachwissens in der elektrischen Energietechnik durch Erwerb praktischer Erfahrungen in den Wissensgebieten Elektrische Antriebssysteme, Leistungselektronische Geräte und Anlagen, Elektrische Netze und alternative Elektroenergiequellen, Elektromagnetische Verträglichkeit

Dipl.-Ing. Andreas Bannack  
Dr.-Ing. Reinhard Döbbelin  
Dr.-Ing. Wolfgang Fischer  
Dipl.-Ing. Hans-Dieter Musikowski  
Dr.-Ing. Antje Orths  
Dr.-Ing. Klaus Riemekasten

**Netzschutz und Leittechnik**

WS V 2 SWS:  
Ü 1 SWS:

Inhalt:

Grundlagen, Schutzgenerationen, Schutzprinzipien, analoge und digitale Signalaufbereitung, digitale Messalgorithmen, Entscheidungsmethoden und Logik, künstliche Intelligenz für Schutzzwecke, Beispiele

Dr.-Ing. Rainer Krebs (Gastdozent)  
M. Sc. Jens Haubrock

**Photovoltaische Energiesysteme**

SS V 2 SWS:

Ü 1 SWS:

Inhalt:

Energetisches Potential der Sonne, physikalische Grundlagen, photoelektrische Effekte in Halbleitern, photovoltaische Energiewandlung mit Solarzellen, Aufbau von Photovoltaikanlagen, Berechnung und Auslegung von Photovoltaikanlagen, Solar-Wechselrichter, Anwendung photovoltaisch erzeugter Elektroenergie

**Photovoltaic energy systems**

Dipl.-Ing. Hans-Dieter Musikowski

Dipl.-Ing. Hans-Dieter Musikowski

**Windenergie**

WS V 2 SWS:

Ü 1 SWS:

Inhalt:

Geschichte der Windnutzung, Potential der Windenergie, physikalische Grundlagen, Aerodynamik, Komponenten der Windkraftanlage, Generatoren, Netzprobleme, ökonomische Effizienz, Windenergie in der öffentlichen Diskussion

**Wind energy**

Dr.-Ing. Antje Orths (Gastdozentin)

M. Sc. Jens Haubrock

### 2.3.2 Abgeschlossene Studienarbeiten und Forschungsprojekte

- ♦ Schulze, F.:  
**Wirkungsgradbestimmung an einer autonomen PEM-Brennstoffzellenanlage**
- ♦ Lemke, A.:  
**Untersuchung der elektrischen Energiewandlung für ein autonomes Brennstoffzellensystem**
- ♦ Popescu, A.:  
**Erprobung und Variation von Routinen einer Brennstoffzellensteuerung mit multitaskfähigem Betriebssystem**
- ♦ Stamann, M.:  
**Aufbau und Inbetriebnahme eines Überwachungssystems für Brennstoffzellensysteme**
- ♦ Neumann, S.:  
**Aufbau und Untersuchung eines Feuchtemesssystems für Brennstoffzellensysteme**
- ♦ Antosik, J.:  
**Umwandlung der Windenergie am Flügel**
- ♦ Wuttke, M.:  
**Lastmodellierung mit dem Neuronale-Netze-Verfahren (Praktikum)**
- ♦ Salem, H.:  
**Weiterentwicklung und Implementierung eines E-Learning-Moduls zur Windenergienutzung**
- ♦ Ignatkin, D.:  
**Untersuchung der elektrischen Systeme mit der Spannungs- und Drehzahlregelung der Generatoren in PSS-NETOMAC**
- ♦ Baumecker, T.:  
**Entwicklung und Inbetriebnahme einer computerbasierten Mess- und Steuersoftware für eine autonome Brennstoffzellenanlage**

### 2.3.3 Abgeschlossene Diplom- und Masterarbeiten

- ♦ Heyde, C. O.:  
**Energiemanagementstrategien für netzgekoppelte PV-Anlagen mit Batteriespeichern**
- ♦ Ivanyshyna, K.:  
**Wirtschaftspolitische Optionen für erneuerbare Energieträger**
- ♦ Netzband, M.:  
**Schutzkonzepte in Verteilungsnetzen bei unterschiedlicher Sternpunkterdung**
- ♦ Loerke, M.:  
**Erstellen einer E-Learning-Plattform zur Thematik Netzschutztechnik**
- ♦ Theuring, St.:  
**Untersuchungen an einer PEM-Brennstoffzelle**
- ♦ Riedel, C.:  
**Implementierung und Erprobung von Optimierungsalgorithmen für ein PEM-Brennstoffzellensystem auf der Basis einer Mikroprozessorsteuerung**
- ♦ Lysiak, T.:  
**Statistische und stochastische Beschreibung des Versorgungsnetzes der Universität Magdeburg**
- ♦ Kafłowski, G.:  
**Aufbau eines Teststandes zur Modellierung von nichtlinearen Lasten mit Hilfe der CFA-Matrix**
- ♦ Antosik, J.:  
**Anwendung der künstlichen Intelligenz für die Regelung von Windkraftanlagen**
- ♦ Smieja, T.:  
**Entwicklung und Realisierung einer 3-D-virtuellen Lehrveranstaltung im Fach Alternative Energiequellen**



## 2.4 Lehrstuhl für Leistungselektronik

### 2.4.1 Vorlesungen, Übungen und Praktika

Legende:

SS	Sommersemester
WS	Wintersemester
V	Vorlesung
Ü	Übung
P	Praktikum
SWS	Semesterwochenstunden

#### **Einführung in die Leistungselektronik**

WS V 2 SWS:

Ü 1 SWS:

Inhalt:

Terminologie der Leistungselektronik, Grundsätze der Wirkungsweise leistungselektronischer Schaltungen, Führung und Taktung, Kommutierung, Benennung und Kennzeichnung von Stromrichterschaltungen, Schaltungstechnik und Funktion netzgeführter Gleich- und Wechselrichter, Gleichrichtertrafos, Leistungsbegriffe, Mehrquadrantenbetrieb, Netzgeführte Wechselstromumrichter, Wechsel- und Drehstromschalter und -steller

#### **Introduction to Power Electronics**

Dr.-Ing. Reinhard Döbbelin

Dr.-Ing. Reinhard Döbbelin

#### **Elektrothermische Prozesse**

WS V 2 SWS:

Ü 1 SWS:

Inhalt:

- ♦ Beschichtung
  - Prozess
  - Gerätetechnik
- ♦ Lichtbogenschweißen
  - Prozess
  - Gerätetechnik
- ♦ Widerstandsschweißen, Kondensator-Impulsschweißen
  - Prozess
  - Gerätetechnik
- ♦ Elektromagnetische Verträglichkeit
  - Netzurückwirkungen
  - leitungsgebundene Emission, Immission
  - Störstrahlung, Feldkompensation

#### **Power supplies for electro-thermal processes**

Prof. Dr.-Ing. Andreas Lindemann und Mitarbeiter

Dr.-Ing. Reinhard Döbbelin

**Entwurf leistungselektronischer  
Geräte und Anlagen**

SS V 2 SWS:  
Ü 1 SWS:

**Design of power electronic equipment**

Dr.-Ing. Reinhard Döbbelin  
Dr.-Ing. Reinhard Döbbelin

Inhalt:

- ♦ Rechentechnische Simulation leistungselektronischer Schaltungen am Beispiel des Simulationsprogramms SIMPLORER
- ♦ Modellbildung bei leistungselektronischen Bauelementen
- ♦ Besonderheiten der Messtechnik in der Leistungselektronik
- ♦ Funktionsprinzipien und Anwendung digitaler Messmittel
- ♦ Signalanalysesoftware
- ♦ Integration von Leistungshalbleitern
- ♦ Ausführung leistungselektronischer Baugruppen, Geräte und Anlagen u.a. unter konstruktiven, kühltechnischen und EMV-Aspekten

**Grundlagen der elektrischen  
Energietechnik I**

SS V 2 SWS:  
Ü 1 SWS:

**Introduction to electric power engineering - self  
commutated power electronic circuits**

Prof. Dr.-Ing. Andreas Lindemann  
Dr.-Ing. Reinhard Döbbelin  
Dipl.-Ing. (FH) Stefan Förster

Inhalt:

- ♦ Einführung
- ♦ Gleichstromsteller
  - Tiefsetzsteller
    - Funktion, Anwendungsbeispiel: Gleichstrom-Antrieb einer elektrischen Bahn
  - Hochsetzsteller
    - Funktion, Anwendungsbeispiel: Photovoltaik-Anlage
  - Zwei-Quadranten-Steller – Brücken-zweig
    - Funktion, Anwendungsbeispiel: Gleichstrom-Antrieb
- ♦ Bauelemente
  - Funktionsprinzip und Kenngrößen
    - MOSFET, IGBT, Diode, Aufbautechnik
- ♦ Schaltungsberechnung
  - Thermik: statisches Verhalten
    - Belastbarkeit, Gleichstrom, Getaktet
    - Beispiel: Gleichstromsteller
- ♦ H-Brücke (selbstgeführt mit Spannungszwischenkreis)
  - Herleitung Steuerverfahren: Pulsbreitenmodulation
  - Anwendungsbeispiele:
    - 4-Quadranten-Antrieb mit Gleichstrommaschine
    - Betrieb als Wechselrichter, z. B. in Photovoltaik-Anlagen
    - Betrieb als Gleichrichter

**Grundlagen der Elektrischen  
Energietechnik II**

WS V 2 SWS:  
Ü 1 SWS:

**Introduction to electric power engineering -  
Mains commutated power electronic circuits**

Prof. Dr.-Ing. Andreas Lindemann  
Dr.-Ing. Reinhard Döbbelin  
Dipl.-Ing. Stefan Förster

Inhalt:

- ♦ Netzgeführte Brückenschaltungen  
Schaltungen:
  - Ungesteuerter Gleichrichter
  - Vollgesteuerte Brückenschaltung
  - Halbgesteuerte Brückenschaltungen - symmetrisch, unsymmetrischFunktion:
  - Funktionsprinzip
  - Schaltungsberechnung für konstanten GleichstromNetzurückwirkungen  
Bauelemente: Thyristor
- ♦ Wechselstromsteller  
Funktion, Steuerverfahren

gemeinsam mit dem Lehrstuhl Elektrische Netze und Alternative Elektroenergiequellen, vgl. Abschnitt 2.3.1

**Grundlagen der elektrischen  
Energietechnik (Praktikum)**

SS P 1 SWS:

**Electric power engineering laboratory**

Dr.-Ing. Reinhard Döbbelin  
Dr.-Ing. Wolfgang Fischer  
Dipl.-Ing. (FH) Stefan Förster

Inhalt:

- ♦ Elektrothermische Verfahren
  - Dielektrische Erwärmung
  - Lichtbogen- und Plasmaerwärmung
- ♦ Leistungselektronik
  - Netzgeführte Gleichrichter
  - Wechsel-/Drehstromsteller
- ♦ Schutzmaßnahmen
- ♦ Schütze und Schalter

**Informationseinrichtungen für  
leistungselektronische Geräte und  
Anlagen**

WS V 2 SWS:  
Ü 1 SWS:

**Control in power electronic equipment**

Dr.-Ing. Wolfgang Fischer  
Dr.-Ing. Wolfgang Fischer

Inhalt:

Analoge und digitale Baugruppen zur Steuerung und Regelung leistungselektronischer Geräte und Anlagen, grundlegende Steuerverfahren netz- und selbstgeführter Stromrichter, Treiberschaltungen, Modulationsverfahren, Regelung und Schutzstrategien

**Informationsverarbeitung in  
leistungselektronischen Systemen**

WS V 2 SWS:

Ü 1 SWS:

Inhalt:

Es werden die einzelnen Komponenten der Informationsverarbeitung, Steuerung, Regelung, Anpassung sowie des Schutzes in leistungselektronischen Schaltungen behandelt. Besonderer Schwerpunkt ist dabei die Integration von Steuerungskomponenten und Leistungshalbleitern. Es werden ausgewählte Beispiele ausführlich dargestellt.

**Data processing in power electronic systems**

Dr.-Ing. Wolfgang Fischer

Dr.-Ing. Wolfgang Fischer

**Leistungselektronik**

SS, V 2 SWS:

WS Ü 1 SWS:

P 1 SWS:

Inhalt:

- ♦ netzgeführte Stromrichter
  - Schaltungsvarianten
    - Umkehrstromrichter
    - höherpulsige Ausführungen
  - Funktion
    - dynamisches Verhalten der Bauelemente
    - Kommutierung
    - Beschaltung
    - Betrieb mit kapazitiver Last
- ♦ resonante Schaltungen
  - lastgeführte Stromrichter, z. B. für induktive Erwärmung
  - Entlastungsnetzwerke
- ♦ selbstgeführte Brückenschaltungen
  - Schaltungsvarianten
    - mehrstufiger Spannungszwischenkreis
    - Stromzwischenkreis
  - Funktion
    - dynamisches Verhalten der Bauelemente
    - Kommutierung
    - Strom- und Spannungsentlastung beim Schalten
    - parasitäre Elemente

**Power electronics**

Prof. Dr.-Ing. Andreas Lindemann

Dr.-Ing. Wolfgang Fischer

Dr.-Ing. Wolfgang Fischer

Dr.-Ing. Reinhard Döbbelin

Dipl.-Ing. (FH) Stefan Förster

**Leistungselektronische Aktoren**

SS V 2 SWS:

Ü 2 SWS:

**Power electronic actuators**

Dr.-Ing. Wolfgang Fischer

Dr.-Ing. Wolfgang Fischer

**Inhalt:**

Bei der Umwandlung elektrischer Energie in andere Energieformen kommt der Anwendung leistungselektronischer Wandler eine besondere Bedeutung zu. Im Fach „Leistungselektronische Aktoren“ werden die wichtigsten Grundschaltungen derartiger Wandler sowie die dazugehörigen Leistungshalbleiter-Bauelemente (Dioden, Thyristoren, MOSFET, IGBT) mit ihren charakteristischen Eigenschaften behandelt. Darüber hinaus werden mehrere ergänzende Themenkomplexe, wie z. B. Steuerung, Schutzkonzepte und passive Bauelemente sowie Applikationen erörtert. In der Übung werden zahlreiche Beispiele unter Nutzung der Simulationssoftware PSIM, Simplorer und SABER ausführlich dargestellt.

**Leistungselektronische Geräte und Anlagen**

SS, V 2 SWS:

WS Ü 1 SWS:

**Power electronic systems**

Prof. Dr.-Ing. Andreas Lindemann

Dr.-Ing. Wolfgang Fischer

**Inhalt:**

♦ Stromversorgungstechnik

Netzfremde Gleichrichter mit Korrektur des Leistungsfaktors

Einphasig

Dreiphasiger Vienna-Rectifier

Schaltnetzteile

Sperrwandler

Durchflusswandler

Unterbrechungsfreie Stromversorgungen

Umrichter für regenerative Energie

Systemarchitektur

Solar-Wechselrichter

Steller für Brennstoffzelle

Umrichter zum drehzahlvariablen Betrieb von Windgeneratoren

♦ Antriebstechnik

Raumzeiger

elektrische Antriebe im Kraftfahrzeug

Betriebsbedingungen, Anforderungen an Zuverlässigkeit - Aufbau- und

Verbindungstechnik

Beispiele: Starter-Generator, elektromagnetischer Ventiltrieb, Lüfter

### **Leistungselektronische Systeme I**

WS V 1 SWS:

Ü 1 SWS:

P 1 SWS:

### **Mains commutated power electronic circuits**

Prof. Dr.-Ing. Andreas Lindemann

Dipl.-Ing. Stefan Förster

Dr.-Ing. Wolfgang Fischer

Dr.-Ing. Reinhard Döbbelin

Dipl.-Ing. Stefan Förster

Inhalt:

- ♦ Netzgeführte Brückenschaltungen
  - Schaltungen:
    - ungesteuerter Gleichrichter, vollgesteuerte Brückenschaltung
    - halbgesteuerte Brückenschaltungen - symmetrisch, unsymmetrisch
  - Funktion:
    - Funktionsprinzip
    - Schaltungsberechnung für konstanten Gleichstrom
    - Netzurückwirkungen
  - Bauelemente: Thyristor
- ♦ Wechselstromsteller
  - Funktion, Steuerverfahren

### **Leistungselektronische Systeme II**

SS V 2 SWS:

Ü 1 SWS:

### **Self commutated power electronic circuits**

Prof. Dr.-Ing. Andreas Lindemann

Dr.-Ing. Reinhard Döbbelin

Inhalt:

- ♦ Einführung
- ♦ Gleichstromsteller
  - Tiefsetzsteller
    - Funktion, Beispiel: Gleichstrom-Antrieb einer elektrischen Bahn
  - Hochsetzsteller
    - Funktion, Beispiel: Photovoltaik-Anlage
  - Zwei-Quadranten-Steller - Brückenweig
    - Funktion, Beispiel: Gleichstrom-Antrieb
- ♦ Bauelemente
  - Funktionsprinzip und Kenngrößen
  - MOSFET, IGBT, Diode, Aufbautechnik
- ♦ Schaltungsberechnung
  - Thermik: statisches Verhalten
  - Belastbarkeit
    - Gleichstrom, Getaktet, Beispiel: Gleichstromsteller
- ♦ H-Brücke (selbstgeführt mit Spannungszwischenkreis)
  - Herleitung
  - Steuerverfahren: Pulsbreitenmodulation
  - Anwendungsbeispiele:
    - 4-Quadranten-Antrieb mit Gleichstrommaschine
    - Betrieb als Wechselrichter - z. B. in Photovoltaik- Anlagen
    - Betrieb als Gleichrichter
- ♦ Dreiphasige Brückenschaltung (selbstgeführt mit Spannungszwischenkreis)
  - Herleitung
  - Steuerverfahren
  - Wechsel- und Gleichrichterbetrieb, z. B. für Drehstromantrieb

## 2.4.2 Abgeschlossene Studienarbeiten und Forschungsprojekte

- ♦ Teichert, C.:  
**Transformatoren für Kondensatorimpuls-Schweißmaschinen**
- ♦ Telenskyy, T.:  
**Modellierung magnetischer Bauelemente mit den Simulationsprogrammen SABER und PExpert im Vergleich**
- ♦ Gets, Y.:  
**Flussdichteverteilung an feldkompensierten Hochstromkabeln**
- ♦ Kellner, K.:  
**Bidirektionaler DC/DC-Wandler für Brennstoffzellensysteme**
- ♦ Bartels, G.:  
**Feldkompensation an Widerstandsschweißmaschinen**

## 2.4.3 Abgeschlossene Diplom- und Masterarbeiten

- ♦ Karutz, P.:  
**Simulation and optimisation of parasitic impedances and EMI behaviour of new power electronic hardware concept**
- ♦ AboQutton, A.:  
**Laborversuch „Resonante DC/DC-Wandler“**
- ♦ Schneider, M.:  
**Aufbau einer Brennstoffzellen-Netzeinspeisung**
- ♦ Kürschner, D.:  
**Steuer- und Regelverfahren für einen Matrixconverter mit hoher Ausgangsfrequenz zur kontaktlosen Energieübertragung**
- ♦ Becker, B.:  
**Stromquelle mit erhöhter Taktfrequenz für ein Widerstandspunktschweißsystem**
- ♦ Studenyak, O.:  
**Simulative Analyse eines Matrixconverters für die kontaktlose Energieübertragung**
- ♦ Nielebock, S.:  
**Berührungslose Datenübertragung und Ansteuerung einer Erregermaschine für einen Synchrongenerator**

## 2.5 Institutsebene

### 2.5.1 Kooperationen

Doppeldiplomprojekt zwischen der Technischen Universität Wroclaw und der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.

Das Doppeldiplomprogramm läuft seit dem Jahr 2002. Das Projekt wurde zusammen mit dem Kooperationspartner Technische Universität Wroclaw in Polen von Prof. Dr.-Ing. Z. A. Styczynski ins Leben gerufen und hat die gemeinsame Ausbildung der Studenten im Rahmen des internationalen Austausches als Ziel. Die Studenten studieren im ersten Teil des Studiums an der TU Wroclaw (6 Semester) und dann weiter an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (3 Semester). Die erbrachten Leistungen während des Studiums in Wroclaw und Magdeburg sind von beiden Universitäten gegenseitig anerkannt. Anschließend findet die zweisprachige Verteidigung der Diplome vor einer deutschen und polnischen Prüfungskommission statt. Nach erfolgreich abgeschlossenem Studium bekommen die Doppeldiplomanden die Diplome beider Universitäten, Bild 1.

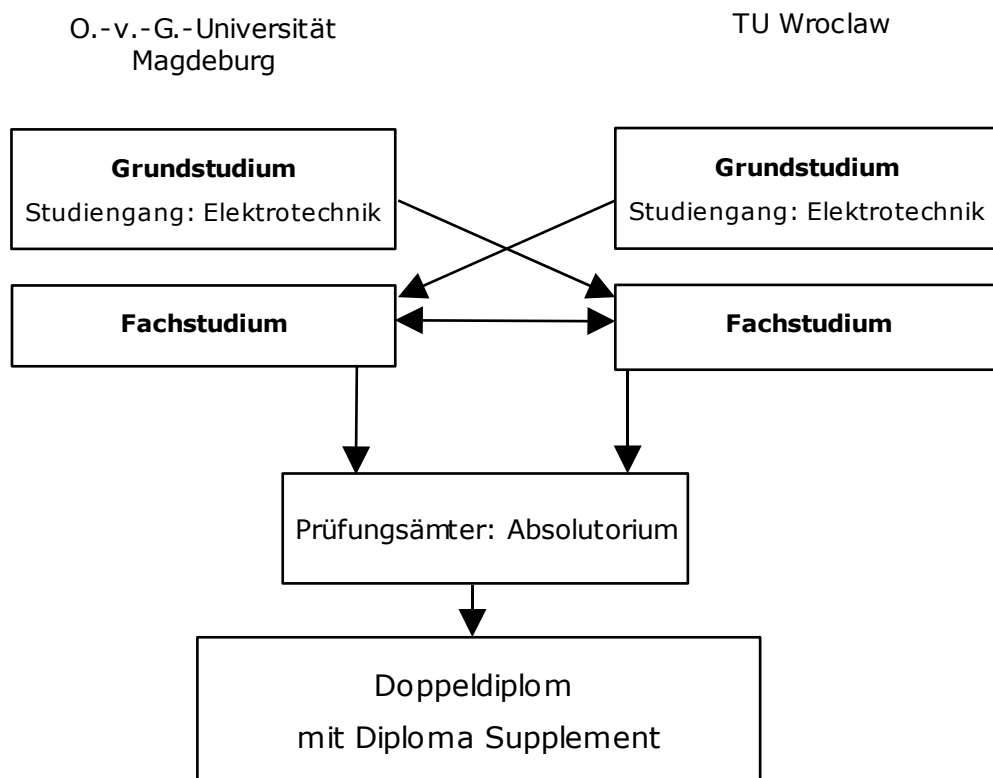


Bild 1: Struktur des Doppeldiplomprogramms

Das Doppeldiplomprogramm hat schon sieben Absolventen. Im Jahr 2004 haben M. Sc. P. Komarnicki, M. Sc. T. Majerz und M. Sc. W. Boryczko ihre Diplomarbeiten verteidigt. Im Mai 2005 haben weitere vier junge Ingenieure das Programm erfolgreich beendet.





*Bild 2: Offizielle Diplomübergabe in Magdeburg  
(von links: M. Sc. T. Lysiak, M. Sc. T. Smieja,  
M. Sc. G. Kaflowski, M. Sc. J. Antosik)*

Die Diplomverteidigung im Jahr 2005 fand in Wroclaw statt. Zu den Kommissionsmitgliedern aus Magdeburg gehörten: der Dekan der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik Prof. Dr.-Ing. Z. A. Styczynski, der Leiter des Lehrstuhls für Leistungselektronik Prof. Dr.-Ing. A. Lindemann und die Betreuer der Diplomanden. Die TU Wroclaw wurde durch den Dekan der Fakultät für Elektrotechnik Prof. Janusz Szafran, den Prodekan Dr.-Ing. Zenon Okraszewski und weitere Mitarbeiter vertreten. Die Verteidigung wurde mit Präsentationen und Fragen in zwei Sprachen durchgeführt.

Am 24. Mai 2005 haben der Rektor der Universität Magdeburg, Prof. Klaus Erich Pollmann und der Dekan der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik Prof. Dr.-Ing. Z. A. Styczynski, sowie die Vertreter der TU Wroclaw, der Dekan der Fakultät für Elektrotechnik Prof. Janusz Szafran und der Prodekan Dr.-Ing. Zenon Okraszewski den vier jungen Diplomingenieuren an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg ihre Urkunden überreicht, Bild 2.

## Studienaufenthalte ausländischer Wissenschaftler am Institut:

- ♦ Doz. Dr. Skjarenko, TU Donetsk (Ukraine)  
21.01.-15.02.2005  
Ausarbeitung deutschsprachiger Vorlesungen für die Ausbildung am DSG
- ♦ Prof. Khokhordin, TU Donetsk (Ukraine)  
25.01.-25.02.2005  
Ausarbeitung deutschsprachiger Vorlesungen für die Ausbildung am DSG
- ♦ Doz. Dr. Voronzov, TU Donetsk (Ukraine)  
06.03.-20.03.2005  
Studienreise zum Stand der Bachelor-/ Master-Ausbildung
- ♦ Prof. Troyanskiy, TU Donetsk (Ukraine)  
27.03.-10.04.2005  
Abstimmung von Lehrinhalten zur Masterausbildung „Elektrische Energiesysteme“  
Erfahrungsaustausch zur Masterausbildung
- ♦ Prof. Kalashnikov, TU Donetsk (Ukraine)  
27.03.-10.04.2005  
Studienreise zur Erarbeitung von Lehrmaterialien für die Deutschausbildung an der Deutschen Technischen Fakultät der TU Donetsk
- ♦ Dr. K. Sroka, TU Poznan (Polen)  
04.04.-30.06.2005
- ♦ Prof. Filaretov, TU Vladivostok (Russland)  
09.05.-22.06.2005  
Ausarbeitung eines gemeinsamen INTAS-Antrages „SWAN“
- ♦ Doz. Dr. Shamardina, TU Kharkov (Ukraine)  
15.05.-14.06.2005  
Abstimmung von Lehrinhalten zur Masterausbildung „Elektrische Energiesysteme“  
Erfahrungsaustausch zur Masterausbildung  
Vorbereitung deutschsprachiger Vorlesungsmanuskripte
- ♦ Dr. K. Sroka, TU Poznan (Polen)  
16.05.2005
- ♦ Dr. Starostin, TU Donetsk (Ukraine)  
01.06.-29.06.2005  
Studienreise zur Erarbeitung von Lehrmaterialien für die Deutschausbildung an der Deutschen Technischen Fakultät der TU Donetsk
- ♦ Prof. Shoylev, Prof. Mladenow, DI Kotzev, DI Tzenov, Universität für chemische Industrie und Metallurgie Sofia und TU Sofia (Bulgarien)  
08.06.-21.06.2005  
Forschungskooperation im Rahmen des gemeinsamen PPP-Bulgarien-Projektes  
„Symbolische Steuerung einer künstlichen Hand mit Hilfe myoelektrischer Signale“
- ♦ Dr. Pasciak, Herr Chmidowiec, Herr Builo  
05.-10.09.2005  
Projekttreffen „Entwicklung von Hochtemperaturbrennstoffzellen (SOFC) für kleine Leistungen“, finanziert vom BMBF (Förderkennzeichen POL 01/110)

- ♦ Dr. Herlender, TU Wroclaw (Polen)  
05.09.-30.09.2005  
Vorbereitung zur Habilitationsschrift
- ♦ Herr Koch, Universität Duisburg  
06.09.2005
- ♦ Dipl.-Ing. Vania Ignatova, INP Grenoble (Frankreich)  
01.10.-31.12.2005  
Vorbereitung der Dissertation und Forschung im Bereich Spannungsschwankungen in Energieübertragungsnetzen
- ♦ Prof. Kalashnikov, TU Donetsk (Ukraine)  
28.10.-03.11.2005  
Ehrenpromotion
- ♦ Frau Olejnik, TU Donetsk (Ukraine)  
04.11.-15.11.2005  
Studienaufenthalt zur Deutschausbildung am DSG
- ♦ Doz. Dr. Hénaff, Doz. Dr. Fathi Ben Ouzdou, Doz. Dr. Monacelli, Université de Versailles Saint Quentin (Frankreich)  
01.12.-06.12.2005  
Forschungskooperation im Rahmen des gemeinsamen PROCOPE-Projektes „Symbolische Steuerung einer künstlichen Hand mit Hilfe myoelektrischer Signale“
- ♦ Dekan M. Sobierajski, Prodekan W. Rebizant und Dr. K. Herlender, TU Wroclaw (Polen)  
09.12.2005

Mit Herrn Dr. Krebs ist es gelungen, einen Experten des Fachgebietes als Gastdozent für uns zu gewinnen. Er liest im Wintersemester 2005/06 die Vorlesung Netzschutz und Leittechnik als Blockveranstaltung.

Herr Prof. Phadke hat während seines einwöchigen Aufenthaltes in Magdeburg eine Vorlesung zur Entstehung und Ausbreitung von Netztotalausfällen (sogenannten Blackouts) gehalten. Dieses hochinteressante Thema hat er anhand der Blackouts in den USA, die während der vergangenen Jahrzehnte tatsächlich passierten, dargestellt.

Frau Dr.-Ing. A. Orths (ELTRA Dänemark) hält im Wintersemester 2005/06 die Vorlesung „Windenergie“ als Gastdozentin.

#### Gastleehrtätigkeiten und Studienreisen im bzw. ins Ausland:

- ♦ Dipl.-Ing. Konev am INSA Rennes (Frankreich)  
15.05.-14.06.2005  
Forschungsaufenthalt im Rahmen des gemeinsamen PROCOPE-Projektes „Symbolische Steuerung einer künstlichen Hand mit Hilfe myoelektrischer Signale“
- ♦ Prof. Dr.-Ing. habil. Palis, Dipl.-Ing. Zeghib an der Universität für chemische Industrie und Metallurgie Sofia und TU Sofia (Bulgarien)  
25.07.-01.07.2005  
Forschungskooperation im Rahmen des gemeinsamen PPP-Bulgarien-Projektes „Symbolische Steuerung einer künstlichen Hand mit Hilfe myoelektrischer Signale“
- ♦ Prof. Dr.-Ing. habil. Palis an der TU Miskolc (Ungarn)  
22.08.-26.08.2005  
Studienaufenthalt, Abstimmung von Lehrinhalten für beabsichtigte Gastleehrtätigkeiten (SOKRATES)

- ♦ Prof. Dr.-Ing. habil. Palis an der TU Kharkov (Ukraine)  
04.09.-15.09.2005  
Gastlehrertätigkeit „Feldorientierte Regelung von Drehfeldmaschinen“
- ♦ Prof. Dr.-Ing. habil. U. Riefenstahl, Prof. Dr.-Ing. A. Lindemann an der TU Donetsk (Ukraine) auf Einladung des Dekans der Deutschen Technischen Fakultät und Honorarkonsuls der Bundesrepublik Deutschland Prof. Dr. V. Kalashnikov  
16.09.-26.09.2005
  - Vorlesungen über Antriebsregelung und Leistungselektronik für Studierende an der Deutschen Technischen Fakultät
  - Abstimmungen zur bestehenden Kooperation mit Entsendung von Studierenden der Deutschen Technischen Fakultät der TU Donetsk zum Masterstudiengang Elektrische Energiesysteme an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
  - Besuch beim industriellen Partner der Deutschen Technischen Fakultät Siemens, Ukraine
  - Veröffentlichungen und wissenschaftlicher Austausch auf der Tagung Probleme des automatisierten Elektroantriebes - Theorie und Praxis - in Alushta
- ♦ Dipl.-Ing. Tsepkovskiy an der TU Kharkov (Ukraine)  
17.09.-24.09. und 19.11.-02.12.2005  
Gastlehrertätigkeit an der Deutschen Technischen Fakultät der TU Kharkov
- ♦ Dipl.-Ing. Zavgorodniy, Dipl.-Ing. Rusin, Dipl.-Ing. Konev an der TU Donetsk (Ukraine)  
17.09.-24.09.2005  
Gastlehrertätigkeit an der Deutschen Technischen Fakultät der TU Donetsk
- ♦ Dipl.-Ing. Tsepkovskij, Dipl.-Ing. Zeghib, Dipl.-Ing. Konev an der Universität für chemische Industrie und Metallurgie Sofia und TU Sofia (Bulgarien)  
28.09.-06.10.2005  
Forschungskooperation im Rahmen des gemeinsamen PPP-Bulgarien-Projektes „Symbolische Steuerung einer künstlichen Hand mit Hilfe myoelektrischer Signale“
- ♦ Dipl.-Ing. Zeghib an der Université de Versailles Saint Quentin (Frankreich)  
30.11.-18.12.2005  
Forschungsaufenthalt im Rahmen des gemeinsamen PROCOPE-Projektes „Symbolische Steuerung einer künstlichen Hand mit Hilfe myoelektrischer Signale“
- ♦ Prof. Dr.-Ing. habil. Palis an der Université de Versailles Saint Quentin (Frankreich)  
14.12.-18.12.2005  
Forschungsaufenthalt im Rahmen des gemeinsamen PROCOPE-Projektes „Symbolische Steuerung einer künstlichen Hand mit Hilfe myoelektrischer Signale“

## 2.5.2 Exkursionen

### IEEE Chapter – Meeting in Goldisthal

Bericht: Dipl.-Ing. A. Bannack

Das Pumpspeicher Kraftwerk Goldisthal war Thema eines Chapter–Meetings (IEEE) im Oktober 2005 organisiert vom IEEE Joint IAS / PELS / IES German Chapter unter Leitung von Prof. Dr.-Ing. A. Lindemann.

Unter den ca. 80 Teilnehmern befand sich eine Delegation unseres Institutes. Ihr gehörten unser Institutsleiter Prof. Lindemann, wissenschaftliche Mitarbeiter und Studenten der Seminargruppen EGT02 und MAEE05 (Masterstudenten der TU Wroclaw) an. In mehreren Vorträgen wurden den Teilnehmern technische Einzelheiten dieser modernen Anlage, welche 2003 ans Netz ging, erläutert.

Die Themen der Vorträge:

- ♦ 300 MW umrichter gespeister drehzahlvariabler Antrieb für das Pumpspeicherwerk Goldisthal  
Dipl.-Ing. A. Bocquel, ALSTOM Power Conversion GmbH, Berlin
- ♦ Gasisolierte Rohrleiter für Hochspannungsübertragungen  
Prof. Dr.-Ing. Josef Kindersberger, TU München, Lehrstuhl für Hochspannungs- und Anlagentechnik
- ♦ Netzkurzschlussverhalten von umrichterbetriebenen regenerativen Energieerzeugern  
Dr.-Ing. J. Janning, ALSTOM Power Conversion GmbH, Berlin
- ♦ Das Pumpspeicherwerk Goldisthal und sein Einsatz zur Netzregelung  
Dipl.-Ing. U. Voigt, Vattenfall Europe Generation AG & Co. KG, Hohenwarte

Die gewaltigen Ausmaße der Anlage, des oberen Speicherbeckens und der Kaverne im Felsen des Thüringer Waldes wurden allen bei der abschließenden Führung deutlich vor Augen geführt.

### Studentenexkursion vom 30.05. bis 03.06.2005 nach Polen

Bericht: Jens Friedenberger

Was gehört außer der Fachkenntnisse zum Repertoire jedes modern gebildeten und weltoffenen Studenten? Natürlich das praktische Wissen über Sachverhalte, die ein junger Mensch innerhalb der Hörsäle und Laboratorien kennen lernt und dann sie irgendwann „im wahren Leben“ anwenden muss. Diesem Ziel dienen die alle zwei Jahre stattfindenden, mehrtägige Exkursionen, die das Wissenschaftliche mit dem Kulturellem vollkommen verbinden.

Im Zeitraum vom 30.05. bis 03.06.2005 führte die Exkursion die Studenten aus dem Institut für Elektrische Energiesysteme nach Polen, wo es mehrere sowohl geplante als auch unerwartete Ereignisse gab.

Nach lang ersehntem Warten startete endlich am Montagmorgen um 7.00 Uhr früh die Exkursion nach Polen. Die Reisegruppe ca. 30 Teilnehmer stark, bestehend aus polnischen und deutschen Studenten samt Betreuern erlebte gleich zu Beginn der Fahrt die erste Überraschung: die Klimaanlage war defekt. Es gehört aber zu solchen Touren, dass man das Unangenehme und plötzlich auftretende Schwierigkeiten in Kauf nehmen muss und wir ließen

uns dadurch die gute Laune nicht verderben. Unser erstes Ziel sollte uns zum Kraftwerk Schwarze Pumpe führen, aber aus unerfindlichen Gründen durften wir uns dort nicht umschauen. Nach einer ruhigen Fahrt ohne Zwischenfälle erreichten wir die polnische Grenze. Da in jeder Reisegruppe einer aus der Reihe tanzen muss, blieb uns das auch nicht erspart: ein Student versuchte mit abgelaufenem Personalausweis die Grenze zu passieren. Nach einer halbstündigen Zwangspause ging die Reise zum Glück auch mit dem Studenten weiter. Gegen 18 Uhr kamen wir gerade noch rechtzeitig vor einem großen Gewitter im „Hotel Europejski“ in Woclaw an, wo wir die ersten zwei Tage nächtigten. Nach dem Unwetter nutzten einige die Zeit um die Woclawer Innenstadt mit ihren Kneipen und Bars zu erkunden. Die Studenten waren begeistert von der Architektur, der Stadtgestaltung und natürlich der besonderen, einmaligen Stimmung in den Unterhaltungslokalen, die von den fröhlichen, netten und für die fremden Kulturen offenen Woclawern geschaffen wurde.

Am nächsten Morgen brachen wir nach dem Frühstück zum Besuch des städtischen Energieerzeugers „EnergiaPro - Konzern Energetyczny S.A“ auf, Bild 3.



*Bild 3: Besuch im "EnergiaPro Konzern Energetyczny"*

Dort erfuhren wir, dass durch das schwere Unwetter am Vortag erhebliche Schäden am Verteilungsnetz entstanden sind. Nach Schätzung des zuständigen Ingenieurs sollte die Fehlerbeseitigung in den ausgefallenen Versorgungsstationen und die Reparatur der zerstörten Leitungen noch bis zu 36 Stunden andauern, darum war ein Großteil der Belegschaft natürlich sehr beschäftigt. Das war es, was die angehenden Wissenschaftler am meisten brauchten – wir befanden uns im Zentrum der Geschehnisse, direkt zwischen den Leuten, die sich in einer Krisensituation zurecht finden mussten. Um ihnen dies zu ermöglichen, machten wir uns ohne zu zögern auf den Weg zu einer Kantine, in der eine überaus zuvorkommende Bedienung uns Tolles serviert hat. Am Nachmittag stand der Besuch mit Rundgang durch das Heizkraftwerk EC Wroclaw auf unserem Programm. Nach einem sehr anstrengenden aber doch informativen Nachmittag konnten wir Woclaw weiter individuell erkunden. Den letzten Abend in der

Universitätsstadt verbrachten wir in der Studentendisco auf dem dortigen Campus zusammen mit unseren polnischen Studenten.

Nach kurzer Nachtruhe starteten wir am Mittwoch früh zu unserem zweiten Exkursionsziel Krakau. Und es wäre keine Exkursion nach Polen gewesen, wenn es keinen weiteren Vorfall gegeben hätte. Bei einer Kontrolle unseres Busses stellte sich heraus, dass er keine gültige



*Bild 4: Die Exkursionsteilnehmer vor dem Heizkraftwerk EC Krakau*

Autobahnvignette hatte. Nach drei Stunden Wartezeit, endlosen Diskussionen und letztlich einer Geldstrafe konnten wir unsere Reise fortsetzen. Wir erreichten dann sehr verspätet das Heizkraftwerk EC Krakau, wo wir eine sehr gute und informative Führung erhielten, Bild 4. Am frühen Abend checkten wir im Hotel „Krakus“ mit Blick auf die Schornsteine des gerade besichtigten Heizkraftwerkes ein. Da das Hotel am Stadtrand lag, wurde die Fahrt ins Zentrum etwas länger, was uns aber nicht davon abhielt, die wunderschöne Innenstadt zu besichtigen. Aber nach diesem anstrengenden und erlebnisreichen Tag wurde dieser Ausflug nur zur kurzen Stärkung genutzt und dann zog es alle wieder zurück ins Hotel. Der nun folgende Tag verlief wie ein typischer Touristentag, mit der Besichtigung der Altstadt und einem gemeinsamen Mittagessen auf der schönen Burg im „Restauracja na Wawelu“. Anschließend konnte der Nachmittag individuell zum Beispiel zum Einkaufen genutzt werden. Der letzte Abend in Polen wurde gemütlich mit der Gruppe im Hotel beendet. Das unoffizielle Treffen mit den Betreuern unserer Studienleiter gab eine gute Möglichkeit, sie einigermaßen persönlich kennen zu lernen und ein gemütliches Gespräch auch über alltägliche Themen zu führen.

Großer Dank gebührt speziell unserem lieben Dekan, Herrn Professor Styczynski und dem engagierten und immer freundlichen Herrn C. Dzienis für die Organisation und Durchführung dieser gelungenen Exkursion.

### 2.5.3 Studienwerbung

#### Lehrpfad und Betriebspraktika für Schülerinnen und Schüler

Die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik bietet seit einigen Jahren erfolgreich technisch interessierten Schülerinnen und Schülern der höheren gymnasialen Klassenstufen unter der Bezeichnung „Lehrpfad für Elektrotechnik und Informationstechnik“ interessante Experimente zur Vertiefung und Erweiterung des im Physik- und Informatikunterricht gelernten Stoffes an. Dieses Angebot wird von Schulen aus Sachsen-Anhalt und angrenzenden Bundesländern gerne und intensiv genutzt. Im Schuljahr 2004/2005 wurden insgesamt 113 Schülerinnen und Schüler begrüßt. An den Angeboten der Fakultät ist das Institut für Elektrische Energiesysteme mit 7 Versuchen und 2 Betriebspraktikumsplätzen u.a. zu den Themen Leistungselektronik, Solarzellen, Beschichtungstechnologien, Netzschutzsimulation und Brennstoffzellen beteiligt. Die Schülerinnen und Schüler lernen neben den Experimenten aus Lehre und Forschung auch das Leben an einer Universität kennen und finden auf diese Weise vielleicht Interesse an einem späteren Studium der Elektrotechnik oder Informationstechnik.

#### OneStone – Jugendakademie

Am 29. November startete das Semester des Jugendakademie-Projekts „OneStone“. An der Veranstaltung unter Leitung von Prof. Dr.-Ing. Styczynski nehmen 40 Kinder und Jugendliche aus Sachsen-Anhalt teil. Thema der Akademie ist die Elektrische Energieerzeugung. In diesem Rahmen beschäftigen sich die jungen Teilnehmer mit solchen Fragen: „Wie kommt der Strom in die Steckdose?“ und „Wie lange werden die Energiequellen der Erde noch reichen?“.

Zum Ende des Semesters im Februar 2006 werden die Teilnehmer Ihre Forschungsergebnisse präsentieren. Bis dahin schulen Mitarbeiter des Institutes die Jugendlichen in Theorie und Praxis. Angeboten werden Seminare, Computerworkshops und Bastelarbeiten rund um das Thema Energieerzeugung.

Die Jugendakademie des Vereins „OneStone“ ist die zweite Veranstaltung dieser Art. Ziel der Jugendakademie ist die frühe Heranführung Kinder und Jugendlicher an die Wissenschaft und somit an die Studiengänge der Fakultät. Das auf frühzeitige Berufsförderung ausgerichtete Projekt wird vom Land Sachsen-Anhalt und dem Europäischen Sozialfond gefördert.



## 3 Forschung

### 3.1 Lehrstuhl Allgemeine Elektrotechnik/Elektrische Aktorik

#### 3.1.1 Forschungsprofil

- ♦ Neuro- und Fuzzycontrol von elektromechanischen Systemen
  - Neuromodelle nichtlinearer Systeme
  - Fuzzyregler zur Kompensation von Nichtlinearitäten
  - selbstlernende Regler
- ♦ Modellierung und Generierung humanoider Bewegungen
  - Entwicklung zweibeiniger Schreitroboter
  - Modellierung und Optimierung humanoider Bewegungen
  - Modellbildung und Elektrostimulation von Muskeln
- ♦ Systemintegration unkonventioneller Aktoren
  - Vibrations- und Schalldämpfung mit Piezoaktoren
  - Feinpositionierung von Stellantrieben
- ♦ Entwicklung von elektrischen Leistungsverstärkern für unkonventionelle Aktoren
  - hochdynamische Stromquelle für Piezoaktoren
  - optimale Anpassung von Leistungsverstärkern

### 3.1.2 Forschungsprojekte

#### **Fuzzy Subtractive Clustering based Classification of finger movements using EMG Signals**

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Palis  
Projektbearbeiter: Dipl.-Ing. A. Zeghib  
Kooperationen: TUB Sofia, Université de Versailles, Max-Planck-Institut Magdeburg  
Förderung: PROCOPE, PPP Bulgarien

##### Introduction

Pattern recognition is used to describe the distribution of samples in sample space and to relate an input sample to the distribution. A sample is represented by a point in the sample space; its feature values are the corresponding coordinates. With help of exploitation of myoelectric signals, amputee persons can have a chance to improve their life with myoelectric prosthesis, which are able to function with the amputee's muscle movements. However, it is difficult to extract useful features from residual muscles of an amputee. The EMG signal has been used as a tool to provide advanced man-machine interfaces, rehabilitation of the handicapped people, functional electrical stimulation devices (FES) and control commands for limb prosthesis. The classification problem may be divided into three steps: signal presentation, feature extraction and pattern recognition.

##### Experimentation

Three types of isometric finger movements to be classified are selected: thumb, pointer, middle. The placement of EMG surface electrodes on muscle groups is important to have more information about each movement.

Two EMG surface electrodes are placed on two muscle groups, palmaris longus (channel\_1) and extensor digitorum (channel\_2), from the input feature space, the classifier must be able to classify the three output classes exploiting the EMG signals measurements. For each channel the signal was acquired using a single bipolar surface electrode pair. A differential amplifier with an isolated input and signal gain of 2000 was used. The signal was sampled at a rate of 4 kHz using A/D board in an IBM PC/AT compatible microcomputer; this algorithm is developed with MATLAB 6 and is performed in a PC-based off-line process. The human subject was asked to produce a number of continuous movements, 34 single contraction periods are separated from the corresponding sets of continuous movements. Initial transient part (400 ms) of each single contraction period is extracted from the raw signal, by determined threshold, are analysed with Short time Fourier Transform (STFT), which gives a measure of both time and frequency information for small segments of a signal.

For the two channels we prepare some EMG training and test data, each class has 17 training and 17 test patterns. The three classes labelled 1, 2 and 3 have 51 train-samples and 51 test-samples.

##### EMG feature extraction

It is considered that signals of muscle activity using surface EMG are divided into two types: transient signals EMG and steady-state signals EMG, the transient signals, used in this work, are more important and more favourable for the "on line" classification, although they are more difficult to handle.

Extraction of features contained in time-frequency domain need the use of spectrum analysis. Time-Frequency Analysis (TFA) can identify not only the frequency content of a signal, but also how that content evolves over time. There are a number of different methods available

for Time Frequency Analysis. The Short Time Fourier Transform (STFT), which is used in this work, is a form of local Fourier analysis that treats time and frequency simultaneously and is the simplest TFA method and the easiest to compute.

Theoretically it should be possible to recognize finger movements directly from the sampled EMG signals. However, because of the large variability of these signals, it is necessary to perform some form of feature extraction that would overcome this variability. Relevant features lead to high and accurate classification rates.

In time-frequency domain using STFT (Short Time Fourier Transform), the energy estimation is extracted as time-frequency feature. The distribution of energy estimation feature at time  $t$  is defined as:

$$E_n(t) = \sum_n (W(n-t) x(n))^2 \quad (1)$$

$W$ : hamming window.

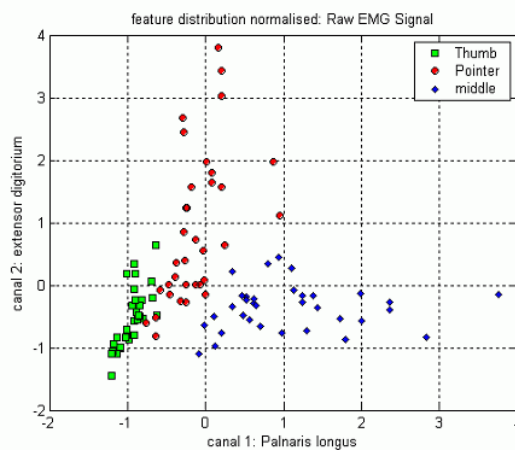


Fig. 5: Distribution of feature  $E_n$ .

For the two channels we prepare some EMG training and test data from raw EMG signal, each class has 17 training and 17 test patterns. The three classes labelled 1, 2 and 3 have 51 train-samples and 51 test-samples. The distribution of the all normalised samples in the two-dimensional space Channel-1 and channel-2 is shown in Fig. 5.

#### Subtractive Clustering Method and fuzzy identification method for movement recognition

The goal of fuzzy identification method is to extract a set of fuzzy rules, which describe the distribution of different classes in the input space data. The initial set of linguistic rules is given by several Data clustering algorithms such as: K-Means, Fuzzy C-Means, Mountain Clustering method, and subtractive clustering. The subtractive clustering algorithm, which has been proposed by Chiu, estimates the number of clusters and the cluster centres in a set of data. The obtained clusters are used to initialise the fuzzy sets, for model identification method ANFIS. As initial model, the first order Takagi-Sugeno (T. S.) model is used.

The advantage of using this method (subtractive clustering algorithm) is that the number of clusters and their radius values do not need to be known, and it allows a scatter partition of the input space  $X_{nf} = [X_{ij}]$  in  $C_k$  classes.

After application of Fuzzy Subtractive Clustering model for generating the initial scatter partitioning of input space, the Hybrid Algorithm ANFIS, which use the following adaptation method is applied to perform, during 5 epochs, this initial model:

- a) Optimisation of the premise parameters (membership functions parameters) with Gradient Descent (GD)
- b) Optimisation of the linear parameters (consequence parameters) with linear Least Squares Estimator (LSE).

Fig. 6 and Tab. 1 show the results obtained after this adaptation.

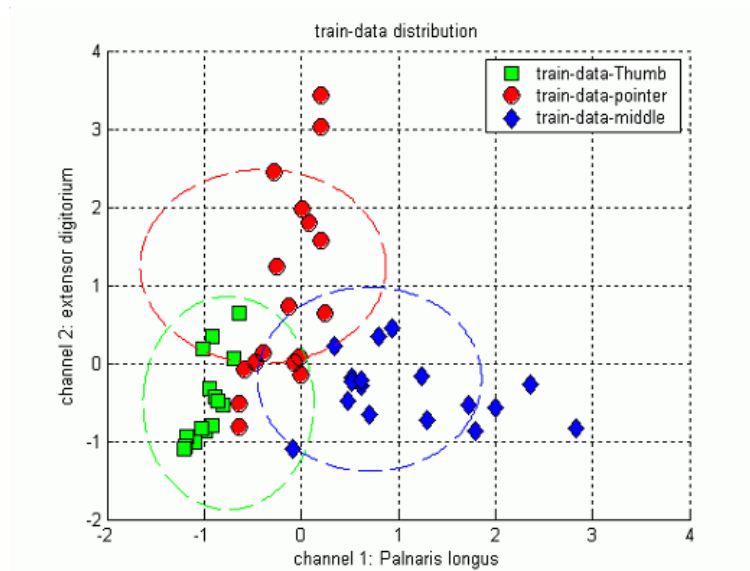


Fig. 6: Clusters derived from adapted FSC model for training data

Tab. 1: Classification accuracy comparison between initial and adapted FSC model for test data

Fingerclass	# clusters	Thumb/17	Pointer/17	Middle/17	Total correct samples/51
Radius= 0.8					
Initial model	3	16	15	17	48
Adapted model	3	16	15	17	48

### Conclusion

The fuzzy identification method, FSC, to perform the EMG-based finger-movements classification is an efficient method for extracting fuzzy rules from data based on cluster estimation. These Rules can be generated to solve both function approximation and pattern classification problems. This method has been applied to extract fuzzy rules for a variety of systems identification. In comparison with neural networks, there is no trial and error.

The classification accuracy depends from the cluster radius and we concluded in this study that with the optimal cluster radius, 0.8, (number of clusters = 3) we don't need more computational operations for the use of adaptation methods.

## Robuste Regelung von Drehkränen mit LQ- und $H_\infty$ -Regler

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. habil. F. Palis  
 Projektbearbeiter: Dipl.-Ing. T. Schallschmidt, Stefan Palis  
 Förderung: Industrie

Drehkrane unterscheiden sich hinsichtlich der mathematischen Beschreibung ihrer Bewegungen erheblich von Brücken und Portalkranen. Ihr System der Bewegungsgleichungen ist durch das Auftreten von Coriolis- und Zentrifugalkräften gekennzeichnet. Beide Kraftkomponenten sind nichtlinear und entstehen durch die Kopplung von rotatorischen und translatorischen Bewegungen. Praktische und Simulationsuntersuchungen zeigen, dass beide Anteile die Bewegungsvorgänge an Drehkränen erheblich beeinflussen können und beim Entwurf der Regelstruktur und der Regleroptimierung zu berücksichtigen sind. Unter diesen Bedingungen erscheint es interessant, eine Regelstrategie einzusetzen, die im Sinne einer Kompromisslösung sich durch Robustheit im gesamten Bereich der möglichen Parameteränderungen und Kräfteverkopplungen auszeichnet und darüber hinaus noch die erforderliche Qualität des Bewegungsablaufes gewährleistet. In den letzten Jahren wurden hierfür verschiedene Regelverfahren entwickelt, die hinsichtlich ihrer theoretischen Grundlagen zwar mathematisch anspruchsvoll sind, aber in ihrer technischen Umsetzung einfach zu realisieren sind. Im Folgenden soll der Einsatz eines LQ-Reglers und -Reglers zur robusten Regelung von Drehkränen untersucht werden.

### Optimale und robuste Regelungen

Optimale Regelungen erfüllen bekanntlich ein Optimierungskriterium, das je nach der zu erfüllenden Aufgabe unterschiedlich formuliert werden kann. Von besonderer praktischer Bedeutung ist hierbei der LQ-Regler (linear quadratic), bei dem die gewichteten quadratischen Mittelwerte der Zustandsgrößen (Fehler) und der Stellgröße minimiert werden:

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt = \text{Minimum} \quad (1)$$

Diese Reglereinstellung stellt eine Kompromisslösung zwischen den maximal erreichbaren dynamischen Eigenschaften und der Stellgröße dar. Es ist offensichtlich, dass hierbei Stellgrößenbeschränkungen eine Verschlechterung der Dynamik nach sich ziehen. Die Bestimmung der Zustandsrückführungsparameter führt auf die bekannte Riccati-Gleichung, deren Lösung off line erfolgt und bei Einsatz entsprechender Software unproblematisch ist. Es ist bekannt, dass sich Systeme mit LQ-Regler durch ihre Robustheit gegenüber Parameterschwankungen auszeichnen und damit für die Regelung von Systemen mit ungewissen Parametern besonders geeignet sind. Der  $H_\infty$ -Regler benutzt zur Beurteilung der Regelgüte (Performance-Index) die  $H_\infty$ -Norm, die lediglich durch das Maximum der Funktion  $u(t)$  im Intervall  $[-\infty, \infty]$  bestimmt wird, d. h. die  $H_\infty$ -Norm einer Übertragungsfunktion  $F(s)$  wird durch das Maximum des Betrages im Bode-Diagramm bzw. durch den am weitesten vom Ursprung entfernten Punkt des Nyquist-Diagrammes (Ortskurve) festgelegt:

$$\|F(j\omega)\|_\infty = \sup |F(j\omega)| \quad (2)$$

Es lässt sich zeigen, dass ein direkter Zusammenhang besteht zwischen der Parameterempfindlichkeit eines Systems und der  $H_\infty$ -Norm: Je größer die  $H_\infty$ -Norm eines Systems, desto empfindlicher reagiert es auf Parameterschwankungen. Das Problem der Regleroptimierung besteht also darin, die Zustandsrückführungen so auszuwählen, dass ein zulässiger Wert  $\gamma$  für die  $H_\infty$ -Norm für die einzelnen Zustandsgrößen nicht überschritten wird. Der Einfluss der Normen der einzelnen Zustandsgrößen auf die Gesamtlösung wird, ähnlich wie bei der LQ-Regelung, über Wichtungsfaktoren festgelegt. Diese Wichtungsfaktoren werden frequenzabhängig ausgewählt, so dass damit bestimmte Frequenzspektren ausgeblendet oder

besonders stark berücksichtigt werden können. Dadurch lässt sich neben der Parameterunempfindlichkeit gleichzeitig eine Robustheit gegenüber Störgrößeneinflüssen in einem bestimmten Frequenzbereich erreichen.

### Bewegungsgleichungen von Drehkränen

Zur Beschreibung der Bewegungen der einzelnen Achsen eines Drehkranes wird von dem im Bild 7 dargestellten kinematischen Ersatzschaltbild mit konzentrierten Massen ausgegangen. Der Kran hat 5 Freiheitsgrade, in denen unabhängig voneinander die Bewegung gleichzeitig erfolgen kann. Die Aufgabe besteht darin, die pendelnde Last mit vorgegebener Genauigkeit auf einer vorgeschriebenen Bahn über ein lagegeregeltes Antriebssystem mit Drehwerk, Katzfahrwerk und Hubwerk zu positionieren. Über die Lagrange Bewegungsgleichung 2. Art lässt sich das System der Bewegungsgleichungen in der bekannten allgemeinen Form aufstellen:

$$M = D(q)\ddot{q} + C(\dot{q}, \dot{q}) + B(\dot{q}) + G(q) + J^T(q)F_x \quad (3)$$

Diese Darstellung stellt eine generelle Beschreibung von verkoppelten Bewegungen dar. Der auszuwählende Regler wird auf das Pendelmodell mit mittlerer Seillänge unter Vernachlässigung sämtlicher Kräfteverkopplungen optimiert und soll sowohl bei einer zeitlich veränderlichen Seillänge als auch bei den angreifenden Coriolis- und Zentrifugalkräften ein hinreichend genaues Regelverhalten besitzen.

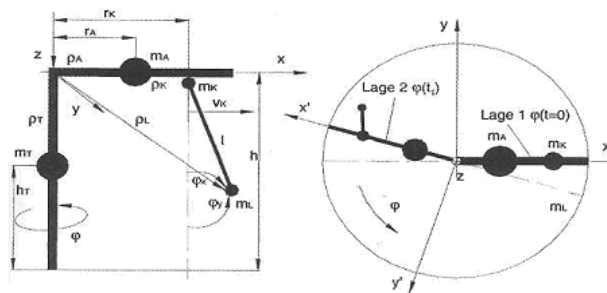


Bild 7: Kinematisches Ersatzschaltbild des Drehkranes mit konzentrierten Massen [4]

### Ergebnisse

Zur Verifikation der theoretischen Vorüberlegungen wurde das komplette System der Bewegungsgleichungen mit Matlab/Simulink modelliert und ein LQ- und H<sub>∞</sub>-Regler nach den bekannten Bemessungsvorschriften entworfen. Die Bilder 8 und 9 zeigen die Lastbewegung bei gleichzeitiger Betätigung des Katzfahr-, Dreh- und Hubwerkes. Im Bild 8 wurde die Katze von 15 m auf 23 m verfahren, das Drehwerk um 45° verdreht und die Seillänge von 36 m auf 52 m vergrößert (Absenken der Last). Bild 9 zeigt die Lasttrajektorie bei einer Katzfahrt von 15 m auf 7 m, einer Drehung um 45° und einer Seillängenveränderung von 36 m auf 20 m (Heben der Last). Der Regler wurde hierbei für ein lineares Modell mit mittleren Parametern und ohne Verkopplung der Bewegungsachsen ausgelegt, während das reale Kranmodell mit allen Einflussfaktoren modelliert wurde. Berücksichtigt wurde ebenfalls die Strombegrenzung in den Antrieben, die die dynamische Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems wesentlich beeinflusst und bei zu geringer Wichtung der Stellgrößenbeschränkung zum Verlust der Stabilität führen kann. Letzteres kann vermieden werden durch einen zweckmäßigen Kompromiss zwischen den Wichtungsfaktoren für die Stellgrößenbeschränkung und die Regelabweichung. Abschließend muss betont werden, dass mit der Wahl der Wichtung der Stell- und Zustandsgrößen das Regelverhalten in weiten Grenzen eingestellt werden kann, sodass die gezeigten Ergebnisse lediglich exemplarischen Charakter haben.

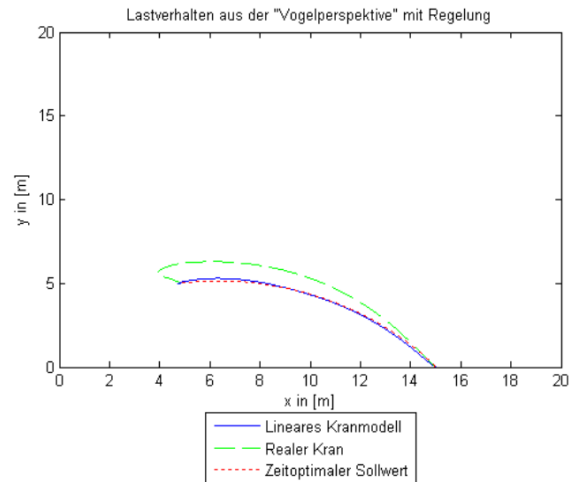
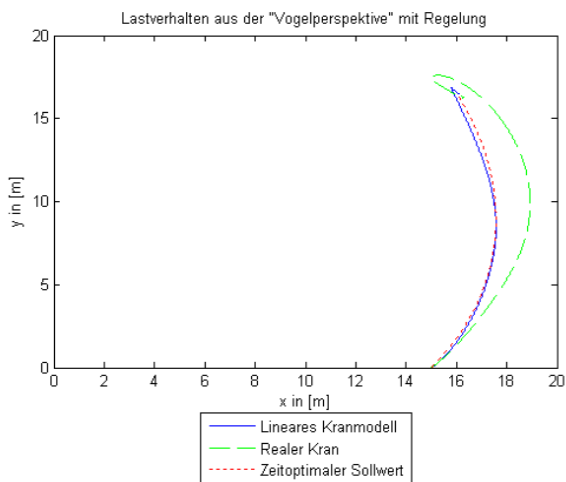
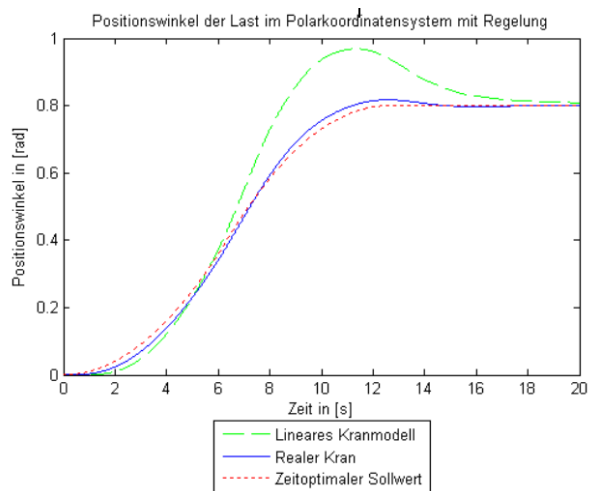
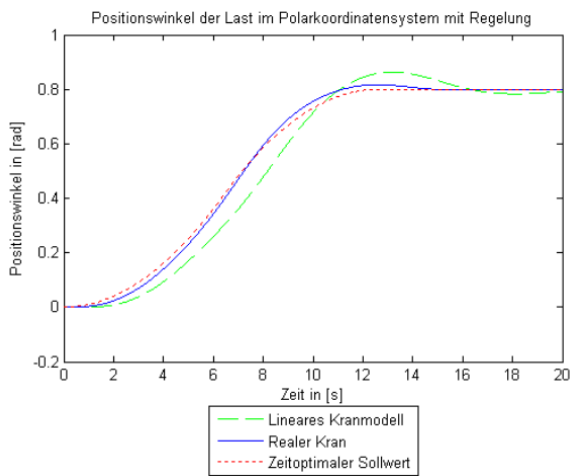
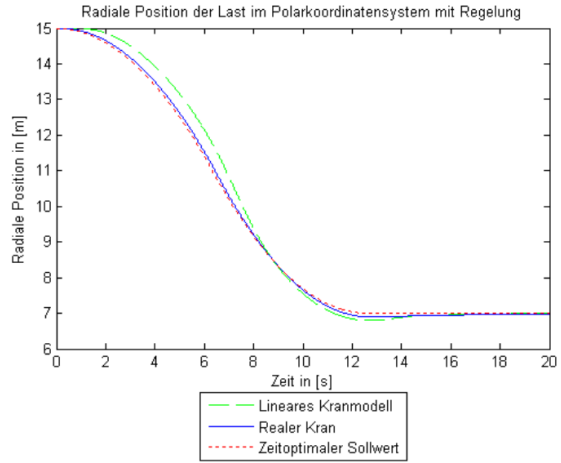
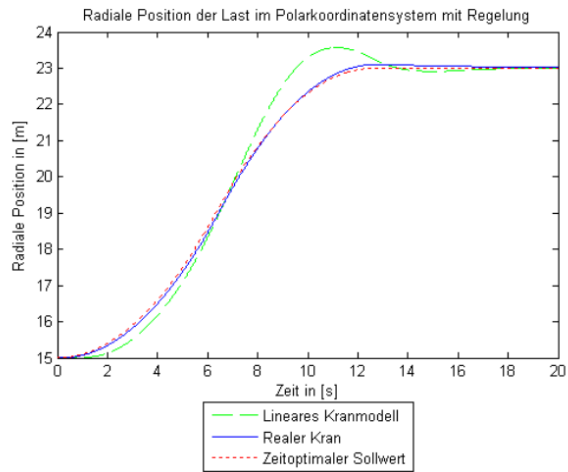


Bild 8: Lasttrajektorie bei Überlagerung von Katzfahrt, Drehbewegung und Lasthub; Bild 9: Lasttrajektorie bei Überlagerung von Katzfahrt, Drehbewegung und Lasthub;

$\varphi = (0 \dots 45)^\circ, r = (15 \dots 23)m, l = (36 \dots 52)m$

$\varphi = (0 \dots 45)^\circ, r = (7 \dots 15)m, l = (20 \dots 36)m$



## Feed forward and Feed back control approach for vibration isolation and damping

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Palis  
Projektbearbeiter: Dipl.-Ing. Sergiy Sokolov  
Kooperationen: SYMACON GmbH, Barleben  
Förderung: AiF

For active control of sound and vibration, two types of control strategies have been widely applied. The first one is a feed-forward control method, which requires both a reference signal and an error signal. If the correlation between the reference and the error signal is perfect, it is possible to drive the error signal to zero. Adaptive feed-forward algorithm has proved to be successful for application in which the excitation signal is steady state (pure tone, multiple frequencies or random). The second one is a feedback control method, which can attenuate impulsive disturbances. The purpose and contribution of this paper consist in the discussion of a hybrid structural control architecture which combines feedback-based transient suppression and robust narrow band disturbance compensation using adaptive filtering methods.

It was shown by others authors that inclusion of a feedback loop in addition to an adaptive feed-forward path leads to faster convergence times of the adaptive compensator. Demonstrations of the hybrid control system are presented for a vibration isolation system, Fig. 10, subjected to mixed transient and narrow-band disturbance.

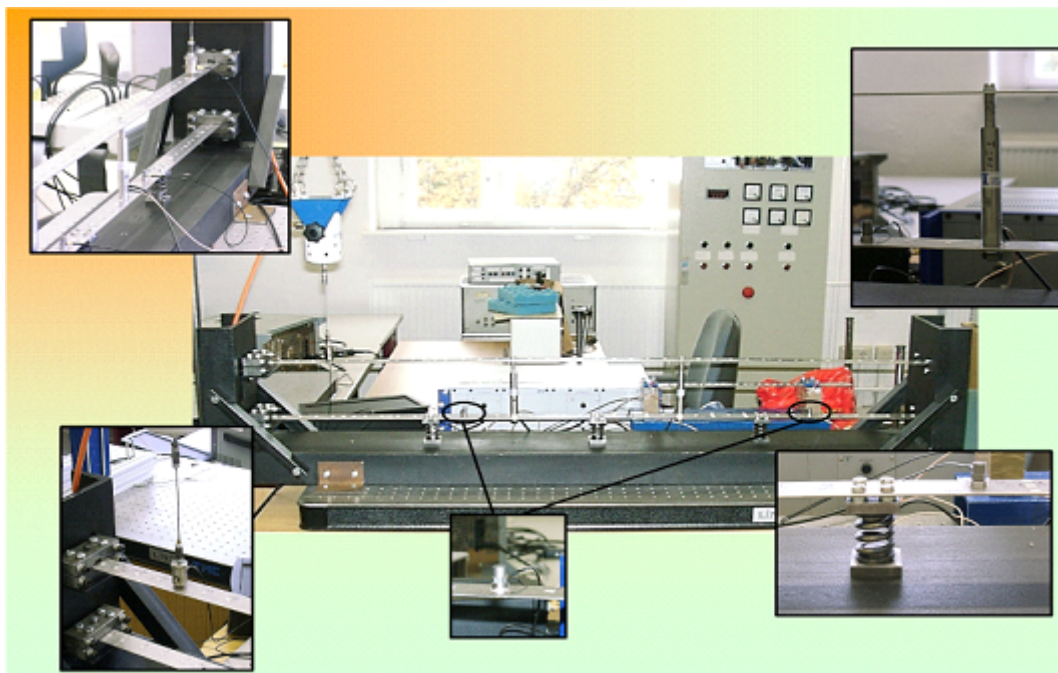


Fig. 10: Experimental set up

The conventional feed-forward algorithm needs a measured reference signal to update the filter coefficients. However, if the disturbance consists of some tones (for example vibration caused by electrical drives) and the reference is disturbed by noise, the needed reference signal can be generated with the estimated frequencies. A frequency estimation method that uses adaptive notch filter with constrained poles and zeros is chosen because of its low computational burden and fast convergence rate. The reference signal is generated for each disturbance frequency separately and therefore each frequency component is processed independently using an adaptive filter with two coefficients.

The difficulty in developing a feedback control is frequently caused by the fact, that most flexible structures on the one hand are characterised by the presence of numerous natural



vibration modes within the control bandwidth and on the other hand are subjected to parameter variations. Hence, these structural systems require robust control algorithms such as  $H_2$ ,  $H_\infty$  control with frequency shaped cost functions or sliding mode control (SMC). SMC techniques are used in this study to achieve robust vibration control performance in the presence of uncertainties. In fact, the SMC control is naturally robust with respect to uncertainties in the structural parameters. SMC consists of a control law that switches with infinite speed to drive the system on a specified state trajectory, called the sliding surface, and is capable of keeping the state on this surface. One remarkable characteristic of SMC is that its design can be performed using analytical tools typical for linear systems. The observer utilizes the same sliding mode concept as in the sliding mode control theory, and it is known to have robustness property and disturbance decoupling property.

The theoretical and experimental results, Fig. 11, prove that hybrid control offers good possibilities for improving active control effectiveness in industrial noise and vibration control problems characterized by mixed impulsive and persistent disturbances.

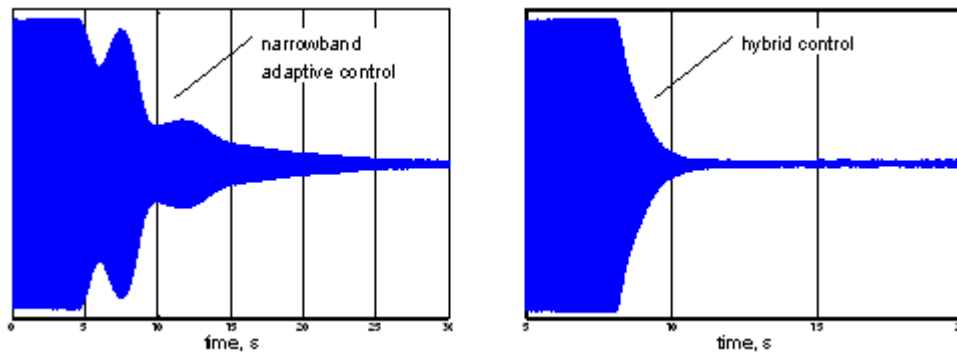


Fig. 11: Experimental results for the hybrid control scheme

## Auslegung und Optimierung der elektrischen Aktorik eines aktiv gelagerten Rundtisches (Teilaufgabe: Robuste Regelung)

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Palis  
Kooperationspartner: EMB Barleben, H&B Omega Osterweddingen  
Förderung: Landesinitiative LIST Sachsen-Anhalt  
Bericht: M. Sc. D. Draganov, Dipl.-W.-Ing. T. Schallschmidt

### Einführung

Die Magnetlagerung besitzt im Unterschied zu konventionellen Lagertypen eine Reihe von Vorteilen und wird dadurch immer häufiger eingesetzt. Das Anwendungsgebiet ist jedoch durch hohen Platzbedarf, große Anschaffungskosten und niedrige dynamische Steifigkeit deutlich beschränkt. Die Ursachen dafür kann man im allgemeinen wie folgt unterteilen:

- Parameterunsicherheiten, vor allem bei Betriebspunktänderungen,
- Systemstörungen und Messrauschen, die das Nutzsignal verzerren und infolge notwendiger Filterung die Regeldynamik beeinträchtigen.

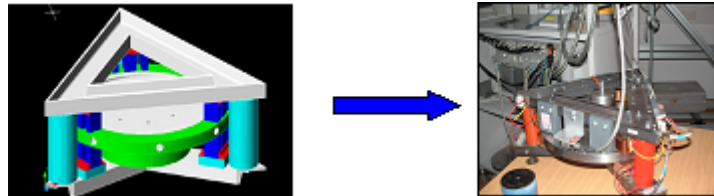


Bild 12: Modell des magnetgelagerten Rundtisches

In der oben genannten Teilaufgabe wird das Ziel verfolgt, diese Eigenschaften der Regelung zu minimieren, bzw. deren Einfluss auf das Magnetlager zu unterdrücken.

Als Versuchsobjekt dient ein Rundtisch mit 3 magnetisch gelagerten Freiheitsgraden ( $z$ ,  $j_x$ ,  $j_y$ ). Die Konstruktion bestehend aus Aktoren, Sensoren, Steuereinheit und gelagertem Rotor stellt ein typisches mechatronisches Objekt dar. Der bewegliche Teil der Anlage (Rotor) wird als ein Starrkörper betrachtet. Die geometrische Zusammenhänge zwischen Koordinaten des Bezugspunktes, der Kraftangriffspunkte und der Messpunkte werden durch Jakobi-Matrizen beschrieben. Die Energieversorgung der Aktoren erfolgt über geschaltete Stromsteller mit analoger Stromregelung. Die elektrische Zeitkonstante des Stromregelkreises liegt im Bereich von 1-2 ms (je nach Betriebspunkt) und kann somit für die Lagereger vernachlässigt werden. Der Einsatz des mit MATLAB verbundenen DSP ermöglicht die schnelle Erprobung des entworfenen Regelalgorithmus. Die Verknüpfung der Stromsteller und der Sensoren erfolgt durch DAC/ADC-Schnittstellen. Für die bessere Übersicht wird nur ein einzelner Aktor- Kanal dargestellt. Das Störverhalten der Anlage wird mit Hilfe eines Shakers untersucht, dieser wirkt direkt auf den Rotor.

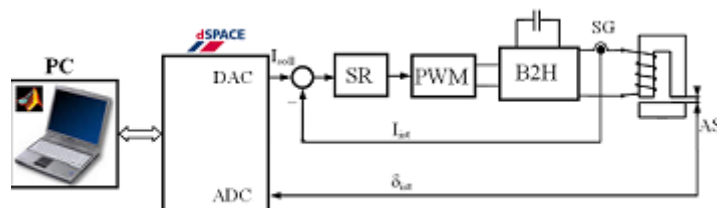


Bild 13: Prinzipielle Struktur des Rundtisches

## Modellbildung

Die Grundlage für die Modellbildung bildet die mathematische Beschreibung des magnetischen Aktors. Ausgehend von der Reluktanzkraft

$$F = \frac{dW_m}{d\delta} = - \frac{\mu_0 \cdot A \cdot \Theta^2}{\left(2\delta + \frac{l}{\mu_r}\right)^2}$$

$$F \approx K_S \cdot \delta + K_I \cdot I_{akt}$$

ergibt sich nach einer Taylor- Entwicklung

$$K_S = \frac{\mu_0 \cdot W_1^2 \cdot A_3}{(2 \cdot \delta_0)^3} \cdot I_0^2$$

$$K_I = \frac{\mu_0 \cdot W_1^2 \cdot A_3}{(2 \cdot \delta_0)^2} \cdot I_0$$

$$K_V = L_{sp} \cdot \frac{I_0}{\delta_0}$$

Aus den Formeln ist ersichtlich, dass die Faktoren  $K_S$  und  $K_I$  stark nichtlinear vom Betriebspunkt ( $I_0, \delta_0$ ) abhängig sind. Darüber hinaus weist die Bewegungsgleichung des Aktors auf die Instabilität der Strecke hin. Ausgehend davon, lassen sich folgende Anforderungen an die Regelung formulieren:

- Stabilisierung des Systems,
- Stabilität und Regelqualität auch bei Änderung des Betriebspunktes sicher stellen (Robustheit).

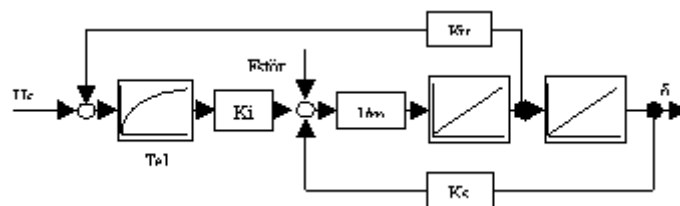


Bild 14: Signalflussplan des linearisierten Modells

## Klassisches Regelverfahren

Für die Lösung der oben genannten Aufgabe hat sich der Einsatz eines PID-Regler bewährt. In Bezug auf Magnetlager werden dabei die Lagereigenschaften durch die einzelnen „Kanäle“ des Reglers sehr anschaulich repräsentiert:

- P- Dynamik der Strecke,
- I- Steifigkeit/stationäre Genauigkeit,
- D- Dämpfung.

Die bessere Ausnutzung der zur Verfügung stehender Steuerenergie zeigt ein optimal errechneter Zustandsregler (LQR). Das Problem des Differenzierens des verrauschten Wegsignals kann zum Teil anhand eines Beobachters gelöst werden. Außerdem bietet ein

Beobachter eine Möglichkeit die anderen Zustände oder Prozessparameter zu ermitteln, (z. B. die stationäre Störkraft/Gewichtskraft des gelagerten Werkstückes). Unter der Annahme, dass der Stromregler unendlich schnell dem Stromsollwert folgt, lassen sich die Faktoren im Lageregler kompensieren.

Eine bessere Rauschunterdrückung garantiert jedoch ein Kalman-Filter, der die Trennung von System- und Messrauschen mit dessen anschließender Unterdrückung sicherstellt und damit die höhere Dynamik des Reglers gewährleistet. Das Filter hat die gleiche Struktur wie ein Beobachter, dessen Korrekturmatrix sich aus Kovarianzen des Mess- und Systemrauschens errechnet.

#### Norm-Optimaler Regler

Eine normoptimale Regelung besitzt alle oben genannten Vorteile und darüber hinaus bietet sie die Möglichkeit, die dynamischen Eigenschaften der Strecke im Frequenzbereich vorzugeben. Man unterscheidet zwischen Norm des Systems und Norm des Signals.

Im Grund des Entwurfes liegt ein dynamisch gewichtetes Modell vor, das mittels Gewichtsfunktionen erweitert wird und deren Norm anschließend minimiert wird. Eine Norm des Systems bewertet das Verhältnis zwischen dem Ein- und Ausgangssignal, wie folgt:

- Minimieren der 2-Norm einer Übertragungsfunktion ist die  $\infty/2$ -Norm-Systemverstärkung, d.h. minimale Amplitude des Regelungsfehlers, der durch Leistung der Anregung verursacht ist.
- Minimieren der  $\infty$ -Norm einer Übertragungsfunktion ist die  $2/2$ -Norm-Systemverstärkung, d.h. minimale Leistung des Regelungsfehlers, die durch Energie der Anregung verursacht ist.

Die ersten praktischen Untersuchungen zeigen jedoch unbefriedigenden Ergebnisse: mangelhafte Stabilität, kleine Steifigkeit und bleibender Regelfehler. In Analogie zur PID-Struktur wird die gewichtete Strecke auf einen I-Zustand erweitert und nach 2-Norm optimiert. Wie es zu erwarten ist, zeigt das System ähnliches Stör- und Führungsverhalten, bietet jedoch durch frequenzabhängige Gewichtsfunktionen mehr Freiheitsgrade für den Reglerentwurf. Bei der Suche nach  $H_\infty$ -optimalen Regler gibt man zusätzlich einen Grenzwert  $\gamma_{\min}$  für die vermutlichen Parameterschwankungen vor, mit dem praktisch die Robustheit der Regelung vordefiniert wird.

#### Zusammenfassung/Ausblick

Das gezeigte Vorgehen zeichnet sich durch eine schrittweise Erhöhung der Anzahl der zu wählenden Freiheitsgrade und steigende Regelungsqualität aus. Die Regelungsqualität bleibt jedoch weiterhin betriebspunktabhängig, d. h., dass die besten Ergebnisse nur in der Nähe eines Arbeitspunktes erreicht werden konnten. Für eine Regelung, die den ganzen Positions- und Kraftbereich abdeckt, werden noch Untersuchungen zur Parameternachführung bzw. adaptiven Regelung durchgeführt.

### **Adaptive ballistische Steuerung anthropomorpher Roboter**

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Palis  
Kooperationen: Fraunhofer Institut Magdeburg, Lomonossov Universität Moskau,  
TU Vladivostok  
Förderung: Industrie  
Bericht: M. Sc. Yuriy Zavgorodniy

Für die effektive Lokomotion autonomer anthropomorpher Roboter sollen Methoden zur Synthese der Bewegungssteuerung entwickelt werden. Die Theorie der ballistischen Steuerung zeichnet sich durch eine Reihe von Vorteilen aus. Sie garantiert minimalen Energieverbrauch während der Bewegung und entspricht im hohen Maße der menschlichen Bewegung auf einer beliebigen Oberfläche (natürliches Gangverhalten). Bei der Anwendung der ballistischen Steuerung entstehen Stabilisierungsprobleme der Roboterbewegung, weil sich sowohl die inneren Robotereigenschaften als auch die Umwelteinflüsse während der Bewegung erheblich ändern können und dadurch die dynamischen Roboterparameter beeinflussen.

Das Hauptziel des Vorhabens liegt in der Entwicklung neuer effektiver Methoden zur Synthese der Bewegungssteuerung von anthropomorphen Robotern. Diese Methoden kombinieren die Vorteile der ballistischen Steuerung mit der Fähigkeit zum Selbstlernen im Echtzeitbetrieb durch Einsatz von intelligenten Technologien. Dies erlaubt die Minimierung des Energieverbrauchs und gewährleistet eine stabile Roboterbewegung bei a priori unbekanntem Eigenschaften der Umgebung bzw. des Untergrundes.

Auf der Grundlage von Sensordaten (Beschleunigungs-, Lage- und Kraftsensoren) soll das Steuerungssystem durch Einsatz von lokalen anpassungsfähigen Reglern nicht nur globale Stabilität der Bewegung, sondern auch die erforderlichen dynamischen Eigenschaften garantieren.

### **Intelligente Aktorik und Generierung optimaler Bewegungsabläufe für mobile Roboter**

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Palis  
Projektbearbeiter: M. Sc. Yuriy Zavgorodniy  
Kooperationen: Hilscher GmbH, Hattersheim, Hochschule Anhalt (FH), Köthen,  
SYMACON Bildverarbeitung GmbH, Barleben  
Förderung: AiF

Humanoide Roboter spielen als ein wesentliches potentiell Einsatzgebiet (Demonstrator, Teilnahme am Robocup) des zu entwickelnden modularen Steuerungssystems in den verschiedensten Ausbaustufen eine wichtige Rolle. Ihre Funktionsfähigkeit wird den Marktwert der Gesamtlösung wesentlich beeinflussen. Aus diesem Grunde kommt der Entwicklung der Roboteraktorik (Antriebssystem) und der Generierung humanoider Bewegungsabläufe eine zentrale Bedeutung zu. Die Lösung dieser Aufgabe setzt eine Regelung der einzelnen Achsantriebe voraus, die die notwendigen Bewegungstrajektorien unter Berücksichtigung von Nichtlinearitäten (Getriebeispiel, Reibung) und Kräftechselwirkungen mit vorgegebener Genauigkeit abarbeiten. Die Bewegungstrajektorien der Antriebe werden aus den zu entwickelnden Gang- und Bewegungszyklen abgeleitet. Die Qualität dieser Trajektorien hat einen entscheidenden Einfluss auf die Ästhetik der Roboterbewegungen und die Stabilität der jeweiligen Roboterposition. Die Lösung dieser Teilaufgabe erfolgt an einem modular abrüstbaren Prototyp eines humanoiden Roboters. Das Ziel des Teilprojektes ist die Entwicklung und der Aufbau eines umfangreichen ChipSupport sowie einer Applikationsbibliothek für netX-chip, wodurch eine breite Anwendung und Vermarktung der netX-basierten Lösungen ermöglicht wird.

### **Symbolische Steuerung einer künstlichen Hand**

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Palis  
Projektbearbeiter: Dipl.-Ing. A. Zeghib  
Kooperationen: INSA Rennes, Max-Planck-Institut Magdeburg,  
Universität de Versailles  
Förderung: DAAD

Das Projekt hat die symbolische Steuerung einer künstlichen Hand mit myoelektrischen Signalen (oder EMG: Elektromyogramm) zum Ziel. Es basiert auf der Zusammenarbeit zwischen der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg und dem Max-Planck-Institut Magdeburg einerseits und dem INSA/IRISA Rennes und der Universität de Versailles andererseits.

Die Neuheit des Projektes besteht in der Durchführung einer Zwischenauswertung der EMG-Signale und der Aktuatorsteuerung aus Gründen der Sicherheit, der Ergonomie und Adaptation an den Behinderten. Diese Etappe extrahiert symbolische Prototypen, wie beispielsweise Finger beugen, aus den Signalen und gestattet eine Interpretation der Absicht des Behinderten. Diese Absicht kann in natürlicher Sprache ausgedrückt werden durch Benutzen von Formalismen der Fuzzy-Logik (Beispiel: stärker drücken).

Die zweite Etappe besteht in der Anwendung der identifizierten Prototypen zur Steuerung, um die entsprechenden Bewegungen realisieren zu können. Diese Steuerung wird an einem Modell getestet. Hierfür steht ein naturgetreues Simulationsmodell einer künstlichen Hand zur Verfügung.

### 3.1.3 Promotionen

Verleihung der Ehrendoktorwürde an Prof. Dr. Kalashnikov, Dekan der Deutschen Technischen Fakultät der Technischen Nationalen Universität Donetsk (Ukraine) am 01.11.2005

Die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg verlieh am 01. November 2005 die Würde eines Doktoringenieurs Ehren halber (Dr.-Ing. E. h.) an Prof. Dr. Viktor I. Kalashnikov, Dekan der Deutschen Technischen Fakultät der Technischen Universität Donetsk, Ukraine. Er wurde aufgrund seiner herausragenden Leistungen in der Entwicklung der Beziehungen zwischen der TU Donetsk und der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg im Besonderen sowie der Ukraine und der Bundesrepublik Deutschland im Allgemeinen, seiner hervorragenden pädagogischen Tätigkeit in der studentischen Ausbildung und seiner wissenschaftlichen und wissenschaftsorganisatorischen Arbeit mit dieser Auszeichnung geehrt.

Professor Kalashnikov ist ein anerkannter Wissenschaftler auf dem Gebiet der mikroprozessorgesteuerten Elektroantriebstechnik. Seine derzeitigen Arbeiten konzentrieren sich auf das Gebiet der regenerativen Energiequellen und spielen eine wesentliche Rolle bei der Konzeption für die Errichtung eines Windparks in der Ukraine und beim Aufbau eines Großprojekts zum intelligenten Energiemanagement von dezentralen Energieerzeugern und -verbrauchern. Seine wissenschaftlichen Leistungen finden u. a. Ausdruck in einer Vielzahl von wissenschaftlichen Veröffentlichungen und fünf Patenten. Hervorzuheben ist sein Engagement in der Förderung junger Nachwuchswissenschaftler, die maßgeblich durch die Kooperation mit dem Institut für Elektrische Energiesysteme der Universität Magdeburg bestimmt wird.

Besondere Verdienste bei der Umgestaltung der Hochschullandschaft seines Landes und der Entwicklung der Kooperationsbeziehungen mit der Universität Magdeburg hat sich Prof. Kalashnikov in der Zeit nach der Erlangung der Unabhängigkeit der Ukraine mit der Gründung der Deutschen Technischen Fakultät (DTF) der TU Donetsk erworben. Die DTF entstand 1992 als Gemeinschaftsprojekt mit dem Institut für Elektrische Energiesysteme der Universität Magdeburg und der Siemens AG und wird seitdem vom Deutschen Akademischen Austauschdienst im Rahmen des Programms „Deutschsprachige Studiengänge“ gefördert. Zur Zeit existiert an der DTF ein gemeinsamer Masterstudiengang „Elektrische Energiesysteme“ nach mit der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik abgestimmten Studienplänen mit Ausbildungsabschnitten in Magdeburg. Die leistungsstärksten Absolventen erhalten ein Doppeldiplom. Im Rahmen dieses Projektes entstanden mehrere Lehrbücher und Lehrmaterialien, die für die studentische Ausbildung eingesetzt werden.

Prof. Kalashnikov wurde 1939 in Podgorowka, Ukraine, geboren. Von 1961 bis 1967 studierte er am Polytechnischen Institut Donetsk (PI Donetsk) im Studiengang „Elektromechanik“. Nach dreijähriger Assistentenzeit am PI nahm er ein Promotionsstudium an der damaligen Technischen Hochschule Magdeburg auf, das er im Jahre 1973 erfolgreich abschloss. Danach arbeitete er als Dozent und Lehrstuhlleiter am PI Donetsk, der späteren TU Donetsk. Er ist Gründungsdekan der 1992 errichteten Deutschen Technischen Fakultät der TU Donetsk. Für seine Verdienste um die Entwicklung der Beziehungen zwischen der Ukraine und der Bundesrepublik Deutschland wurde er mit dem Verdienstkreuz der Bundesrepublik Deutschland ausgezeichnet. Er ist Honorarkonsul der Bundesrepublik Deutschland für die Gebiete Donetsk, Lugansk und Zaporoshe.

Professor Kalashnikov genießt auch in der regionalen und nationalen Industrie hohe Anerkennung, um deren Förderung er besonders bemüht ist. Auf seine Initiative wurde 2002 mit Unterstützung der Firma Siemens und der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg in Donetsk die Ukrainische Technische Akademie gegründet mit der Zielstellung der fachlichen Weiterbildung von Ingenieuren der Donetsker Region. Darüber hinaus richtet die Firma Siemens in Donetsk ein Ingenieurtechnisches Zentrum (ITC) ein, dessen Aufgabe in der Bearbeitung technischer Projekte in der Ukraine und im Ausland besteht. Den Ausschlag für diese Entscheidung gaben die positiven Erfahrungen in der Kooperation mit der Deutschen Technischen Fakultät und die Leistungsfähigkeit ihrer Absolventen. Leiter des ITC Siemens Ukraine ist Professor Kalashnikov.



### 3.1.4 Veröffentlichungen

- ♦ Krause, F.; Horn, P.; Werner, A.; Palis, F.; Grigorow, O. W.; Smolyaninov, D.:  
**Energieoptimale Steuerung mit überlagerter Regelung für Drehkrane mit Katz- und Wippausleger**  
In: Krause, Friedrich (Hrsg.); Haase, Hartwig (Hrsg.): Von der Automatisierung bis zur Zertifizierung (13. Internationale Kranfachtagung Magdeburg, 3. Juni 2005). - Begleitband. Magdeburg: LOGiSCH, 2005, S. 206 - 221 (Berichte aus dem Institut / IFSL: Reihe 3, Tagungsberichte 20)
- ♦ Tyshakin, O.:  
**Der zweistufige Matrixumrichter: ein neues Stellglied für die elektrische Antriebstechnik**  
In: Habiger, Ernst (Hrsg.); Brandenburg, Günther (Hrsg.); Müller, Kilian (Hrsg.): A&D Kompendium 2005: Automation & Drives; das Referenzbuch der Automatisierungs- und Antriebstechnik. München: Publish-Industry-Verl., 2005, S. 96
- ♦ Palis, F.; Sokolov, S.:  
**Adaptive vibration damping with piezoelectric actuator system**  
In: Bencic, Zvonko (Hrsg.): Electrical drives and power electronics, EDPE 2005 (13th international conference. 2nd joint Croatia Slovakia conference Dubrovnik, Croatia September 26 - 28 2005). - proceedings. Zagreb : KoREMA, 2005, E05-14, [Elektronische Ressource] (EDPE 2005)
- ♦ Palis, F.; Sokolov, S.:  
**Variable structure control for vibration damping applications**  
In: Callaos, Nagib (Hrsg.); Lesso, William (Hrsg.): Systemics, cybernetics and informatics (9th World multiconference Orlando, Florida, USA July 10-13, 2005). - proceedings. Vol. II. Orlando : IIS, International Institute of Informatics and Systemics, 2005, S. 233 - 237 (WMSCI 2005)
- ♦ Zeghib, A.; Palis, F.; Ben-Oueddou, F.:  
**EMG-based finger movement classification using transparent fuzzy systems**  
In: Montseny, Eduard (Hrsg.); Sobrevilla, Pilar (Hrsg.): Joint EUSFLAT - LFA 2005(4th conference of the european society for fuzzy logic and technology, EUSFLAT 2005 and 11 rencontres phrancophones sur la logique floue et ses applications (LFA 2005) Barcelona, Spain September 7 - 9 2005). - proceedings. Barcelona: Technical Univ. of Catalonia, 2005, S. 816 - 821, [Elektronische Ressource]

- ♦ Palis, F.; Rusin, V.; Schmucker, U.; Schneider, A.; Zavgorodniy, Y.:  
**Walking robot with force controlled legs and articulated body**  
In: IMEKO (Veranst.); (Veranst.): Measurement and control in robotics, ISMCR 2005 (15th international symposium on measurement and control in robotics Brussels 08 - 10 November 2005). - proceedings. Brüssel, 2005, [Elektronische Ressource]
- ♦ Palis, F.; Rusin, V.; Zavgorodniy, Y.; Schmucker, U.; Schneider, A.:  
**Adaptive multi-legged robot with articulated body**  
In: Technische Universität Ilmenau (Veranst.): Adaptive motion in animals and machines, AM 2005 (Ilmenau September 25th - 30th 2005). - contributed papers. Ilmenau, 2005, 7 S., [Elektronische Ressource]
- ♦ Zeghib, A.; Palis, F.; Tsenov, G.; Shoylev, N.; Mladenov, V.:  
**Performance of surface EMG signals identification using intelligent computational methods**  
In: WSEAS transactions on systems [Athens] 4(2005), Nr. 7, S. 1118 - 1127
- ♦ Kalashnikov, V. I.; Palis, F.:  
**Bolons'kij proc dosid nimecni, viddzerkalennja v ukraini**  
In: Vestnik nacional'nogo techniceskogo universiteta "Char'kovskij Politechniceskij Institut", Serija Elektrotehnika, elektronika i elektroprivod [Char'kov] 45(2005), S. 20 22
- ♦ Konyev, M.; Palis, F.; Guillou, X. L.; Gloennec, P. Y.:  
**Fuzzy logic and reinforcement learning**  
In: Vestnik nacional'nogo techniceskogo universiteta "Char'kovskij Politechniceskij Institut", Serija Elektrotehnika, elektronika i elektroprivod [Char'kov] 45(2005), S. 464 - 469
- ♦ Tsepkovskiy, Y.; Palis, F.:  
**Sintez skol'zjascego nejro-fassi reguljatora dlja upravlenija magnituym podvesom**  
In: Vestnik nacional'nogo techniceskogo universiteta "Char'kovskij Politechniceskij Institut", Serija Elektrotehnika, elektronika i elektroprivod [Char'kov] 45(2005), S. 493 - 496
- ♦ Zeghib, A.; Palis, F.; Ouezdou, F. B.:  
**EMG feature evaluation using transparent fuzzy system for hand and finger movements identification**  
In: International Federation for Medical and Biological Engineering (Hrsg.): 3rd European medical & biological Engineering conference, EMBEC'05. IFMBE European conference on biomedical engineering (Prague Czech Republic November 20 - 25 2005). - proceedings. Zagreb: IFMBE, 2005, 2169, [Elektronische Ressource] (IFMBE Proceedings 11)

## 3.2 Fachgebiet Elektrische Antriebstechnik

### 3.2.1 Forschungsprofil

- ♦ Intelligente Bewegungssteuerungen für technologisch verkettete Antriebssysteme (Advanced Motion Control)
  - Optimale Steuerung von Positionier- und Stellantrieben
  - Gleichlaufregelung von elastisch verketteten Antriebssträngen
  - Rendezvoussteuerungen für Fliegende Scheren, Rotierende Sägen, Schnittpressen usw.
- ♦ Steuer- und Regelverfahren für intelligente Elektroantriebe
  - Strom-, Drehzahl-, Feld- und Lageregelung für umrichter gespeiste Drehstromantriebe
  - Drehmomentenrechner und Maschinenmodelle für Drehstromantriebe
  - Neue Umrichterstellglieder (Schaltungstopologie und Steuerverfahren)
- ♦ Generatoren und Regelverfahren für alternative Energieerzeugungsanlagen
  - Drehzahlvariable Generatoren
  - Stellglieder und Regelverfahren für photovoltaische Anlagen

### 3.2.2 Forschungsprojekte

#### **Entwicklung einer Pulsumrichtertopologie mit Stromzwischenkreis für die Kopplung spannungs- und frequenzvariabler Drehstromsysteme**

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Riefenstahl  
Projektbearbeiter: M. Sc. Oleksandr Tyshakin  
Kooperationen: Institut für Automation und Kommunikation e.V. Magdeburg,  
Fa. Elektro- und Automatisierungstechnik GmbH Ilsenburg  
Förderung: Land Sachsen-Anhalt

In den letzten Jahren hat sich der Trend der dezentralen Energieversorgung verstärkt. Die Problemstellung beim Betrieb derartiger Anlagen besteht in der Kopplung der energieerzeugenden und der energieverbrauchenden Systeme, was ein Stellglied zur Anpassung der Systemparameter voraussetzt.

Das wissenschaftliche Gesamtziel des Vorhabens bestand in der Erforschung des Betriebsverhaltens elektrischer Systemkomponenten für dezentrale Energieerzeuger. Der Schwerpunkt der Forschungsarbeit lag auf dem Gebiet der Optimierung des Betriebsregimes dezentraler Energieerzeuger insbesondere im Teillastbereich bei gleichzeitiger Reduktion der Netz- und Umweltbelastungen. Zu diesem Zweck erfolgte die Entwicklung und Projektierung eines universell einsetzbaren, rückspeisefähigen Umrichters neuartiger Topologie, Bild 15.

Der Umrichter besteht aus Gleichrichter (GR) und Wechselrichter (WR), die über einen speicherlosen Zwischenkreis (ZK) miteinander verbunden sind.

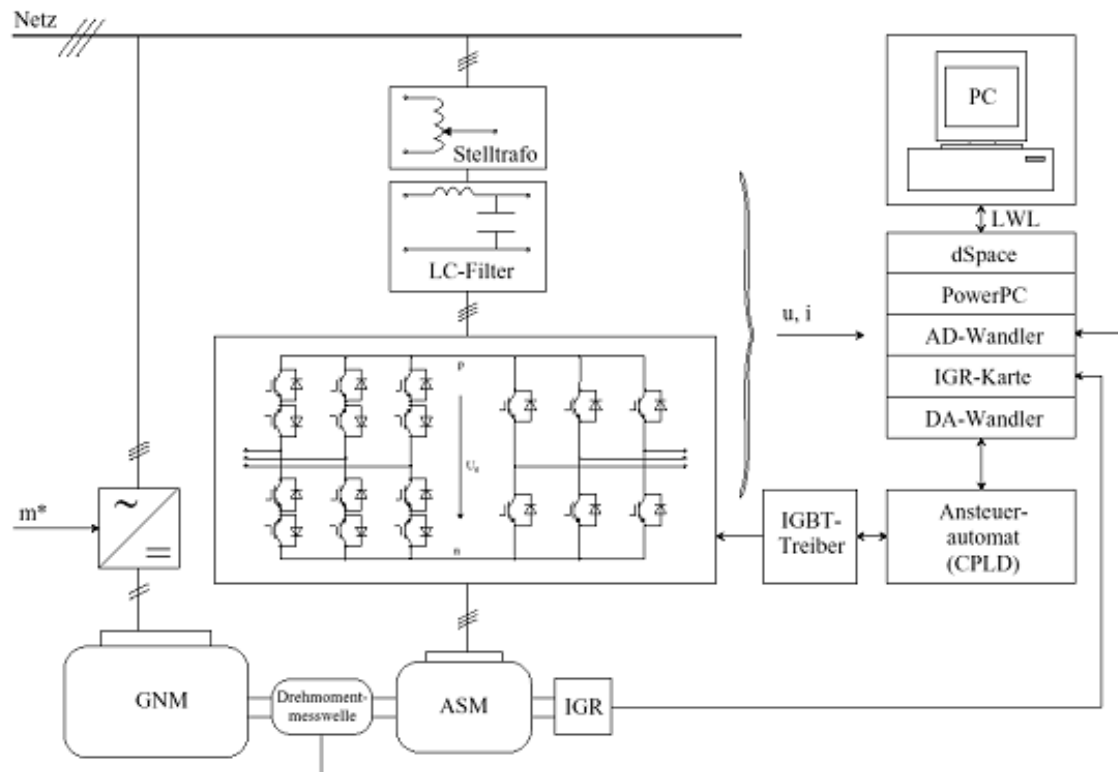


Bild 15: Struktur des Versuchsstandes

Nachfolgend sind einige Merkmale dieser Umrichtertopologie genannt:

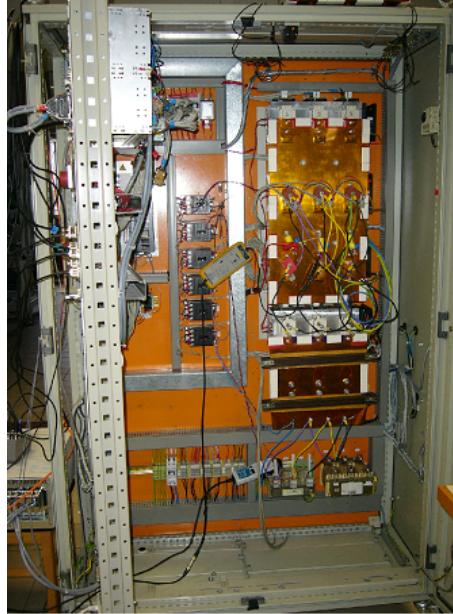
- ♦ keine passiven Energiespeicher im Zwischenkreis, was den Bau von sehr kompakten und zuverlässigen Stellgliedern ermöglicht,
- ♦ stromloses Schalten des Gleichrichters (Zero Current Switch) führt zur Vereinfachung der Kommutierung und zum erhöhten Wirkungsgrad,
- ♦ Vier-Quadranten-Betrieb (Rückspeisefähigkeit),
- ♦ sinusförmige Ein- und Ausgangsströme,
- ♦ einstellbarer Verschiebungswinkel zwischen Eingangsspannung und Eingangsstrom,
- ♦ Freiheitsgrad bei der Auswahl der GR-Topologie, was die Reduzierung der Ventilanzahl abhängig von den gewünschten Energieflussrichtungen ermöglicht.

Der Ansteuerautomat des Umrichters wurde mit Hilfe von CPLD-Bausteine der Fa. Atmel realisiert. Die Programmierung dieser Bausteine erfolgte mit der VHDL-Sprache. Der Modulator und die feldorientierte Regelung wurden in Form eines SIMULINK-Modells unter Verwendung der S-Funktion programmiert und auf dem dSPACE-System implementiert.

Um die Zuleitungsinduktivitäten klein zu halten und somit die Überspannungen an den Schaltern zu vermeiden, muss eine niederinduktive Verschienenung, sogenannte Busbars, verwendet werden, vgl. Bild 16. Im einfachsten Fall bestehen solche Busbars aus zwei parallelen leitfähigen Platten, die durch einen Isolator getrennt sind. Für die Kupferplatten kann die Induktivität nach der folgenden Formel ermittelt werden:

$$L = 31.9 * d * \frac{L}{B}$$

d – Dicke des Dielektrikums  
L – Länge des Busses  
B – Breite des Busses



*Bild 16: Foto der Versuchsanordnung*

Zur Induktivitätsminimierung muss die Breite des Busses mindestens gleich seiner Länge sein, oder idealerweise zu einem Verhältnis  $B/L = 2/1$  streben. Die Dielektrikumdicke muss so klein wie möglich gewählt werden. Hierfür ist eine Kapton-Folie der Dicke  $25 \mu\text{m}$  mit ihrer dielektrischen Festigkeit von  $300 \text{ V}/\mu\text{m}$  geeignet. Kapton besitzt hervorragende physikalische, elektrische und mechanische Eigenschaften in einem breiten Temperaturbereich.

Der Einsatz dieser Umrichtertopologie lässt ein hinsichtlich der Regelungsdynamik und der Netzverträglichkeit wesentlich verbessertes Systemverhalten dezentraler Energieversorgungseinrichtungen bei gleichzeitiger Vereinfachung der ZK-Struktur des elektrischen Stellgliedes erwarten. Die rückspeisefähigen Frequenzumrichter sind vor allem in solchen Applikationen vorteilhaft, die über längere Zeit bremsen müssen und wo die heißen Bremswiderstände eine Gefahr für die Umgebung darstellen, oder bei denen der Platzbedarf für die Bremswiderstände ein Problem ist. Das sind z. B. Aufzüge, Kräne, Rolltreppen, Zentrifugen, Antriebsprüfstände usw. Nicht zuletzt soll man erwähnen, dass durch den speicherlosen Zwischenkreis die Verfügbarkeit des Umrichters erhöht wird, was im Bereich von Offshore-Windkraftanlagen sehr vorteilhaft ist. Das Förderprojekt beinhaltet die Entwicklung, Optimierung und Inbetriebnahme einer neuartigen Umrichtertopologie mit Gleichstromzwischenkreis für die Kopplung frequenz- und amplitudenvariabler Drehstromsysteme.

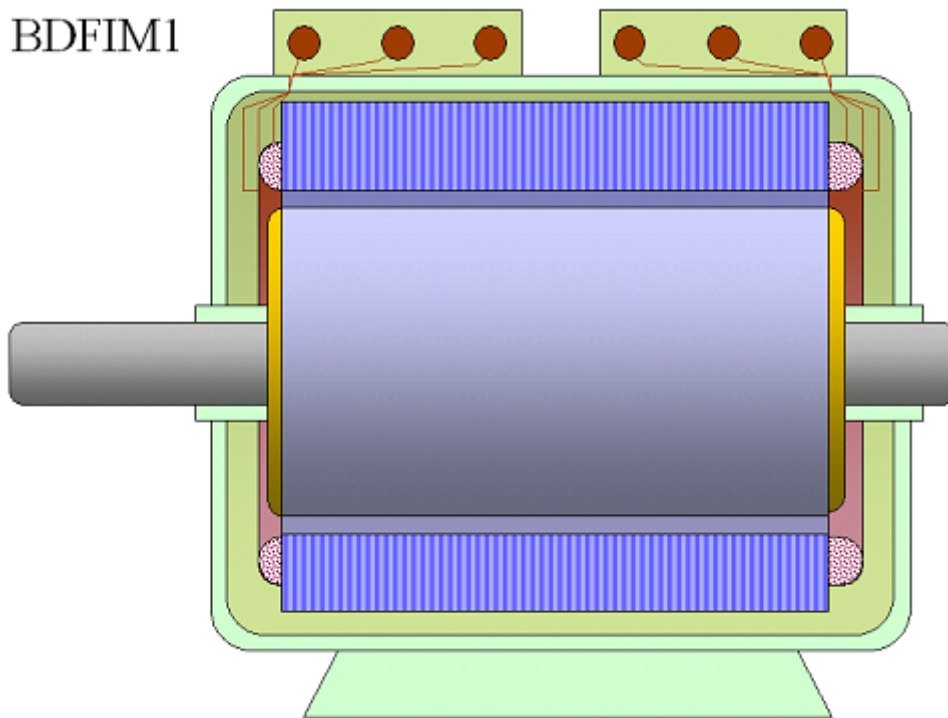
Die Haupteinsatzgebiete des neuartigen Wechselrichters liegen somit im Bereich der dezentralen Energieversorgung, der Netzeinspeisung und der hochdynamischen Antriebssysteme. Das Entwicklungsziel ist ein rückspeisefähiger IGBT-Pulsumrichter mit Gleichstrom-zwischenkreis, der einen netzverträglichen Betrieb ermöglicht und nur wenige passive Bauelemente benötigt. Die Schaltungsstruktur soll eine dynamisch hochwertige, feldorientierte Regelung bei elektrischen Antrieben sowie eine Leistungsfaktorregelung mit einer definierten Wirk- und Blindleistungseinspeisung ermöglichen.

Durch die Umsetzung technologieorientierter Regelungen ist der Nachweis der Einsatzfähigkeit der neuen Stromrichtertopologie für die Gebiete der Windenergieanlagen, Wärmeverbundanlagen und konventionelle Antriebssysteme zu erbringen. Das Ziel des Vorhabens besteht in der Verbesserung der Effizienz dezentraler Energieversorgungsanlagen sowie der Energiequalität.

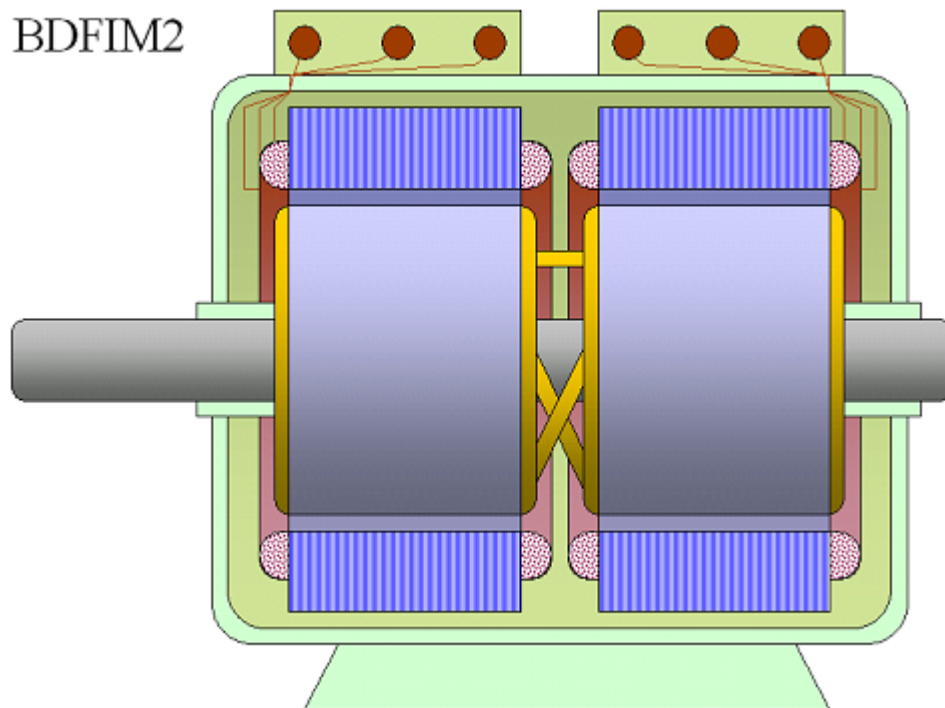
### **Getriebe lose Asynchron-Kaskadengeneratoren in Offshore-Windkraftanlagen großer Leistung**

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Riefenstahl  
Projektbearbeiter: Dipl.-Ing. Jens Kroitzsch  
Kooperationen: ifak Barleben  
Förderung: Land Sachsen-Anhalt

Das Vorhaben beinhaltet Grundlagenuntersuchungen zu umrichter gesteuerten, doppelt gespeisten Asynchrongeneratoren insbesondere für Windkraftanlagen einschließlich deren Regelung. Der Generator besteht aus der Kombination zweier Asynchronmaschinen, deren Rotoren mechanisch und elektrisch mit einander verbunden sind. Das Drehmoment und der Leistungsumsatz werden mit einem Frequenzumrichter über den Strom der zweiten Statorwicklung eingestellt. Dabei kommt eine modifizierte Form der feldorientierten Regelung zum Einsatz. Unterschiedliche Formen der Kaskadenmaschine (doppelt ständergespeiste Drehstrommaschinenkaskade und die selbstkaskadierte Maschine) wurden mit Hilfe dynamischer, geometriebasierter Modelle untersucht. Es zeigte sich, dass sowohl die Kaskadenmaschine mit getrennten Systemen als auch die „selbstkaskadierte Maschine“ mit einem gemeinsamen Eisenkreis in solchen Generatorsystemen sinnvoll einsetzbar ist. Eine elektromagnetische Entkopplung wird bei letzterer Form durch Wahl unterschiedlicher Polpaarzahlen erreicht. Mathematisch lässt sich zeigen, dass die beiden Rotorwicklungen durch eine äquivalente Einzelwicklung ersetzt werden können, welche auf die Felder beider Polpaarzahlen reagiert, Bild 17, Bild 18. Mit Hilfe eines Rotorstrombeobachters kann über die Statorspannung der zweiten Maschine den Rotorstrom geregelt werden. Damit lässt sich das Drehmoment genau und dynamisch hochwertig einstellen. Für Windkraftanlagen ist eine netzspannungsorientierte Regelung ausreichend. Die Einprägung der Ständerströme und die Netzeinspeiseregulation erfolgt über einen IGBT-Pulsumrichter.



*Bild 17: BDFIM1*



*Bild 18: BDFIM2*

### 3.2.3 Veröffentlichungen

- ♦ Hambrecht, A.; Riefenstahl, U.; Bannack, A.:  
**Hohe Produktqualität durch flexible Antriebssysteme**  
In: Stahl und Eisen [Düsseldorf] 125(2005), Nr. 3, S. 83-84
- ♦ Kroitzsch, J.:  
**Einsatzgebiete der Bürstenlosen Doppeltgespeisten Induktionsmaschine (BDGIM)**  
In: Habiger, Ernst (Hrsg.); Brandenburg, Günther (Hrsg.); Müller, Kilian (Hrsg.): A&D Kompendium 2005: Automation & Drives; das Referenzbuch der Automatisierungs- und Antriebstechnik. München: Publish-Industry-Verl., 2005, S. 97
- ♦ Hambrecht, A.; Riefenstahl, U.; Bannack, A.:  
**Hohe Produktqualität durch flexible Antriebssysteme**  
In: Stahl und Eisen [Düsseldorf] 125(2005), Nr. 3, S. 83 - 84
- ♦ Riefenstahl, U.:  
**Anwendung von Beobachtern in automatisierten Elektroantrieben**  
In: Vestnik nacional'nogo tehničeskogo universiteta „Char'kovskij Politehničeskij Institut“, Serija Elektrotehnika, elektronika i elektroprivod [Char'kov] 45(2005), S. 219 - 222



### 3.3 Lehrstuhl Elektrische Netze und Alternative Elektroenergiequellen

Das Jahr 2005 wird als ziemlich erfolgreich in die Geschichte des Lehrstuhls Lena eingehen. Wir haben eine Doktorarbeit von Frau Dr. Biljana Hadzi-Kostova sehr gut abgeschlossen und waren bei zwei weiteren Promotionsverfahren in Deutschland und in Polen aktiv beteiligt. Im Jahr 2005 haben wir 10 Diplomarbeiten - davon vier Doppeldiplome - vergeben und 10 Studienarbeiten bzw. Forschungsprojekte betreut. Dadurch wird auch bestätigt, dass trotz der sinkenden Studentenzahlen eine intensive Betreuung entsprechende positive Effekte bringen kann.

Das Jahr 2005 war auch ein Jahr unserer Exkursion. Diesmal fuhren wir nach Polen, wo wir mit unseren Studenten Wroclaw und Krakow besuchten. Außerhalb des technischen Teils des Besuchs haben wir die beiden schönen Städte etwas erkundet.

Unsere Forschung im Jahr 2005 konzentrierte sich auf die Problematik der Integration von dezentralen und regenerativen Energiequellen in das Energieversorgungssystem. Hier arbeiten wir zusammen mit CIGRE und IEEE um eine Benchmark für die MS-Netze zu etablieren. Unsere Brennstoffzellenaktivitäten, die wir durch Koordination eines Landesverbundprojektes erfolgreich bearbeiten, dürfen wir ab diesem Jahr auch im Rahmen eines EU-Projektes BIOFUELCELL weiterführen. Auch unsere Zusammenarbeit mit den beiden außer-universitären Partnern in Magdeburg dem Fraunhofer-Institut Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF und dem Max-Planck-Institut für Dynamik komplexer technischer Systeme hat sich auf der Basis der gemeinsamen Projekte weiter entwickelt.

Das neue Thema im Jahr 2005 ist die Anwendung von VR-Techniken in der Elektrotechnik, die uns durch Kooperation mit dem IFF und einem Industriepartner neue Erfahrungen beschert hat. Die wiederholte Wahl zum Dekan der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Otto-von-Guerike-Universität Magdeburg und die Tätigkeiten in VDE/ETG V2 und NC CIGRE sind zusätzliche Herausforderungen in unserer täglichen Arbeit. Unsere Kontakte zu den Universitäten des Dresdener Kreises, des High-Voltage Symposiums und zum CRIS-Institut haben uns in diesem Jahr nach Lübbenau, Duisburg und Grenoble geführt.

Traurig sind wir, dass uns einige promovierte Mitarbeiter verlassen haben - was eigentlich eine logische Entwicklung ist - und, dass immer weniger junge Leute Elektrotechnik studieren wollen. Das Doppeldiplom mit der TU Wroclaw ist unsere Antwort darauf.

Zum Schluss darf ich mich beim Land Sachsen-Anhalt, der DFG, dem BMBF, der EU und bei unseren Industriepartnern für die großzügige Unterstützung unserer Forschung im Jahr 2005 recht herzlich bedanken. Die insgesamt 19 wissenschaftlichen Veröffentlichungen und eine aktive Beteiligung an mehr als 20 internationalen Konferenzen weltweit dokumentieren sehr schön unsere Forschungsergebnisse, die ohne o. g. Unterstützung nicht möglich gewesen wären.

Ich wünsche allen unseren Freunden und Förderern alles Gute für das Jahr 2006 und freue mich weiter auf unsere Zusammenarbeit.

Prof. Dr.-Ing. Z. A. Styczynski

### 3.3.1 Forschungsprofil

- ♦ Planung und Betrieb des Verteilungsnetzes
  - Optimierungsalgorithmen für die Planung und den Betrieb einschließlich Expertensysteme und intelligente Techniken
  - Lastprognose und Lastmodellierung mittels probabilistischer Methoden
  - Netzschutzkonzepte, Digitalschutzparametrierung
  - Multikriterielle Netzplanung mit dezentralen Speichern und Erzeugern
- ♦ Alternative Energiequellen und Speicher
  - Solargeneratoren, Brennstoffzellen, Windanlagen, Batteriespeicher
  - Entwicklung von Simulationsmodellen für die Planung und den Betrieb
  - Netzurückwirkungen und Ausbreitung der harmonischen Ströme in verzweigten Netzen
  - Netz- und Inselbetrieb der dezentralen Energiequellen und Speicher
- ♦ Gebäudetechnik
  - Energetische Modelle des Gebäudes
  - Intelligentes Lastmanagement im Gebäude unter Berücksichtigung von dezentralen Speichern
  - Optimale Nutzung der PLC-Technik

### 3.3.2 Forschungsprojekte

#### Netzurückwirkungen in Verteilungsnetzen bei symmetrischen und unsymmetrischen impulsförmigen Belastungen

Bericht: Dipl.-Ing. C. Dzienis

Einführung

In elektrischen Versorgungsnetzen gibt es eine große Anzahl an Verbrauchern, die nichtlineare Eigenschaften aufweisen. Diese Verbraucher können signifikante Quellen von leitungsgeführten Störungen sein, die grundsätzlich in Form von Stromüberschwingungen auftreten. Die dadurch ins Netz eingespeisten harmonischen Ströme breiten sich im Netz aus und interferieren miteinander. Dadurch können im Netz unerwünschte Betriebszustände (z. B. Resonanzen) entstehen. Um diese Betriebszustände zu vermeiden sind die Untersuchungen der Phänomene der Entstehung von Stromharmonischen und deren Ausbreitung von großer Bedeutung.

Modellierungsmethoden

Im Rahmen des Projekts sind die mathematischen Modelle bzw. Algorithmen zu erstellen, mittels derer die detaillierten Analysen des Verhaltens von elektrischen Verteilungsnetzen bei impulsförmigen nichtlinearen Belastungen möglich sind. In diesem Bericht sind zwei Methoden dargelegt. Die erste besteht darin, dass die nichtlineare, pulsierende Last (Quelle der leitungsgebundenen Störungen) am Anschlusspunkt nachzubilden ist. Um eine Nichtlinearität von solchen Lasten zu berücksichtigen, sind die Interaktionsmodelle zu implementieren, die es erlauben, Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Harmonischenordnungen (Spannung – Strom) auszudrücken. Diese Methode ist in der Literatur als Crossed-Frequency-Admittance Matrix (CFAM) bekannt. Hingegen ermöglicht das zweite Modellierungsverfahren eine komplexe Analyse des Verhaltens der ganzen Netzstruktur im Hinblick auf Oberschwingungen durchzuführen. Dabei ist es möglich, sowohl Hauptquellen von Störungen im Verteilungsnetz als auch deren sensitive Punkte (gegenüber den Stromharmonischen) zu bestimmen. Diese Methode basiert auf der spektralen Analyse (SVD) der Jacobi-Matrix, die aus der Berechnung eines harmonischen Lastflusses stammt.

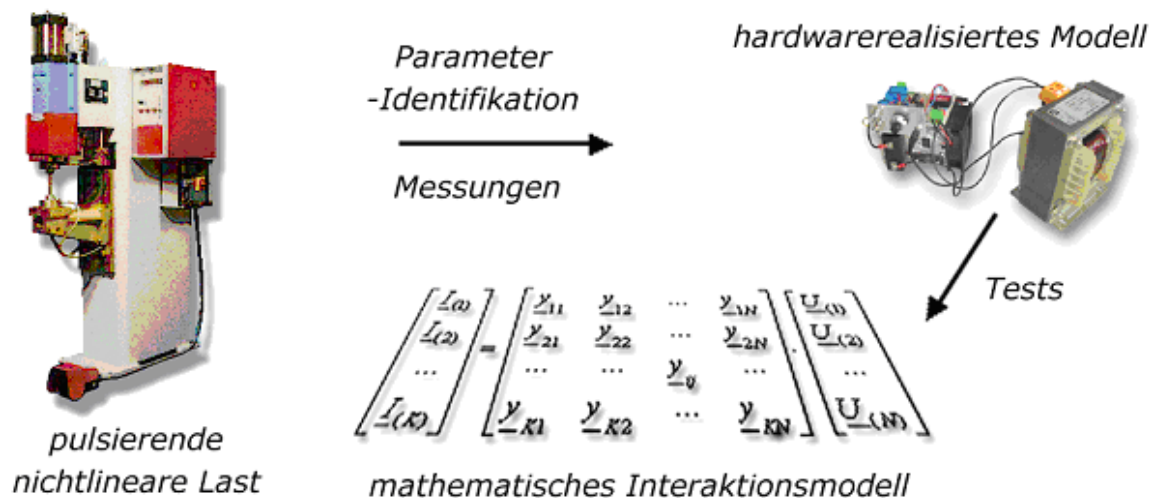


Bild 19: Schematische Darstellung der Modellierung einer großen nichtlinearen pulsierenden Last zum Ziel der Interaktionsuntersuchungen

### CFAM - Interaktionsmodelle

Es ist sehr aufwändig, das Interaktionsmodell für die mit großen pulsierenden Leistungen betriebenen Lasten (Verbraucher) zu erstellen und dazu eine möglichst hohe Genauigkeit der Modelle einzuhalten. Deswegen wurde ein neues Verfahren durchgeführt. Anhand der zahlreichen Messungen an der Last (Widerstandsschweißmaschine) wird deren skaliertes Modell aufgebaut. Das implementierte Modell hat dazu gedient, die mathematischen Nachbildungen in Form der CFAM, die der realen Anlage entsprechen, zu erstellen, Bild 19.

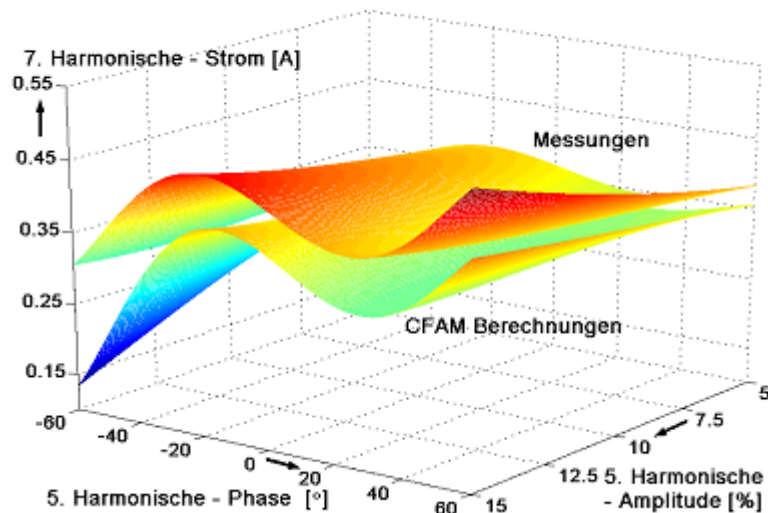


Bild 20: Gemessene und berechnete 7. Harmonische des Stromes bei 60 % Leistung

Die Gleichung 1 stellt eine CFAM – Nachbildung dar, die für 15 % Leistung der Anlage und bei einem bestimmten Gehalt der Spannungsüberschwingungen – jeweils 10 % der 3., 5. und 7. in Bezug auf die Grundfrequenz - berechnet wurde. Man kann hier erhebliche Interaktionen zwischen den verschiedenen Oberschwingungsordnungen erkennen – die Werte der nicht diagonalen Parameter sind signifikant. Besonders starke Wirkungen treten zwischen der ersten und den anderen Harmonischen auf (erste Zeile der CFA – Matrix).

$$Y_{CFAM} = \begin{bmatrix} 0,007 - 0,02j & -0,015 + 0,01j & -0,017 + 0,032j & -0,044 + 0,088j \\ 0,013 - 0,016j & -0,0134 - 0,026j & -0,023 - 0,006j & -0,045 + 0,010j \\ 0,077 - 0,003j & 0,019 - 0,029j & 0,006 - 0,028j & 0,008 - 0,032j \\ -0,001 + 0,001j & 0,020 + 0,001j & 0,024 - 0,014j & 0,028 - 0,015j \end{bmatrix} \quad (1)$$

Darüber hinaus bemerkt man einen erheblichen Einfluss der 7. Harmonischen auf die anderen (die letzte Spalte der CFA – Matrix). Aus diesen Betrachtungen folgt, dass während der Analyse des Betriebes der nichtlinearen Last in Bezug auf Oberschwingungen das Interaktionsphänomen berücksichtigt werden muss. Um das Gebrauchen der mathematischen Nachbildungen bei einer Analyse des Verhaltens von nichtlinearen Lasten nachzuweisen, wurde der Vergleich zwischen den Werten von Stromharmonischen, die von den Messungen gewonnen wurden mit denjenigen, die dank der mathematischen Nachbildungen erzeugen wurden, durchgeführt. In Bild 20 wurde beispielsweise der Einfluss der 5. Harmonischen der Spannung auf die 7. Oberschwingung des Stromes bei 60 % dargestellt. In dieser Abbildung sieht man, dass die mit den CFAM – Parametern berechneten Größen und diejenigen, die von den Messungen gewonnen wurden, die gleiche Tendenz aufweisen. Sehr niedrige Abweichungen (0,5 %) zwischen den beiden Kurven treten bei den Untersuchungen des Einflusses der 5. Harmonischen der Spannung auf. In diesem Fall kann die CFAM - Nachbildung im sehr breiten Variationsbereich der 5. Harmonischen angewendet werden.

Harmonischen-Lastfluss

Während der Untersuchungen von ausgedehnten Verteilungsnetzen ist die spektrale Analyse der Jacobi – Matrix ein gutes komplexes Werkzeug, das zum Bestimmen der sensiblen bzw. starken Punkte im Netz dient. Eine solche Analyse beruht auf den durchzuführenden Lastflussberechnungen für diejenige Oberschwingung, deren Gehalt im betrachteten Netz signifikante Werte annimmt. Zum Ziel der Harmonischen-Lastflussberechnung (ein nichtlineares Problem) setzt man normalerweise das Newton - Raphson - Verfahren ein (2). Die durch das Verfahren zugewiesene Jacobi - Matrix bestimmt den Arbeitspunkt des Netzes.

$$\begin{bmatrix} \Delta P^{(h)} \\ \Delta Q^{(h)} \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} J_{P(\delta)}^{(h)} & J_{P(U)}^{(h)} \\ J_{Q(\delta)}^{(h)} & J_{Q(U)}^{(h)} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} \Delta \delta^{(h)} \\ \Delta U^{(h)} \end{bmatrix}_k \quad (2)$$

Darüber hinaus ist die Jacobi – Matrix als eine Gewichtmatrix zu betrachten, mittels derer, die Einflüsse der einzelnen Knoten auf die statische Netzstabilität im Hinblick auf Oberschwingungen untersucht werden können. Dabei kann die SVD - Faktorisierung (spektrale Analyse) angewendet werden (3):

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta^{(h)} \\ \Delta U^{(h)} \end{bmatrix} = \sum_{j=1}^{2n} \frac{v_j^{(h)} w_j^{(h)T}}{\sigma_j^{(h)}} \begin{bmatrix} \Delta P^{(h)} \\ \Delta Q^{(h)} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Die Untersuchungen der Netzstabilität gegenüber den auftretenden Oberschwingungen wurden an dem realen System durchgeführt – Universitätsnetz, Bild 21. Zunächst wurden die Strom- Spannungsharmonischen an den Anschlusspunkten der Verbraucher mit dem Netz gemessen und anschließend in den Lastflussberechnungsalgorithmus eingesetzt.

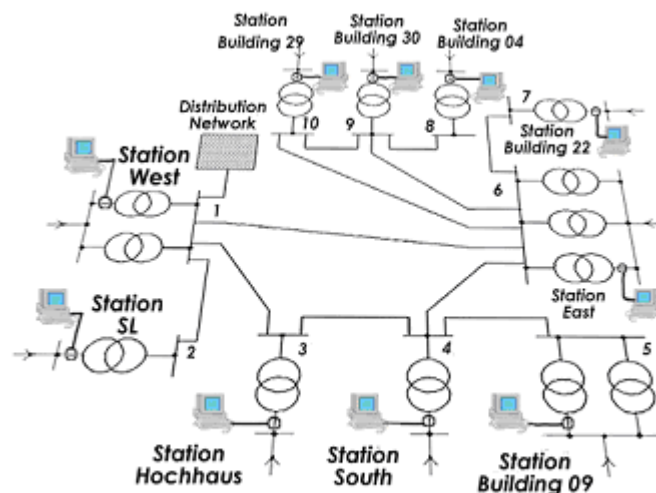


Bild 21: Schema des Verteilungsnetzes der Otto-von-Guericke-Universität

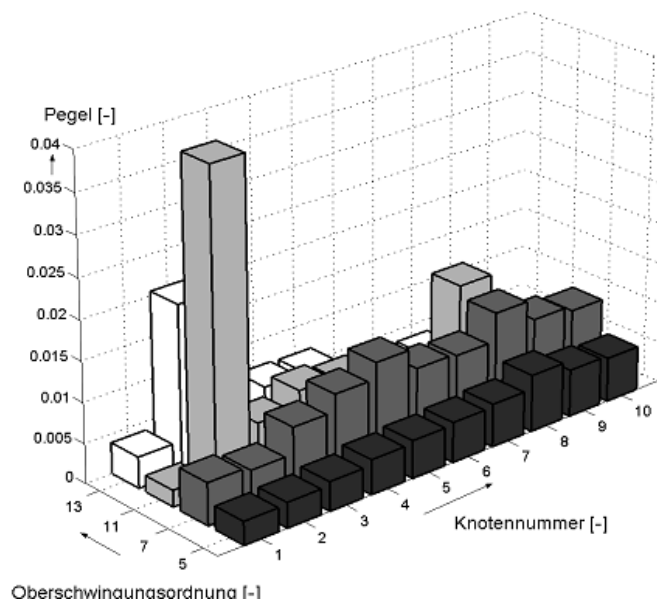


Bild 22: Signifikante Störquellen

In Bild 22 sind beispielsweise Ergebnisse der SVD – Faktorisierung dargestellt. Diesen Analysen ist es zu entnehmen, dass sich die größten Störquellen für die 11. und 13. Harmonische im Knoten 2 befindet. Außerdem ist der Knoten 8 für Störungen mit der 5. und 7. Oberschwingung verantwortlich. Aufgrund der spektralen Analyse kann man noch vielmehr Informationen gewinnen, die dann zur Optimierung von Netzen im Hinblick auf Oberschwingungen angewendet werden können.

## Voltage dips analysis by space vector methodology

Bericht: Dipl.-Ing. V. Ignatova

Voltage dips represent a decrease in the voltage magnitude from 0,1pu to 0,9pu. In function of the fault and measurement location, network and transformers grounding and type of measurements, different types of voltage dips can be distinguished. Voltage dips are one of the most serious power quality problems and represent a major concern for the industry. Their automatic classification and analysis have become an essential requirement for the power quality monitoring.

Traditionally, voltage dips have been analysed using symmetrical components. We have developed a new method for dips classification and characterization based on the space vector transformation. The main advantage of the method is the use only of the space vector and the zero sequence voltage for voltage dips analysis.

The space vector transformation is defined here below. The coefficient  $\frac{2}{3}$  is used to conserve magnitudes between the coordinate systems.

$$\vec{x} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & e^{j\frac{2\pi}{3}} & e^{j\frac{4\pi}{3}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a(t) \\ v_b(t) \\ v_c(t) \end{bmatrix}$$

System voltages before, during and after the fault are sinusoidal quantities. Using Euler's formula, they can be represented in terms of first harmonic as the sum of two contra rotating vectors with angular speed  $\omega$ . For example:

$$v_a(t) = V \cos(\omega t + \varphi) = \frac{V}{2} \left( e^{j(\omega t + \varphi)} + e^{-j(\omega t + \varphi)} \right)$$

The corresponding space vector is derived from the three system voltages and consequently can be also described as the sum of positive and negative frequency phasors:

$$\vec{x} = x_p e^{j\omega t} + x_n e^{-j\omega t}$$

where  $x_p$  and  $x_n$  are complex numbers:  $x_p = |x_p| e^{j\varphi_p}$  and  $x_n = |x_n| e^{j\varphi_n}$

Represented in the complex plane, the space vector takes the shape of an ellipse centred at the origin when magnitudes and initial phases of positive and negative frequency phasors are different, Fig. 23. The major axis  $r_{maj}$ , the minor axis  $r_{min}$  and the inclination angle of the ellipse  $\varphi_{inc}$  depend on phasors magnitudes and phases:

$$r_{maj} = |x_p| + |x_n| \qquad r_{min} = \left| |x_p| - |x_n| \right| \qquad \varphi_{inc} = \frac{1}{2} (\varphi_p + \varphi_n)$$

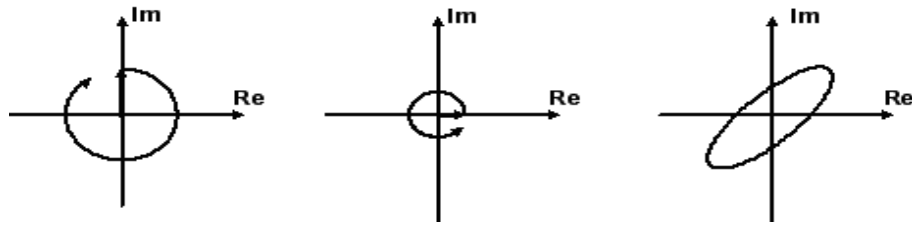


Fig. 23: Space vector as the sum of two contra rotating vectors at the same speed with different magnitudes and initial phases

Note that if positive and negative rotating phasors have the same magnitudes, the space vector projection in the complex plane is a straight line. If the magnitude of one of these phasors is zero, the space vector is represented by a circle.

In order to quantify the shape of the space vector in the complex plane a shape index is introduced, defined as:

$$SI = \frac{r_{\min}}{r_{\max}} = \frac{\left| |x_p| - |x_n| \right|}{\left| |x_p| + |x_n| \right|}$$

Its value indicates the correlation coefficient to a circle:

- $SI = 1$  : circle
- $0 < SI < 1$  : ellipse
- $SI = 0$  : straight line

In a balanced sinusoidal three phase system the three voltages have the same magnitudes and the phase angle shift between them is  $2\pi/3$ . As a result, the space vector is composed only by the positive frequency rotating phasor and represents in the complex plane a circle with radius equal to the nominal voltage. Voltage dips lead to changes in the space vector form. It was demonstrated that the space vector for a balanced dip has a circle shape, but with a radius smaller than the nominal voltage. The space vector for an unbalanced dip is composed of positive and negative frequency phasors and is represented by an ellipse in the complex plane.

Space vector characteristics together with the zero sequence voltage can be used to determine exactly the voltage dip type. For balanced voltage dips, the space vector projection in the complex plane is a circle, with radius depending directly on the dip depth. For unbalanced dips, the space vector represents an ellipse in the complex plane with parameters depending on the dip signature. Balanced dips can be differentiated from unbalanced dips by using the shape index. The angle made by the major axis of the ellipse with respect to the real axis indicates the phase(s) with major drop as shown in Fig. 24. Single phase dips are denoted with S, double phase dips with D, and phase(s) in drop are in lower case letters. The zero sequence voltage and the ellipse major axis contribute to the dip classification, differentiating dip types with same ellipse inclination. The ellipse minor axis depends directly on the dip depth and can be used for dip detection and characterization of the dip severity.



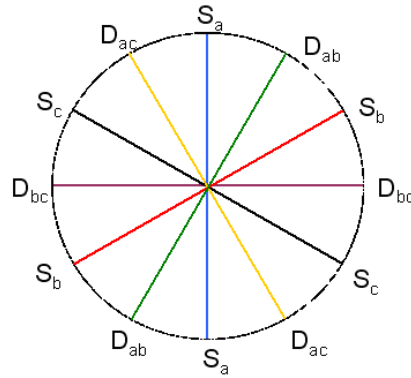


Fig. 24: Space vector diagram for unbalanced dip

The algorithm for voltage dip classification is presented in Fig. 25. It starts with the space vector estimation from the real data. Then positive and the negative frequency phasors for the first harmonic are determined by complex-input discrete Fourier transform (DFT) and the shape index is calculated. For a shape index superior to 0,93 the dip is considered as three phase balanced dip. Shape index inferior to 0,93 classifies the dip as unbalanced. The ellipse inclination, the ellipse major axis and the zero sequence voltage are then calculated in order to determine the dip type.

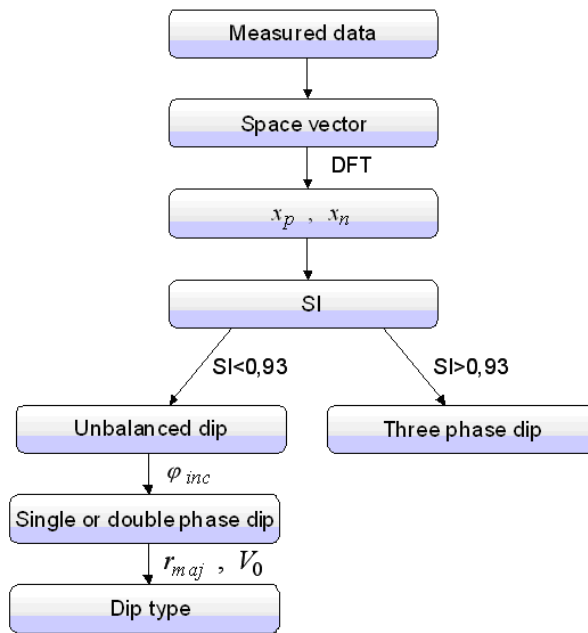


Fig. 25: Space vector method for voltage dips classification

The method present the advantages to use only the space vector characteristics and the zero sequence voltage in the different stages of voltage dips analysis and to be specially appropriate for an automatic application.

Finally, it can be noted that the use of space vector for volt-age dip analysis does not lead to a loss of information. Indeed, the voltage dip waveforms can be completely reproduced from the space vector and the zero sequence voltage.

## Multikriterielle optimale Planung von Verteilungsnetzen

Bericht: M. Sc. T. Smieja

Im liberalisierten Energiemarkt muss sich die Netzplanung veränderten Bedingungen und Inhalten stellen. Wachsender Kostendruck, Umstrukturierung der Energieversorgungsunternehmen wie auch Prioritätsverschiebungen bei der Energieerzeugung führen zur Notwendigkeit, auch Netzplanungsverfahren zu optimieren, da die Planungsaufgabe mit konventionellen Methoden nicht lösbar ist.

Die neu entwickelten Methoden zur effektiven und optimierten Netzplanung würden, im Rahmen dieser Forschung, in eine Software implementiert werden. Der neue Blickwinkel, bezogen auf Kundenwünsche, sowie gleichzeitig das Erfordernis hoher Effektivität sowohl des Netzbetriebs als auch der Kosten führt zu einer Verschiebung der Prioritäten während des Netzplanungsprozesses. Die Netzbetreiber sind gezwungen, den optimalen Kompromiss zwischen den verschiedenen Erfordernissen zu finden. Dazu gehört es, ein Gleichgewicht zwischen finanziellen, technischen und umweltgerechten Optima herzustellen.

Bei der Planung von Energieversorgungsnetzen geht es darum, diejenigen Netzstrukturen zu finden, die eine technikgerechte, zuverlässige und wirtschaftliche Versorgung der Kunden mit Elektroenergie gewährleisten. Die Planung kann als Optimierungsaufgabe definiert werden und wurde bisher durch den Einsatz verschiedenster Methoden, wie linearer Programmierung, dynamischer Programmierung, heuristischer Methoden, und auch durch Expertensysteme unterstützt. In dieser Forschung wird die Spieltheorie als junge Wissenschaft in der Netzplanung angewendet.

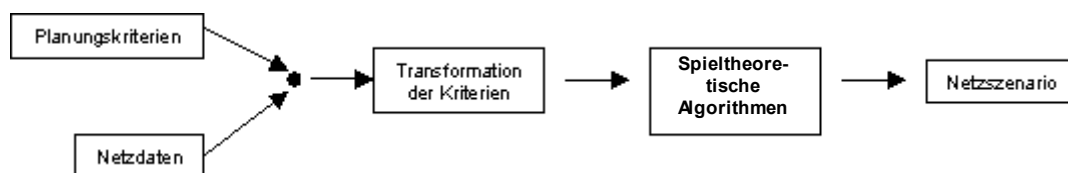


Bild 26: Modell des Planungsprozesses

Die Ausbauplanung geht immer von einer Netzstruktur aus, bei der ein vorhandenes Netz verbessert werden soll. Dazu stellen die einzelnen Bereiche des Unternehmens Anforderungen und unterbreiten Vorschläge. Die Qualität der Vorschläge wird von den Planungskriterien Zuverlässigkeit, Wirtschaftlichkeit und Betriebsqualität modelliert und bewertet. Mit Hilfe der Spieltheorie wird eine Kombination der Vorschläge ausgewählt, die einen optimalen Kompromiss zwischen den Planungskriterien darstellt. Dieser Kompromiss stellt eine Lösung dar, deren Realisierung dann zu dem neuen Netzwerkszenario führt.

Die neuen Methoden der Netzplanung wurden durch den Lehrstuhl Elektrische Netze und Alternative Elektroenergiequellen initiiert. In der Zukunft wird die multikriterielle Planung, die sich der Spieltheorie bedient, in die Praxis umgesetzt.

## Optimierung des Einsatzes dezentraler Energieversorgungssysteme durch Einbindung moderner Kommunikationstechniken - Thematisches Netzwerk „Energie und Kommunikation“

Bericht: Dipl.-Ing. K. Rudion, Dr.-Ing. B. Hadzi-Kostova

In der zweiten Phase des Projektes wurden die Szenarien zukünftiger Energieversorgungssysteme mit dezentralen Energieerzeugungsanlagen (DEA) und hohem Anteil an erneuerbaren Energien (EE) entwickelt. Das für die Untersuchungen ausgewählte Netz ist im Bild 27 dargestellt. Das Beispielnetz repräsentiert einen Strang von einem 10 kV-Mittelspannungsnetz und enthält Verbrauchergruppen verschiedenen Typs wie Industrie, Gewerbe, Haushalt und Landwirtschaft. Für die Projektziele wurden zusätzliche dezentrale Erzeuger und Speicher in den Niederspannungsnetzen integriert.

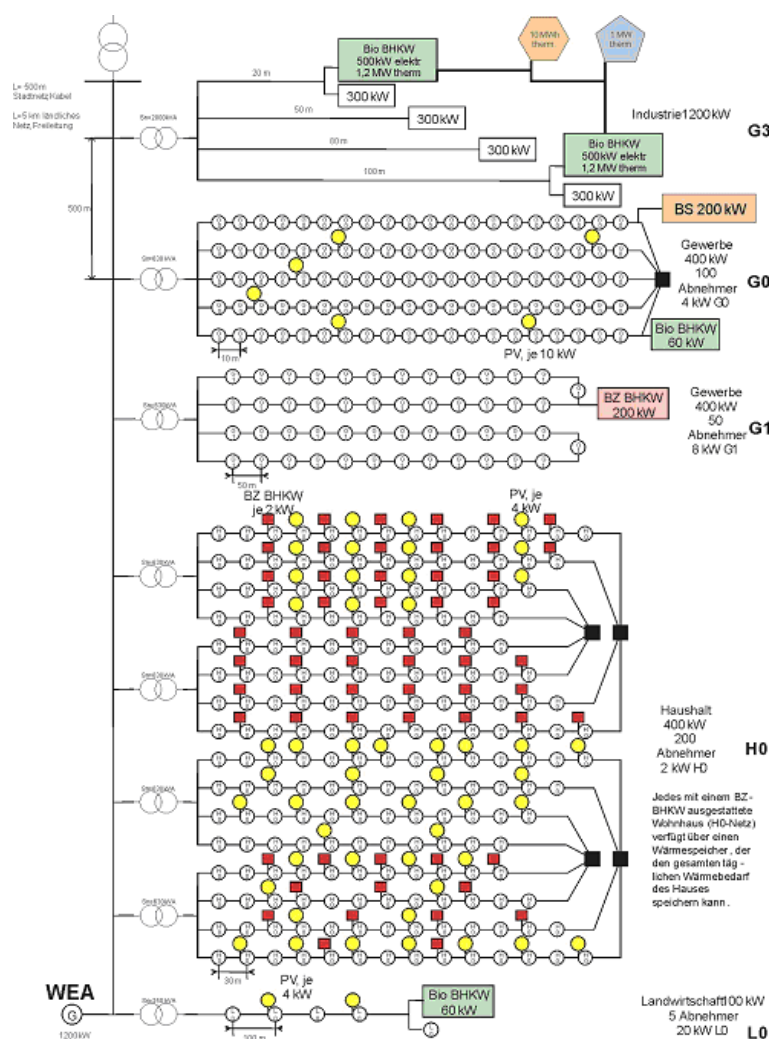


Bild 27: Beispielnetz mit verschiedenen Verbrauchertypen und dezentralen Erzeugern

Um die Bilanz zwischen Erzeugung und Verbrauch im Netz herzustellen und die prognostizierten Fahrpläne für den Leistungsaustausch mit dem übergeordneten Mittelspannungsnetz einhalten zu können, werden die Energiemanagementsysteme im Beispielnetz angewandt. Die dezentralen Erzeuger sollen in der Zukunft, wenn ihr Anteil in der produzierten Leistung sehr hoch wird, den Betrieb des Netzes unterstützen. Deswegen müssen die Netzdienstleistungen, wie z. B. Spannungsregelung, Frequenzregelung, Bereitstellung der Reserveleistung, von dieser Erzeugergruppe auch zur Verfügung gestellt werden. Erzeugergruppen, die unter einem

gemeinsamen Führungs- und Managementsystem zusammengefasst sind und das Verhalten konventioneller Kraftwerke abbilden, werden als „virtuelle Kraftwerke“ bezeichnet.

Im Konzept der „virtuellen Kraftwerke“ spielt die Kommunikation eine der wichtigsten Rollen. Zur Zeit gibt es eine große Vielfalt an Kommunikationsstandards und Datenformaten die zur Übertragung von Messdaten, Steuersignalen und Netzzustandsinformationen verwendet werden. Als großes Ziel für die Zukunft gilt die Idee, einen einzigen Kommunikationsstandard für verschiedene Systembereiche zu erarbeiten und zu etablieren und damit die Kompatibilität der unterschiedlichen Netzebenen und Netzgeräte zu verbessern.

Um die bessere Übersicht in vorhandenen Netzstrukturen in Deutschland zu haben, wurde in Rahmen des Projektes von der Universität Magdeburg ein Fragebogen für die Stadtwerke und Energieversorgungsunternehmen vorbereitet. Der Fragebogen sollte die grundsätzlichen Informationen über den aktuellen Stand der Technik in verschiedenen Netzbereichen in Deutschland und die aktuellen Erfahrungen mit der dezentralen Erzeugung liefern. Als Empfehlung wird von den Projektpartnern die Anwendung des neuen Kommunikationsstandards IEC 61850 und seiner noch in Arbeit befindlichen Ergänzungen IEC 61400-25 für Windkraftanlagen und IEC 62350 für verteilte Erzeugung vorgeschlagen. Die Datenformate von den zu übertragenden Informationsmengen, die beim Aufbau von dezentralen Erzeugungsstrukturen verwendet werden können, wie z. B. Messwerte, Sollwerte (Fahrpläne) oder Wetterdaten, wurden untersucht.

Oft verwendet sind die Formate:

- KISS (Keep it Small and Simple),
- EDIFACT (Electronic Data Interchange For Administration Commerce and Transport),
- MSCONS (Metered Services Consumption Report),
- CSV (Comma – oder Character – Separated Values),
- XML (Extensible Markup Language),
- EDIFACT DELFOR (Delivery Schedule Message).

Die genannten Formate werden je nach Region und Netzbetreiber für den Informationsaustausch angewandt. Diese Vielfalt von Formaten verkompliziert wesentlich den ganzen Kommunikationsprozess. Deswegen ist die Vereinheitlichung der Datenformate in der Zukunft von sehr großer Bedeutung.

## **Design of Benchmark of Medium Voltage Distribution Network for Investigation of DG Integration**

Bericht: Dipl.-Ing. K. Rudion

In today's power systems, electrical power is mostly generated in large power plants that are commonly located where sources of fuel are well accessible. The generated power must often be transmitted over long distances before reaching the consumer. The shortage and rising prices of fossil fuel as well as the public resentment towards nuclear power and construction of transmission lines all stimulate interest in novel and alternative solutions of electric power generation. A possible solution involves the widespread commissioning of distributed generation (DG) units that utilize renewable energy sources or deliver heat and power simultaneously. DG units are usually connected to the local low voltage and medium voltage distribution networks. Only large wind farms with high power ratings are connected to the high or even very high voltage networks. The development of DG in low and medium voltage networks causes a structural change in the traditional centralized power system. In the past, the impact of DG on the power system was not significant because of its low overall share. But today the number of DG units increases rapidly. Therefore, power systems with a high penetration level of DG have to be modeled and simulated in order to investigate new methods of operation and energy management.

In this project the medium voltage distribution network benchmark was developed in cooperation with the CIGRE Task Force C6.04.02. This benchmark network was derived from a German MV distribution network. It has rural character and supplies a small town and the surrounding rural area. The rated voltage level of the network is 20 kV. It is supplied from a 110 kV transformer station. Most connections are made with cables, but there are also sections of overhead lines. To reduce the size to a level that is required for DG integration studies while maintaining the realistic character, the number of nodes in the network was reduced. The resulting network proposed as a benchmark is shown in the figure bellow. The benchmark network is decomposed into two separate subnetworks 1 and 2. The subnetworks are supplied by 110/20 kV transformers, which are referred to as TR1 and TR2, respectively. The medium-voltage DC coupler (MVDC) is optional and the purpose of subnetwork 2 is to study such coupling. For many types of case studies, it is sufficient to consider subnetwork 1 only. If its coupling switches, indicated with T in the figure, are opened, the network has a radial structure. But depending on the interests of the user, it can be simulated as a closed ring network, too. The total length of the lines in the subnetwork 1 is equal to about 15 km. Due to the fact that different countries have varying distribution network parameters, the original values given for the German network were transferred into the per unit system. This facilitates the adaptation of the benchmark to regionally varying parameters.

The benchmark network is designed for studying the impact of diverse DG at the medium-voltage level. The list of studies that can be carried out with this benchmark includes the following:

- study of the impact of DG units on the power flow of MV distribution lines;
- study of the impact of DG units on the voltage profile in the MV distribution network;
- study of energy management systems (DEMS) for DG in the MV distribution network;
- study of power quality issues such as harmonics, flicker, frequency variations, and voltage variations;
- study of small signal stability;

- study of voltage stability;
- study of the impact of MVDC coupling on the power flow of MV distribution lines;
- study of the impact of MVDC coupling on the voltage profile in the MV distribution network;
- study of the impact of DG units on transmission capability of the subnetwork 1 feeder;
- study of the protection of the MV distribution network.

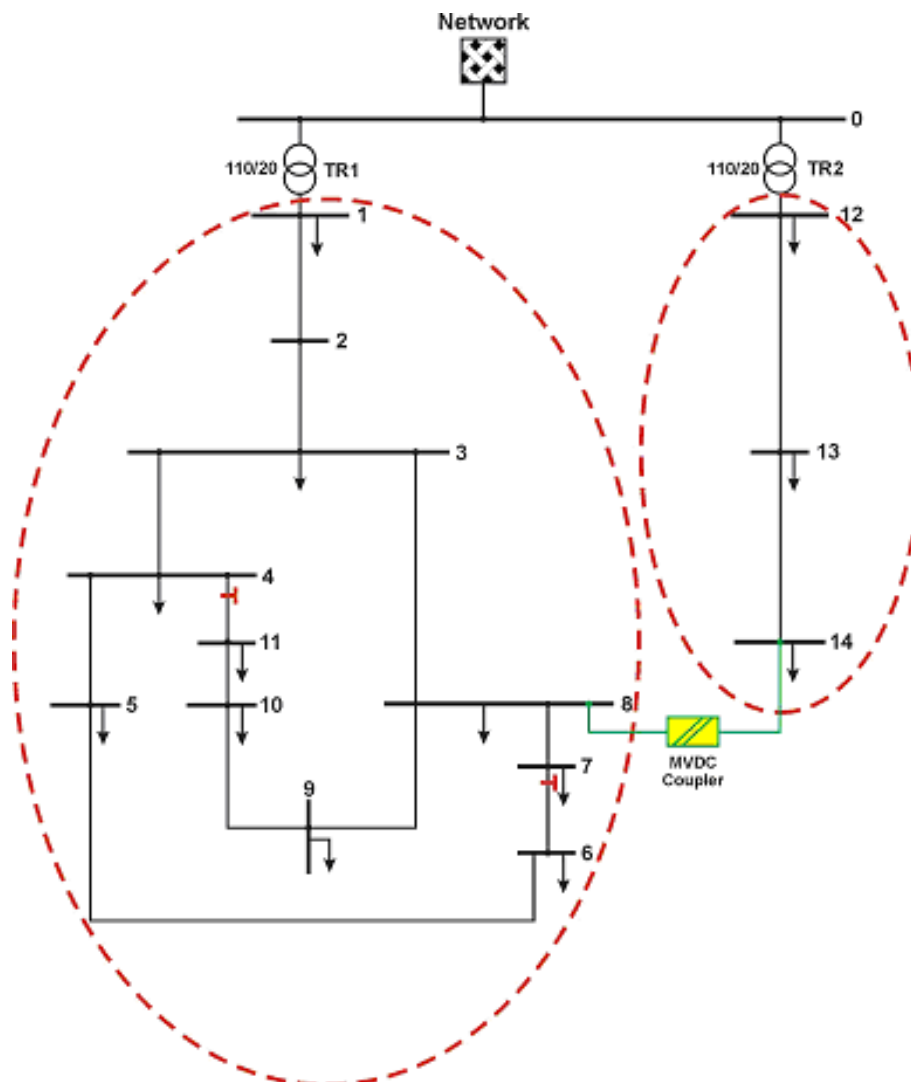


Fig. 28: Medium-Voltage Rural Distribution Benchmark Network

## Wind Farms as Virtual Power Plants

Bericht: Dipl.-Ing. K. Rudion

The current power system is the result of a development which started about 120 years ago. During the last few decades the process of technological and institutional changes has accelerated and, due to the liberalization of the energy market as well as the shortage of traditional primary energy resources, the system is undergoing fundamental changes. The traditional power system with - referring to the load flow - its top-down structure has to be adapted to a new philosophy with many dispersed generation (DG) units which feed produced electric energy into the low voltage network or distribution network and thereby change the load flow direction, to which the system had been originally dimensioned. There are two main reasons for this change of philosophy. First, considering the use of primary energy sometimes it is profitable to convert energy closer to the consumption centres instead of transferring it over long distances. Secondly, renewable energy sources also have to play a bigger role now than in former times. At present one of the most important and cost-effective sources of DG is wind energy, with an ever growing number of installed wind turbines. In some European countries the share of energy produced by wind power plants (WPP) is considerable, so that these plants should also provide all the services requested from traditional power plants.

The delivery of auxiliary services by wind farm depends on the type of used generators and their operation mode. In the figure below the comparison between conventional power plants and wind farms considering their ability to deliver auxiliary services is presented. The conclusion is, that the variable speed wind turbines with doubly fed induction generator and converter driven synchronous generator are able to support the operation of the electrical system after some additional technical extensions. Wind farms that are able to take part in system control are called “Virtual Power Plants”. In this concept the communication between system operator and wind turbines is focused. Such signals like measurements, state informations or set values for control parameters have to be transferred in bidirectional way.

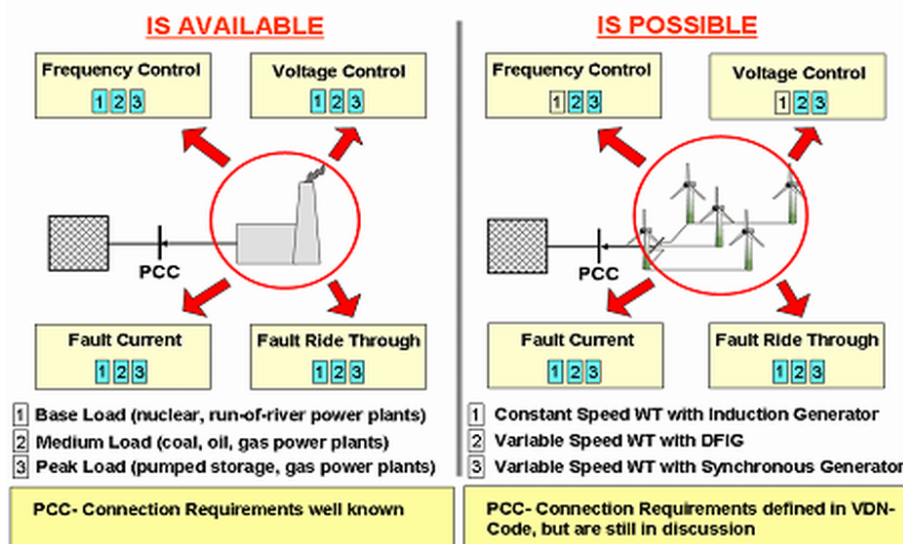


Fig. 29: Comparison of Conventional Power Plants with Wind Farms

One of the ancillary services is the frequency control of the power system. For this kind of control the reserve active power must be available. The reserve power in wind turbines can only be obtained by wind turbines with pitch control. Through the increase of the pitch angle the output power of the wind turbine can be reduced and appropriate reserve band obtained. In the figure below an example of pitch controller with extension for frequency control is presented. This concept is strongly connected with the wind forecast accuracy.

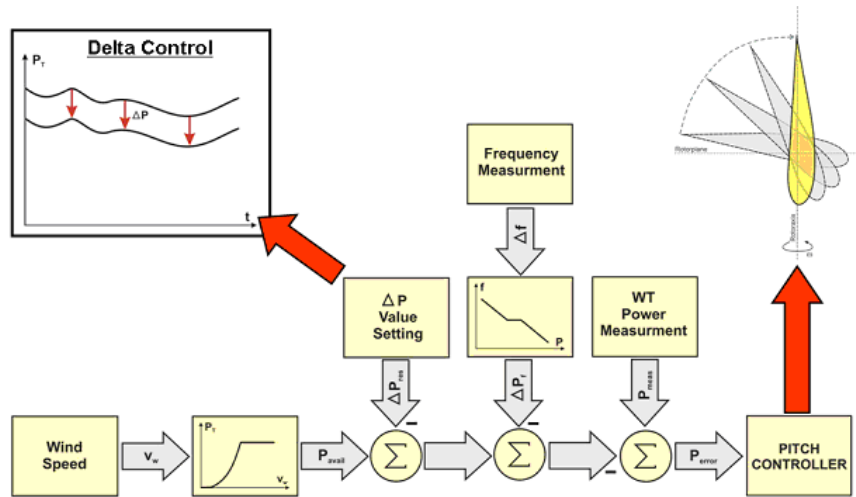


Fig. 30: Pitch Controller with Extension for Frequency Control



## NetMod: Reduzierte Modelle komplexer elektrischer Netze mit verteilten Energieerzeugungssystemen

Bericht: Dipl.-Ing. K. Rudion, Dipl.-Ing. C. O. Heyde

Die Anzahl der im elektrischen Netz installierten dezentralen Energieerzeugungsanlagen steigt kontinuierlich an. Dies verursacht, dass die herkömmlichen Netzplanungs- und Netzführungsmethoden nicht mehr gültig sind. Deswegen müssen neue Methoden entwickelt werden, damit die räumliche Verteilung dezentraler Erzeugungsanlagen und der stochastische Charakter der Einheiten, die auf erneuerbaren Energien basieren, in der Netzführung berücksichtigt werden können.

Der hohe Anteil an dezentralen Erzeugern im Netz führt zu einem zu steigenden Kommunikationsproblemen, und zum anderen zu einem stark fluktuierenden Leistungsangebot im Netz. Die Auslegung und Betriebsführung von Netzen basiert in der Regel auf mathematischen Modellen und Simulationen. Die durch dezentrale Erzeuger veränderten Randbedingungen müssen nun in diese Modelle und Simulationen eingearbeitet werden. Im Mittelpunkt dieses Forschungsprojektes steht die Reduktion der angepassten Modelle. Ziel der Reduktion ist, dass die jeweiligen Optimierungsprobleme zwar effizient, aber trotzdem noch hinreichend genau gelöst werden können.

Das Projekt NetMod läuft seit August 2005 und wird von fünf Partnern bearbeitet:

- Fraunhofer FIRST,
- Fraunhofer ISE,
- Fraunhofer ITWM,
- IER (Uni Stuttgart),
- LENA (Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg).

Die Ziele des LENA - Teilprojektes sind unter anderem die Entwicklung von Modellen dezentraler Energieerzeuger, die Durchführung der Netzanalyse mit hohem Anteil an dezentraler Erzeugung und die Verfügbarkeitsanalyse des Netzes. In der ersten Projektphase wurde das 20 kV – CIGRE – Benchmarknetz für weitere Untersuchungen ausgewählt. Die Struktur des LENA – Teilprojektes ist in Bild 31 dargestellt.

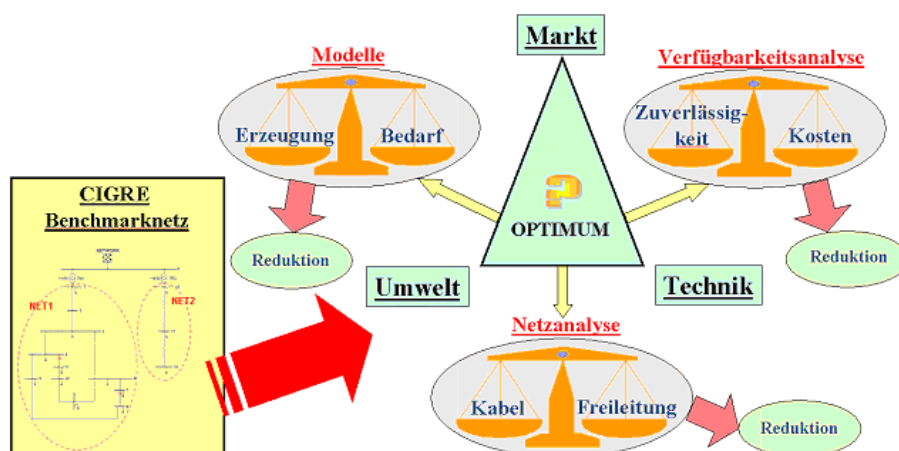


Bild 31: LENA – Kompetenzen für NetMod

## **Errichtung der Wetterstation an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg**

Bericht: Dipl.-Ing. K. Rudion

Am 14.07.2005 wurde von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Lehrstuhl Elektrische Netze und Alternative Elektroenergiequellen, die neue Wetterstation auf dem Dach von Gebäude 10 der Otto-von-Guericke-Universität in Magdeburg errichtet. Die Wetterstation der Firma Theodor Friedrichs & Co. ist ca. 10 m hoch und erlaubt die Messung folgender Parameter:

- Windgeschwindigkeit,
- Windrichtung,
- Temperatur,
- Luftfeuchtigkeit,
- Luftdruck,
- Globale Strahlung,
- Niederschlag.

Die Messdaten werden im internen Speicher des Datenloggers gespeichert. Die Speicherkapazität kann durch eine externe Speicherkarte erweitert werden. Die Übertragung der Daten kann auf zwei Weisen erfolgen, entweder durch die Anbindung eines Laptops an die RS232-Schnittstelle des Datenloggers oder durch ein GSM-Modem, das in den Datenlogger integriert ist. Der Datenlogger wird von einer Batterie, die durch eine PV-Anlage geladen wird, versorgt. Die Messungen werden für Forschungsaufgaben auf den Gebieten Windenergie und PV-Systeme angewandt.



*Bild 32: LENA - Wetterstation*

## **Teaching Electrical Engineering using E-Learning Methods at the Otto-von-Guericke-University Magdeburg**

Bericht: M. Sc. A. N. Angelov

At the Chair of Electric Power Networks and Renewable Energy Sources (LENA) at the Otto-von-Guericke-University Magdeburg, the project RegEn - M (Renewable Energy - Multimedia) has been successfully realized and integrated into the program of studies. This is an E-learning system based on the Hyperwave platform for education. The project RegEn - M is grouped into five teaching modules:

- Module 1: Basic principles of energy production,
- Module 2: Photovoltaic energy production,
- Module 3: Wind as an energy source,
- Module 4: Fuel cell systems,
- Module 5: Small water power plants.

In the second part of this project we decided to make a RegEn - VL (Renewable Energy - Virtual Laboratory). The idea behind this project was to create a VRML (Virtual Reality Modeling Language) representation of a fuel cell, which could show the functions and the problems of fuel cell operation. We believe that resources like these have a significant educational value. In our case, using the virtual fuel cell allows teachers and students to observe it from many different 3D viewpoints, and to accomplish different experiments without causing any damage to a real fuel cell.

RegEn is an online web application that integrates desktop virtual reality technology with hypermedia to facilitate the learning of 3D geometry concepts and processes.

The design and development concept follows two strategies:

- Teaching Scenarios – educational tools through examples of teaching situations at higher-education institutions (e.g. seminars, lectures, tutorials). This section presents the wide range of multimedia tools which are used to support student learning.
- Didactic Design – covers the development of learning environments from conception to evaluation. Media designed for educational purposes should be characterized by functionality, simplicity and consistency. These principles are applied to developing and implementing steps of pedagogical concepts.

In order to promote these skills, the E-Learning system RegEn is sub-divided into three areas:

- Learning level – lectures to explain theoretical correlations,
- Practical level – 3D virtual trainings to gain practical skills working on electrical problems,
- Test level – testing the acquired knowledge.

In the project we used a combination of different software to create user-friendly learning environments. The visualization of all of the elements requires a browser (Internet Explorer, Netscape or Mozilla), which is normally available in every computer. The control of the system is very simple and intuitive and guarantees a very fast and effective learning process.

Learning Scenarios

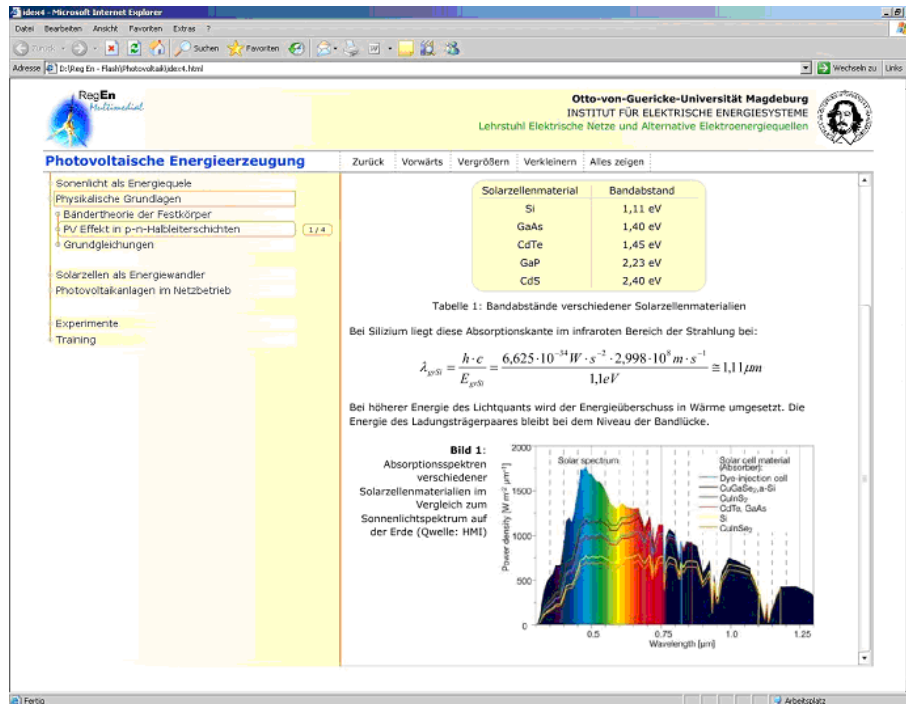


Fig. 33: Example from “RegEn - M” E-Learning Module: Photovoltaic energy production

The main information carrier in the learning scenarios is the text. All other information carriers (Medias) have the special function to support the text and to increase the desire to learn and academic success. Fig. 33 shows a screenshot from the teaching module “Photovoltaic energy production”, where the module structure together with the navigation bar is shown. Right from the beginning of the design phase we decided to split the module into two areas and in this way to produce one static surface area where all the chapters and navigations buttons are placed. The control of the system and the information overflow is very simple and intuitive and guarantees a very fast and effective learning process. The remaining area we used to place the interactive objects and to load there the different learning pages, which are to be work on by the students.

The aim of this learning module is that the students should receive basic knowledge about the concept of the global energy supply and the possibility of using the Dispersed Energy Resources.

Our ambition in this part of the learning module was to construct a learning system which could be used accurately at the beginning of student training in preparation of some experiment, for example, and also as a refresher course for advanced students.

In the second part of the project we created a VRML representation of a fuel cell, see Fig. 34 Since VRML allows one to publish the learning drafts on the World-Wide-Web it is a very interesting option for this type of project, making it available to anyone without the need of any special hardware or software. The blending of three dimensional and two dimensional data content influences only the dimensional models which are different for users with high and low visual spatial ability. That is why, depending on the navigation or the subject choice a new virtual object can be down loaded or some part of the system can be made transparent. Therefore, it is possible to observe many system apparatus which normally (in a real system) can not be seen or would take too much time and equipment.

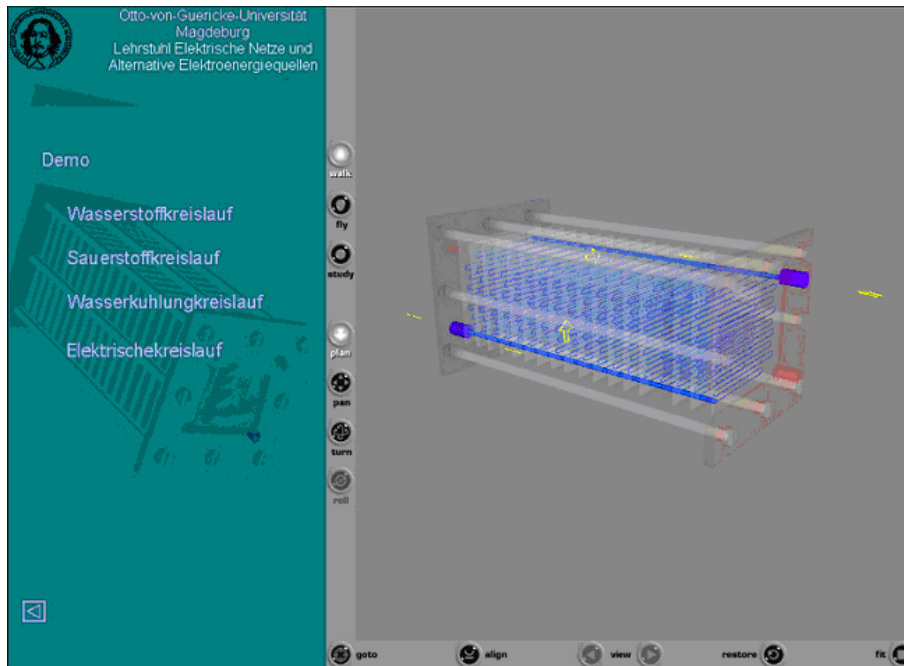


Fig. 34: Example form E-Learning Module “Reg-En – VL”: Fuel Cell

Due to virtual learning programs, it is possible for the student’s attention to be focused on some particular important information or objects, and in this way the learning success is greatly increased.

The system elements can be observed from different visual points which are one of the best possibilities to become familiar with the system assembly. This was also one of our main project goals. The students have also the opportunity to dismantle the entire system or, for example, the fuel cell stack and in this way to learn the basic functions of each part without the need to have a real fuel cell stack.

Another important safety feature of our virtual fuel cell is that even if the students do not follow the safety instructions during the experiments, they cannot put themselves or the system into any danger. This can be attained only in the virtual environment of the fuel cell. For example, increasing the current voltage leads to an increase of hydrogen usage. This is why the hydrogen flow must be instantly adjusted if the current in the fuel cell is changed. If the student does not immediately adjust the hydrogen in the virtual lab, however, no real damage is done, while in a real fuel cell this would lead to system damage.

Furthermore, demonstrations are integrated into each chapter which can be called-up and played. They provide additional visual information about the chapter content. Additional written information provides tips and instruction about the system operation and control.



## Untersuchung an Hochtemperaturbrennstoffzellen

Bericht: M. Sc. J. Haubrock, Dipl.-Ing. G. Heideck

Im Vergleich zu Niedertemperaturbrennstoffzellen haben Hochtemperaturbrennstoffzellen (SOFC) aufgrund ihrer hohen Betriebstemperatur Vorteile. Die hohen Betriebstemperaturen ermöglichen die interne Reformierung geeigneter Brennstoffe direkt in der Zelle, zudem befindet sich die Wärme auf einem sehr hohen Temperaturniveau, so dass eine Ankopplung z. B. eines Dampfkreisprozesses die Erzeugung zusätzlicher elektrischer Energie ermöglicht. Das Interesse an der Nutzung von Blockheizkraftwerken für die dezentrale Energieversorgung wächst aufgrund steigender Energiepreise beständig. Neben konventionellen, durch Gasturbinen und Gasmotoren angetriebenen Kraftwerken bieten insbesondere Brennstoffzellenkraftwerke mit SOFC-Technologie vielseitige Möglichkeiten bei der Nutzung in Verbindung mit dem elektrischen Netz. Die Planung von Brennstoffzellenkraftwerken ist sowohl von dem dynamischen und statischen Verhalten der Brennstoffzelle, als auch von der Charakteristik des Netzes mit seinen Verbrauchern abhängig. Die Kennlinie und das Ersatzschaltbild einer Brennstoffzelle werden insbesondere durch die Parameter der Gase Wasserstoff und Sauerstoff oder Luft wie Druck und Feuchtigkeit sowie von den Arbeitstemperaturen des Zellstacks beeinflusst.

Zur Untersuchung von Hochtemperatur-SOFC-Brennstoffzellen ist am Lehrstuhl für Elektrischen Netze und Alternative Elektroenergiequellen ein Teststand entwickelt und aufgebaut worden, Bild 35. In dem Teststand können tubulare Einzelzellen untersucht werden. In Kooperation mit dem Institut Energietechnik, Abteilung Werkstoffe in Woclaw, sind entsprechende Röhrenbrennstoffzellen entwickelt und in Magdeburg untersucht worden.



Bild 35: SOFC Teststand

Das Verhalten einer SOFC-Brennstoffzelle hängt von den technischen Betriebsparametern der Reaktanden ab. Die räumliche Verteilung der resultierenden Spannung bzw. der Stromdichte entlang einer SOFC-Röhre kann am besten mit Finite-Elemente-Modellen untersucht werden. Zur Simulation wird die FEM-Programmierungsumgebung CFD-ACE+ verwendet.

Um die Hochtemperaturbrennstoffe im Hinblick auf maximalen elektrischen Wirkungsgrad und Lebensdauer gezielt zu optimieren, müssen die Zusammenhänge zwischen dem elektrischen Verhalten der Zelle und den Betriebsparametern der Zelle möglichst exakt bekannt sein. Diese Modellierung gründet auf den in Messungen gewonnenen Daten. Ziel ist die Entwicklung eines Modells, das die Auswirkungen von Parameteränderungen auf das elektrische Verhalten der Brennstoffzelle simuliert.

## Dezentrales brennstoffzellenbasiertes Energieversorgungssystem

Bericht: M. Sc J. Haubrock, Dipl.-Ing. G. Heideck, Dr.-Ing. M. Purmann

Polymer-Membran-Brennstoffzellen (PEMBZ) können als dezentrale Energieerzeugungsanlage im stationären Betrieb eingesetzt werden. Aufgrund ihres hohen Teillastwirkungsgrades und der Möglichkeit eines dynamischen Betriebes bieten sie Vorteile gegenüber Hochtemperaturbrennstoffzellen. Das Verbundprojekt des Landes Sachsen-Anhalt erforscht Konzepte zur Realisierung von dezentralen Energieversorgungssystemen auf Basis der PEM-Brennstoffzellentechnologie. Hervorzuhebende Teilaspekte des Projektes bilden die Entwicklung und Realisierung geeigneter Mess- und Überwachungsbaugruppen, die Entwicklung eines Steuerungskonzeptes auf Basis einfach messbarer Betriebsparameter und der optimierten Auslegung und Dimensionierung der peripheren Komponenten unter Beachtung des Gesamtwirkungsgrades.

### Mess- und Überwachungsbaugruppe

Kenntnisse über die Systemführung einer Brennstoffzellenanlage sind für einen zuverlässigen Betrieb unabdingbar. Hierzu sind spezielle Monitoring- und Diagnosegeräte notwendig. Existierende Mess- und Überwachungsbaugruppen sind ausschließlich für den Laboreinsatz konzipiert. Die Entwicklung von praxistauglichen Überwachungsbaugruppen für Serienprodukte ist daher notwendig. Einen einfachen Ansatz eine Aussage zum Betriebszustand von PEM-Brennstoffzellen zu treffen, ist die Überwachung der Strom-Spannungskennlinie. Die Spannung einer Brennstoffzelle ergibt sich aus der Leerlaufspannung, reduziert um die Aktivierungsverluste (Aktivierungsüberspannung) bei kleinen Stromdichten, den ohmschen Spannungsabfall über den Zelleninnenwiderständen (MEA, GDL und Bipolarplatten) im Betriebsbereich und die Massentransportverluste bei großen Stromdichten.

$$E_{BZ} = E_0 - E_{akt} - E_i - E_m$$

Kommt es zur Austrocknung der Membran, erhöht sich deren Widerstand und die Zellspannung sinkt. Über eine Einzelzell-Spannungsüberwachung ist es möglich, eine qualitative Aussage zum Betriebszustand der Zelle zu treffen.



Bild 36: Einzelzellspannungsüberwachung „LENA Pro 1/64“

## Steuerverfahren

Während des Projektbearbeitungszeitraums ist ein Steuerungsverfahren entwickelt worden, das aus einfach zu ermittelnden Betriebsgrößen und realisierter Mikroprozessorsteuerung einen stabilen und zuverlässigen Betrieb der Brennstoffzellenanlage gewährleistet. Durch die konsequente Substitution aufwendiger und kostenintensiver Hardware (Sensorik) durch Algorithmen verringert sich der technische Aufwand enorm. Gleichzeitig wird eine erhebliche Kostenreduktion des Gesamtsystems erzielt.

Realisiert ist diese Betriebsführung durch eine einfache Spannungssteuerung des Zwischenkreises, Bild 38. Hierbei überwacht die überlagerte Steuerung die Spannung im Zwischenkreis. Vorzugsweise wird die Spannungshöhe durch den angeschlossenen Energiespeicher (Batteriespeicher) bestimmt. Wird die Batterie belastet, sinkt die Spannung im Zwischenkreis. Die Steuerung registriert dies als Leistungsanforderung und erhöht innerhalb vorgegebener Grenzen die Stromentnahme aus der Brennstoffzelle. Dies führt zu einer Anhebung der Zwischenkreisspannung und schließlich zu einem Ausgleich zwischen der erzeugten Leistung und der Lastanforderung durch den Verbraucher zuzüglich des Eigenverbrauchs. Die Steuerung ist außerdem in der Lage, über ein Energiemanagementsystem für eine Wiederaufladung der Batterie zu sorgen.

Damit bei einem Kaltstart der Brennstoffzelle und einer gleichzeitigen hohen Verbraucherlastanforderung die Brennstoffzelle aufgrund zu hoher Stromdichten nicht geschädigt wird, geschieht die Freigabe der Lastentnahme (Brennstoffzellenstrom) aus der Brennstoffzelle in Abhängigkeit von der Stacktemperatur. Diese Betriebsführung führt zu einem ausreichend stabilen Betrieb der Brennstoffzellenanlage. Bild 37 zeigt das Zusammenwirken der Zwischenkreisspannungsüberwachung und der Steuerung der Brennstoffzelle.

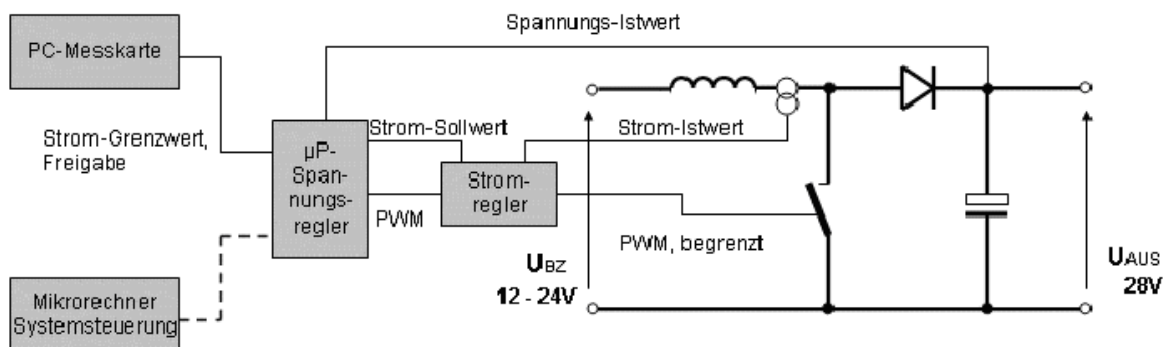
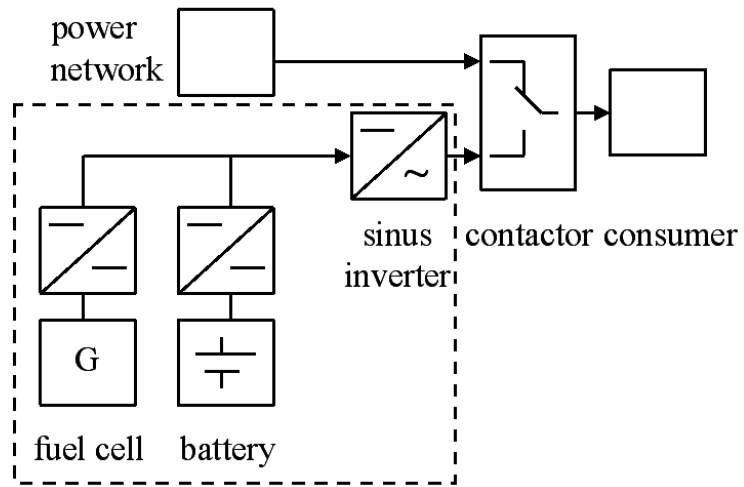


Bild 37: Brennstoffzellensteuerung und Leistungselektronik

## Optimierte Auslegung und Dimensionierung

Die Anforderungen bezüglich Netzparallel- und Inselbetriebsfähigkeit stellen vor allem Anforderungen an die Auswahl und Dimensionierung der zum Betrieb benötigten Komponenten eines PEM-Brennstoffzellensystems. Die Anforderungen nach einem schnellen Anfahrverhalten und dem Ausgleich von Lastschwankungen erfordern eine hohe Dynamik. Diese Parameter lassen sich durch das Systemdesign und den Einsatz zusätzlicher Kurzzeitenergiespeicher beeinflussen. Hierbei ist jedoch eine Minimierung zusätzlicher Speicher oder Aggregate aus Aufwandsgründen anzustreben. Untersuchungen haben die Luftversorgung des Stacks als größten Verursacher interner Verluste identifiziert. Geeignete Betriebsregime erlauben eine signifikante Optimierung des Eigenverbrauchs von PEM-Brennstoffzellenanlagen durch eine angepasste Betriebsweise des Luftkompressors.





*Bild 38: Topologie einer autonomen Brennstoffzellenanlage*

## PEMFC Modul für Insel- und Stand-By-Stromerzeugungssystem (SBS)

Bericht: M. Sc. J. Haubrock, Dipl.-Ing. G. Heideck

Ziel der Arbeiten ist der Aufbau einer PEM-Brennstoffzelle als autarke Stromversorgungseinheit für den transportablen Gebrauch als Netzersatzanlage. Die entnehmbare elektrische Leistung der autonomen Brennstoffzellenanlage soll ca. 300 W bei 230 V betragen. Die Anlage muss weitestgehend autonom arbeiten und lediglich eine Wasserstoffversorgung benötigen. Ein integrierter Batteriespeicher ermöglicht den Betrieb ohne Vorlaufzeit und puffert Lastschwankungen ab.

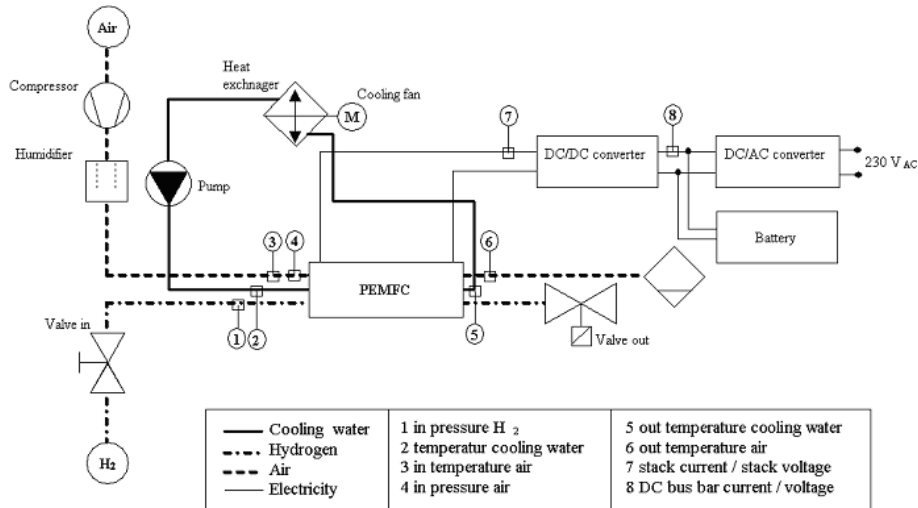


Bild 39: Fließschema

Das Konzept beruht dabei auf einer ganzheitlichen Betrachtung des Systems, Bild 39. Alle benötigten Komponenten wie Brennstoffzellenstack, Wechselrichter und periphere Komponenten, im Besonderen der Kompressor, sind im Sinne einer energieminimalen Betriebsweise optimiert worden. Hierbei sind die Komponenten, die einen entscheidenden Einfluss auf den elektrischen- und auf den Gesamtwirkungsgrad haben, als System betrachtet worden.

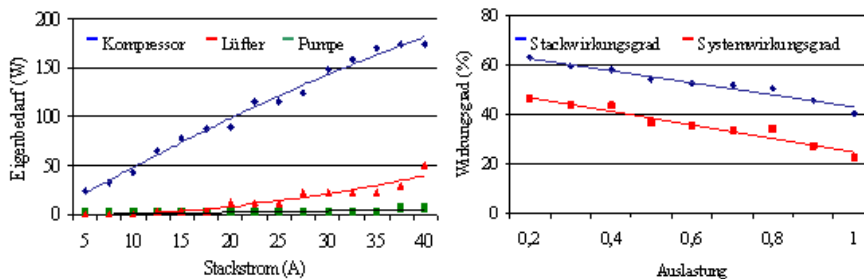


Bild 40: Eigenverbrauch der Peripheriekomponenten

Um bei praktischen Anwendungen in der Energieerzeugung den Brennstoffnutzungsgrad zu erhöhen ist es sinnvoll, den Eigenbedarf der Anlagen zu verringern. In dieser Arbeit haben wir den Eigenbedarf der Nebenaggregate identifiziert und deren Einfluss auf den Systemwirkungsgrad bzw. den Brennstoffnutzungsgrad untersucht. Der größte Anteil an Eigenbedarfsleistung wird dabei von dem Kompressor zur Luftversorgung des Stacks verursacht, Bild 40. In der Arbeit am Lehrstuhl sind Optimierungsstrategien zur Verringerung des Eigenbedarfs von Brennstoffzellen entwickelt worden. Die Ergebnisse sind an einer realen Brennstoffzelle umgesetzt worden.

## Leonardo Power Quality Initiative Vocational Education System - LPQIVES

Bericht: M. Sc. P. Komarnicki

Das Problem Power Quality ist relativ neu, bedingt durch den stetig steigende Einsatz regenerativer Energiequellen, die die Power Quality beeinflussen können. Letztlich hat sich dadurch der Bedarf zum Informations-, Erfahrungs- und Ergebnisaustausch zwischen Elektrotechnikern zu diesem Thema sehr intensiviert.

Die Leonardo Power Quality Initiative (LPQI) basiert auf dem European Union Training und dem Education Programm unter der Schirmherrschaft des Leonardo da Vinci European Union Programms, der Internationalen Copper Association und weit mehr als 80 zusammengeschlossenen akademischen und industriellen Partnern, die im Bereich der Elektrotechnik und hier insbesondere auf den Gebieten der Power Quality (PQ) und der Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) beschäftigt sind. Die LPQI ist zur Zeit in Belgien, Tschechien, Deutschland, Ungarn, Irland, Italien, Holland, Polen, Portugal, Rumänien, Spanien, Großbritannien und in der Türkei vertreten.

Im Januar 2005 startete in Wroclaw (Polen) LPQIVES (Leonardo Power Quality Vocational



Education System), die ein Teil der preisgekrönten LPQI ist, ein PQ- und EMV-Weiterbildungssystem, das als Zielstellung die Ausbildung von qualifizierten PQ-Experten hat. Zur Umsetzung des Projektes haben sich internationale PQ-Experten zusammengefunden, unter anderem die Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (Lehrstuhl Elektrische Netze und Alternative Elektroenergiequellen), das Fraunhofer IFF und der VDE-Bezirksverein Magdeburg. Die Verbreitung des Fachwissens und die Kenntniserwerb über Power Quality als zwei Hauptziele des LPQIVES, werden durch Schulungen auf dem Gebiet der Power Quality erlangt. Dabei sollen Experten im Bereich Power Quality ausgebildet werden. Die angebotenen Seminare richten sich an

Techniker, Elektromeister und Ingenieure, die sich in ihren Unternehmen mit Aufgaben der Power Quality und der Elektromagnetischen Verträglichkeit beschäftigen. Im Rahmen dieses Projektes werden drei unterschiedliche Weiterbildungsstufen angeboten, die zum Zertifikat „Power Quality Expert“ - Stufe 1, 2 und 3 führen können. Das gesamte, international identische Programm besteht in seiner ersten Stufe aus 10 Modulen, die auch in Polen, Italien, Ungarn, Tschechien und Rumänien unterrichtet werden. Hierbei werden neben theoretischen Grundlagen auch praktische Messmethoden und Lösungsmöglichkeiten bei auftretenden PQ-Problemen vermittelt. Zu den in der Stufe 1 angebotenen Modulen gehören:

1. Einführung in die Power Quality
2. Einfluss dezentraler Energieerzeuger auf die Power Quality
3. Spannungsschwankungen und Flicker
4. Spannungseinbrüche und Überspannungen
5. Harmonische und Zwischenharmonische
6. Einfluss von statischen Konvertern auf das elektrische Netz
7. Überspannungen und Transiente
8. Zuverlässigkeit der Versorgung
9. Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)
10. Blindleistungkompensation, Kondensatoren, Leistungsschwankungen



Bild 41: Zweite LPQIVES Seminar im Deutschland

Am 19. und 20. Mai 2005 wurden die europaweit ersten LPQIVES-Seminare in Magdeburg durchgeführt. Bis Ende 2005 haben sich durch die Teilnahme an den LPQIVES-Schulungen mehr als 400 Personen in ganz Europa weitergebildet. Nach Abschluss von mindestens 8 Modulen oder Ablegen einer Prüfung wird den Teilnehmern das international anerkannte Zertifikat „Expert in Power Quality, First Level“ ausgehändigt. Die erste Möglichkeit, die PQ Expert - Stufe 1 zu erreichen, bestand am 09. Dezember 2005 in Warschau (Polen). Dort fand die erste internationale Prüfung statt, die von der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, dem Fraunhofer IFF, dem VDE-Bezirksverein Magdeburg, der SEP (Vereinigung der polnischen Elektroingenieure), der AGH Universität Krakow und dem Polish Copper Promotion Centre zertifiziert wurde. Als letztes Seminar des Jahres 2005 in Deutschland wurde am 7. und 8. November das Modul „Einfluss dezentraler Energieerzeuger auf die PQ“ angeboten. Dieses Seminar griff Themen auf, die auch aus dem Blickwinkel der Region Sachsen-Anhalt von großem Interesse sind. Hier spielt zum Beispiel der geplante Ausbau der Windenergienutzung und ihr Einfluss auf die PQ eine Rolle.



Bild 42: LPQI Leitfaden

Im zukünftigen Verlauf des internationalen Weiterbildungsprojektes LPQIVES werden noch zwei weitere Stufen der Ausbildung erarbeitet und angeboten. Der Schwerpunkt der zweiten Stufe wird auf der praktischen Ausrichtung mit Laboruntersuchungen, Simulationen und Projektierungsaufgaben liegen. In der dritten Stufe soll eine Art Diplomarbeit erarbeitet werden. Dabei kann das Thema vom Kandidaten vorgeschlagen werden und sich aus seinem praktischen Arbeitsumfeld ergeben.

LPQIVES bietet eine Reihe von Wissensquellen, angefangen von traditionellen Büchern, Leitfaden (Bild 42) über Schulungen bis hin zu E-Learning, die genutzt werden können.

Mehr Informationen können unter: <http://lpqi.org/custom/1036/> abgerufen werden.

## Energiemanagement für netzgekoppelte PV-Anlagen mit Batteriespeichern

Bericht: Dipl.-Ing. C. O. Heyde, Dipl.-Ing. H.-D. Musikowski

Das Projekt untersucht Möglichkeiten für ein aktives Vor-Ort-Energiemanagement für netzgekoppelte Photovoltaikanlagen mit Batteriespeichern zur Versorgung angeschlossener Verbraucher (z. B. Haushalte).

Ziel ist, die einzelnen Energieflüsse so zu steuern, dass vorab definierte Strategien für das dezentrale Energiemanagement möglichst gut umgesetzt werden.

Für einen Haushalt mit dachintegrierter Solaranlage könnte eine solche Strategie z. B. in der Erreichung einer größtmöglichen Systemautonomie bestehen. Hierbei muss versucht werden, den Energieaustausch mit dem Netz zu minimieren und gleichzeitig den lokalen Energieverbrauch maximal aus der PV-Anlage und der Batterie zu decken.

Andere Energiemanagementstrategien, die in diesem Zusammenhang untersucht werden, richten sich auf die bestmögliche Ausnutzung von Schwachlasttarifen („Nachtstromstrategie“) oder auf den Abbau von Lastspitzen am Hausanschlusspunkt („Lastspitzenstrategie“).

Die Untersuchungen erfolgen auf der Basis des im Bild 43 dargestellten Energieflussmodells.

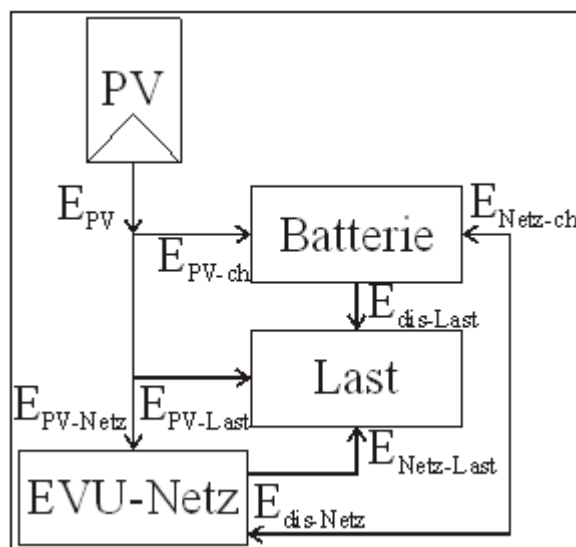


Bild 43: Energieflussmodell

Als Eingangsdaten dienen die Lastgang-Kennlinie eines Beispielhaushaltes und die Erzeuger-Kennlinie einer PV-Anlage, die jeweils als 1/4-Stunden-Mittelwerte für den Zeitraum eines Jahres vorliegen. Einen Tagesausschnitt daraus zeigt Bild 44.

Die Untersuchung des Energiemanagements erfolgt unter Vorgabe der jeweiligen Strategie mit Hilfe von Zeitschrittsimulationen, die als Ausgangsdaten sämtliche Energieflüsse des Modells liefern. Die so gewonnenen Ergebnisse können einerseits zur strategiebezogenen Anlagenauslegung und Optimierung des Energiespeichers dienen und andererseits für die Ableitung von vorteilhaften Steueralgorithmus zur Verteilung der Energieflüsse verwendet werden.

Bereits vorliegende Ergebnisse zeigen, dass für den Beispielhaushalt eine hundertprozentige Systemautonomie mit realistischen Größen für die PV-Anlage und den Batteriespeicher nicht erreicht werden kann. Bei optimaler Auslegung des PV-Generators und der Speichereinheit kann jedoch ein Autonomiegrad von 70...80% auch ohne Änderung des Verbrauchsverhaltens erzielt werden.

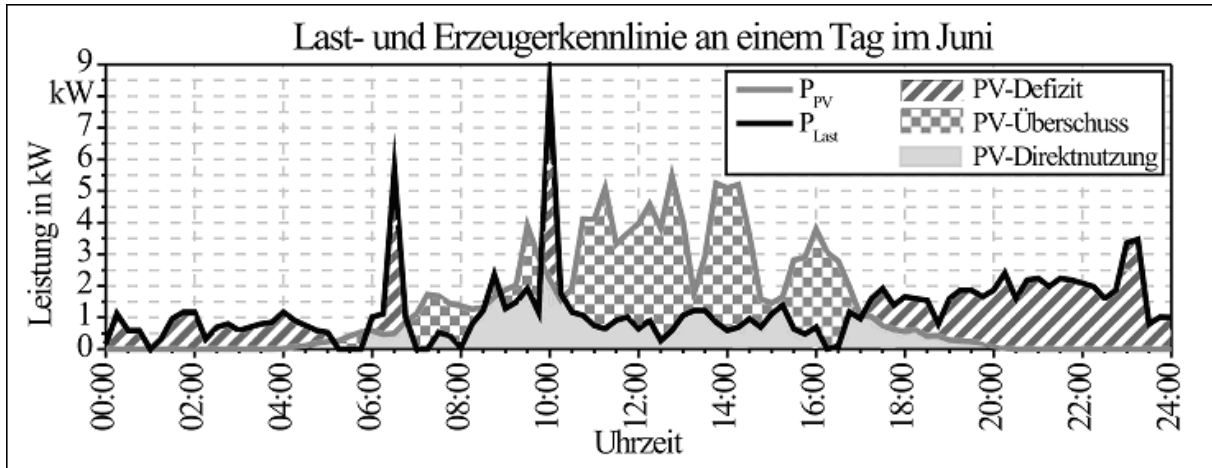


Bild 44: Tagesausschnitt Lastgang und PV-Erzeugung (Beispielhaushalt)

Bild 45 veranschaulicht die Wirkungsweise des Energiemanagements am Beispiel der „Nachtstromstrategie“. Die drei markierten Punkte kennzeichnen die wesentlichen Merkmale dieser Strategie. Punkt 1 zeigt das Umschalten auf Netzversorgung während der Nachttarifzeit um 22:00 Uhr. In Punkt 2 wird wieder auf Batterieversorgung bzw. Versorgung durch Solarstrom geschaltet. Um sicherzugehen dass die Batterie während der Tagtarifzeit genügend Energie bereitstellen kann, wird in Punkt 3 der Ladevorgang eingeleitet, welcher mit Beginn der Tagtarifzeit endet.

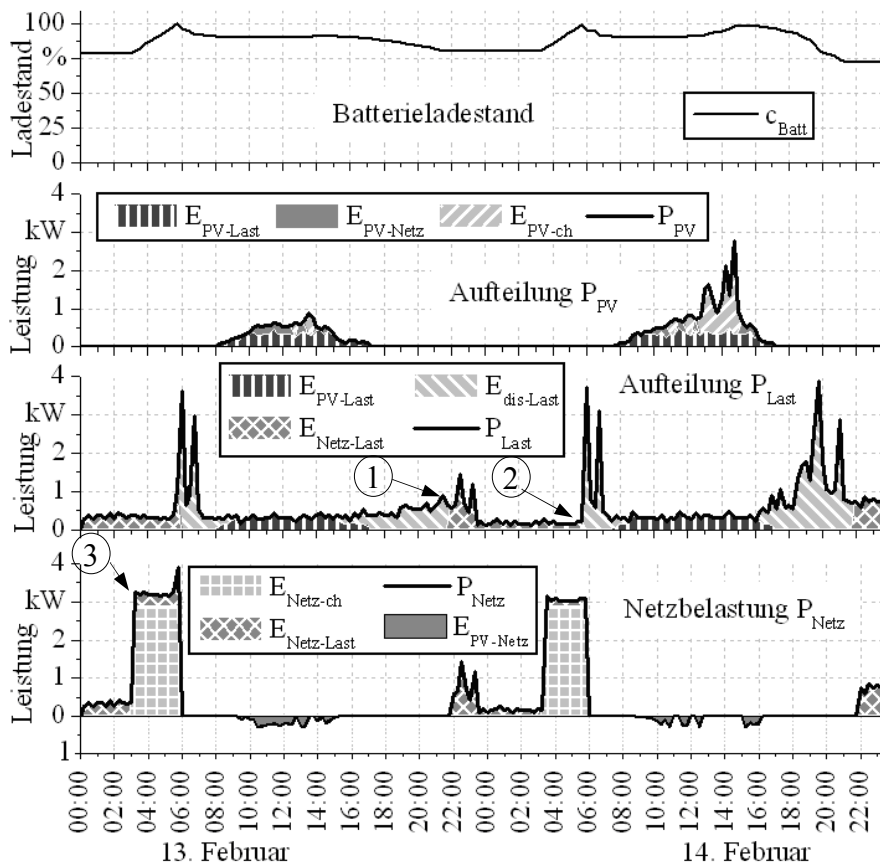


Bild 45: Wirkungsweise des Energiemanagements bei Verfolgung der „Nachtstromstrategie“

Bei dieser Strategie werden die erreichbaren Ergebnisse nicht nur von der korrekt ausgewählten Speichergröße, sondern auch von den zweckmäßig zu setzenden Ladeschwellen, die Beginn und Ende der Ladevorgänge steuern, beeinflusst.

Ein Optimum ist erreicht, wenn die Batterie die überschüssige Solarenergie während eines Tages vollständig aufnehmen und genügend Energie für die Last bereitstellen kann. Um also einen möglichst geringen und den Strategievorgaben entsprechenden Energiebezug aus dem Netz zu erreichen, müssen diese Ladeschwellen optimiert werden.

## **Ausgleich stochastischer Pendelungen der Windparkeinspeiseleistung durch den Einsatz von Energiespeichern und konventionellen Energieträgern**

Bericht: Dipl.-Ing. A. Lebioda

Die herkömmlichen Strukturen der öffentlichen Energieversorgung befinden sich derzeit im Wandel hin zu einer verstärkten Nutzung regenerativer Energiequellen. Windenergienutzung wird in Europa als „Stand der Technik“ betrachtet. Es wird erwartet (DENA Studie), dass zukünftig (bis 2030) in Deutschland eine installierte Erzeugungsleistung aus Windenergie von 30 GW an das Netz angeschlossen sein wird. Für die Diskrepanz in der Leistungsbilanz, die zwischen der Verfügbarkeit der Primärenergiequelle Wind und der zeitlichen Verbraucherlast entsteht, wird zum Ausgleich der Leistungsdifferenz Regelleistung benötigt. Die Größenordnung des künftigen Beitrags regenerativer Energien an der öffentlichen Energieversorgung macht daher eine Untersuchung notwendig, wie die Regelleistung bereitzustellen oder ein Ausgleich der Leistungsbilanz herzustellen ist. Zu der Bereitstellung der Regelleistung durch herkömmliche Kraftwerke bieten Energiespeicher und die Kombination der Windpark- mit konventionellen Energieerzeugungsanlagen zu hybriden Systemen eine Alternative. Neben den Energiespeichieranlagen kann hierbei die Vorratsbildung z. B. fossiler Brennstoffe zur Regelung der pendelnden Windleistung eingesetzt werden.

Basis der Systemuntersuchungen bildet die Simulation der Leistungsabgabe eines Windparks, der durch die technische Ausführung der einzelnen Windenergieanlagen und ihre Aufbaugometrie mit den resultierenden Windabschattungseffekten innerhalb der Gesamtanlage definiert ist. Basierend auf dem Riso-Modell wird der Wake-Effekt für jede Windturbine mit der Simulationssoftware Matlab bestimmt. Neben den genannten Festlegungen sind auch die interne Verschaltung der Windenergieanlagen bis zum Netzanschlusspunkt und die Regelstrategie des Gesamtsystems von Interesse. Alle diese Faktoren bestimmen die Reaktion des Systems auf die Antriebsenergie Wind. Das dynamische Verhalten des Gesamtsystems wird hierbei mit der Software NETOMAC simuliert.

Für lange Untersuchungszeiträume, in den Größenordnungen von einigen Monaten bis hin zu einem Jahr, rückt die exakte dynamische Simulation des Systems in den Hintergrund. In diesen Fällen beschreiben die stationären Systemzustände genügend gut das Verhalten des Windparks und bitten die Möglichkeit die notwendigen Berechnungen zu minimieren. In der Simulationssoftware Matlab ist ein nach den oben genannten Kriterien spezifiziertes Windparkmodell implementiert worden. Die Kalkulation der gesamten Windparkleistung, in Abhängigkeit von der ungestörten Windgeschwindigkeit als Eingangsgröße, basiert auf der Definition einer Leistungscharakteristik (Bild 46) des Windparks, die aus den Berechnungsergebnissen des dynamischen Systemverhaltens resultiert.

Die Leistungscharakteristik beschreibt die Systemantwort des Windparks  $P_{WP}(t)$  auf eine Erregung mit einer Windgeschwindigkeit  $v_w(t)$  mit der Windrichtung  $\alpha_w(t)$ . Jeder Kombination des Eingangsgrößenpaars (x- und y-Achse) ist eine Gesamtleistung des Windparks (z-Achse) zugeordnet.



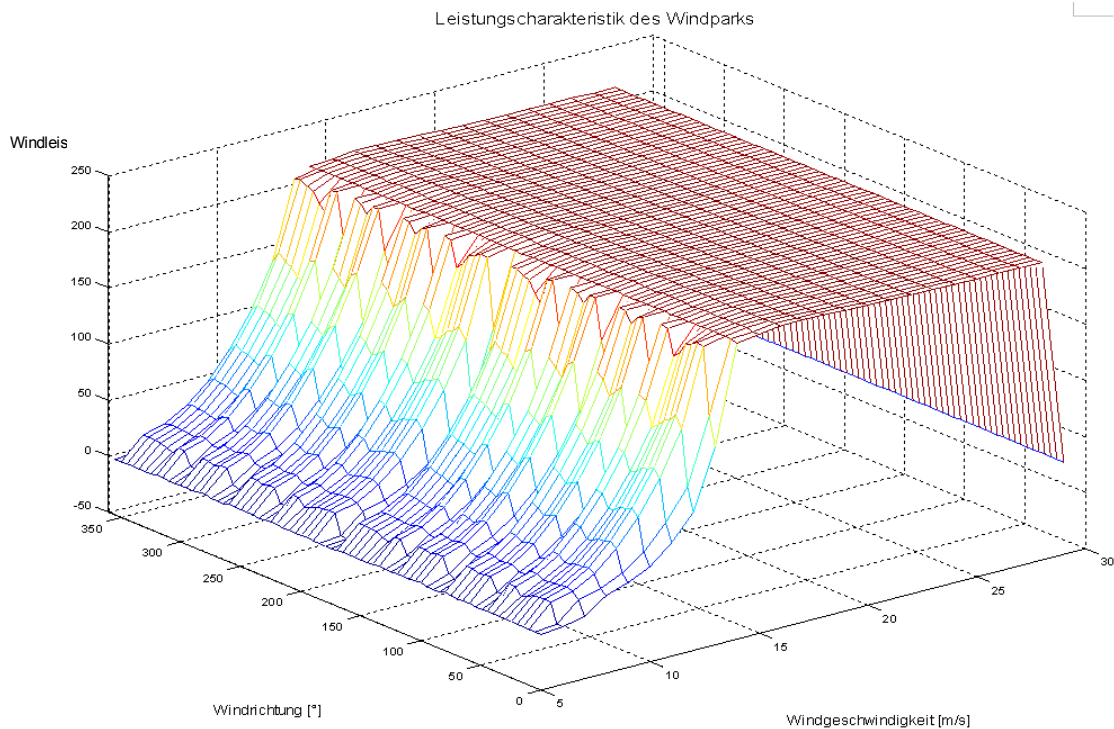


Bild 46: Leistungscharakteristik eines Beispielwindparks mit 48 Windenergieanlagen

Für die Untersuchung des Langzeitverhaltens einer Windpark-Speicher-Kombination wird das Energiespeichersystem, unabhängig von seiner Ausführung oder der eingesetzten Technologie, mit charakteristischen Parametern (wie z. B. Kapazität, Wirkungsgrad, Leistungsband und Geschwindigkeit für den Lade- und Entladevorgang) beschrieben. Als Beispiel für die Untersuchungsergebnisse sind nachfolgend im Bild 47 zwei Randpunkte für die Dimensionierung des Energiespeichers (Einspeisung einer Dauerleistung und Glättung der eingespeisten Windparkleistung) dargestellt.

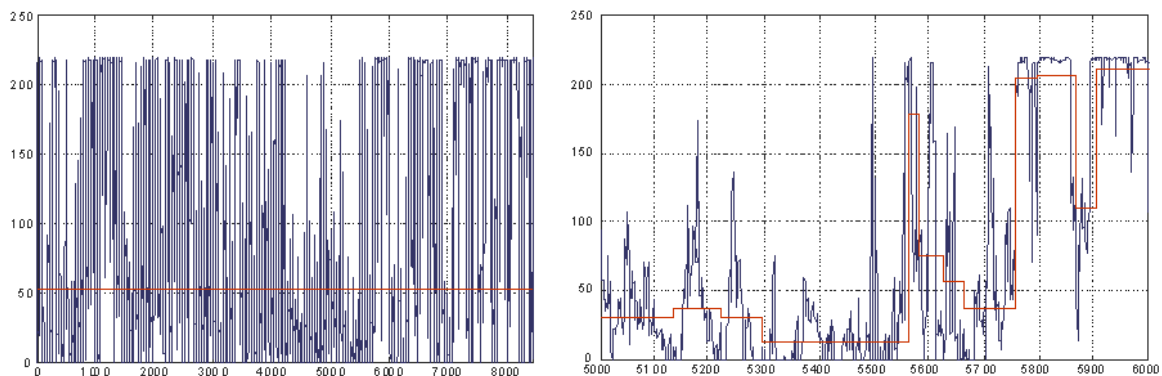


Bild 47: Einspeiseleistungen des Windparks und des Windpark-Speicher-Gesamtsystems, Kapazität des Speichers 105 Gwh (links); Glättung der Einspeiseleistung des Windparks, Optimierte der Kapazität des Speichersystems 400 Mwh (rechts)

Ausgehend von den Ergebnissen der beiden vorgestellten Randpunkte für die Dimensionierung der Windpark-Speicher-Lösung zeigt sich, dass diese Systeme bezüglich der geforderten Speicherkapazität bzw. des geringen Einflusses auf die Form der Einspeiseleistung nur in wenigen Einsatzfällen interessant werden könnten. Im Vergleich zur dieser Lösung erreichen

Windpark-Speicher-Gasturbine-Hybridsysteme eine höhere Flexibilität. Mit der Ausnutzung konventioneller Energieträger als zusätzlichen Energiespeicher lässt sich zeigen, dass für große Windparkanlagen so die technischen Anforderungen unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit besser zu realisieren sein werden. Simulationsergebnisse für ein solches Hybridsystem sind nachfolgend (Bild 48) dargestellt.

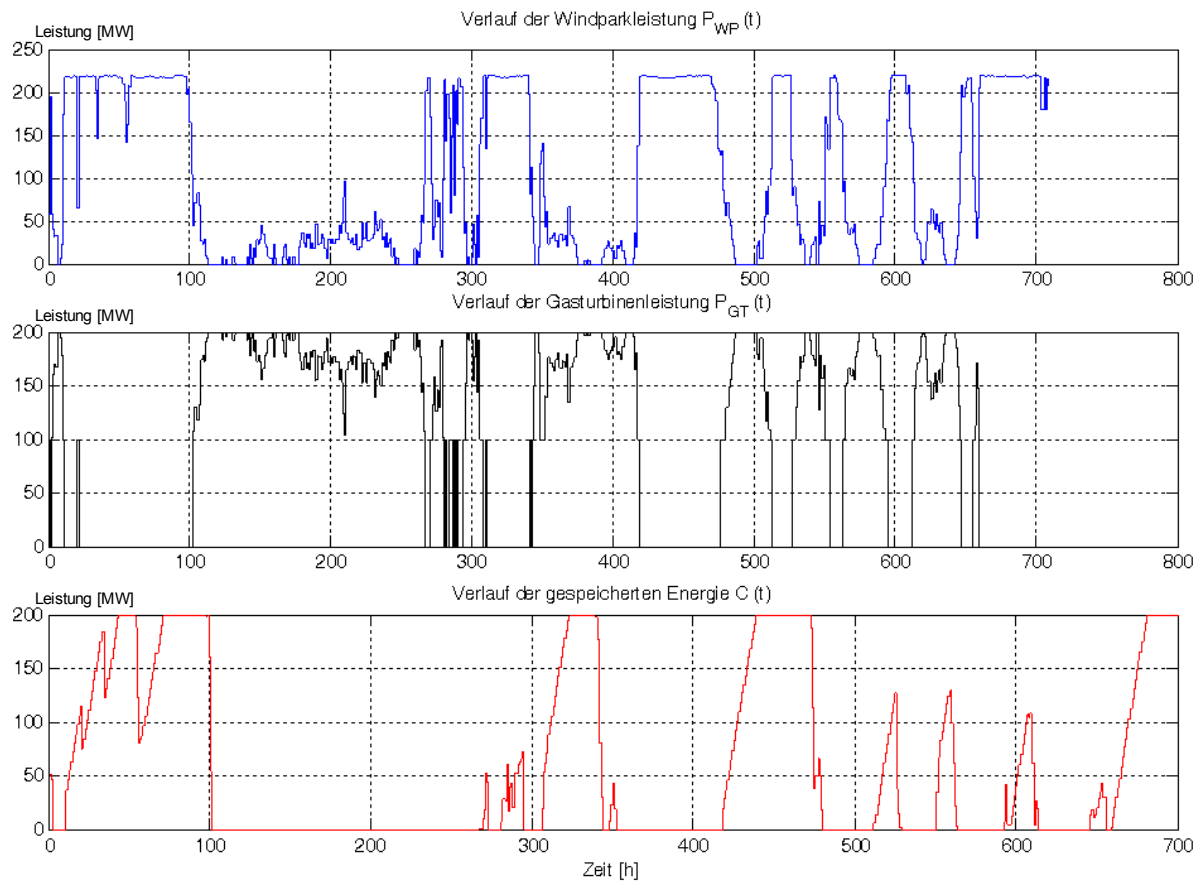


Bild 48: Vergleich der zeitlichen Verläufe der Windparkleistung, der Gasturbinenleistung und der gespeicherten Energie für eine festgelegte Dauereinspeiseleistung am Netzeinspeisepunkt

### 3.3.3 Promotionen

**Dr.-Ing. Biljana Hadzi-Kostova**

**Protection Concepts in Distribution Networks with Decentralised Energy Resources**

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Zbigniew Antoni Styczynski, Universität Magdeburg,  
Prof. Dr.-Ing. i. R. A. G. Phadke, Virginia Technical University,  
Blacksburg, USA  
Dr.-Ing. Reiner Krebs, Siemens AG, Erlangen, Deutschland

verteidigt am: 25.10.2005

The global trends of deregulation, globalisation and privatisation have had and still have a strong impact on the electric power industry. The problems connected with the limitations of exciting energy resources, as opposed to a continuously growing world population, especially in developing and emerging countries, play and will play even more an important role in the future.

Environmental matters, along with public acceptance of certain technologies e.g. energy generation from decentralised energy resources, which also have a strong political aspect, are likewise becoming increasingly significant factors.

In a distribution network with high penetration of decentralised energy resources, the direction of power flow, which was clearly defined in the electrical power system without decentralised generation, changes according to the ratio of energy offered from the decentralised energy resources and the power system on the higher voltage level and the energy demand from the network costumers.

However the protection systems installed in the power system are not set to manage these variable changes of direction of power flow. Because of the lack of “powerful” generators that can create a strong network, such a network characterises by a very low short circuit power, which is definitely going to affect the protection system. The protection devices implemented in the network are about to be set to match these changes. Consequently new protection concepts are necessary. In this work some idea-concepts of network protection in distribution networks with high penetration of decentralised energy resources are presented.



*Bild 49: Am Otto-von-Guericke-Denkmal*

**Dr.-Ing. Andreas Lange**

Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

**Einbindung von Solar- und Windkraft-Anlagen in dezentrale Energieversorgungssysteme unter Berücksichtigung unterschiedlicher Dynamik der Systemkomponenten**

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Käferstein, Otto-von-Guericke Universität  
Magdeburg  
PD. Dr.-Ing. habil. Rüdiger Sontag, Otto-von-Guericke Universität  
Magdeburg  
Prof. Dr.-Ing. Zbigniew A. Styczynski, Otto-von-Guericke Universität  
Magdeburg

verteidigt am: 10.02.2005

**Dr.-Ing. Friedrich W. Koch**

Fachbereich Ingenieurwissenschaften der Universität Duisburg-Essen

**Simulation und Analyse der dynamischen Wechselwirkung von Windenergieanlagen mit dem Elektroenergiesystem**

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Istvan Erlich, Universität Duisburg-Essen  
Prof. Dr.-Ing. Zbigniew A. Styczynski, Otto-von-Guericke-Universität  
Magdeburg

verteidigt am: 19.09.2005

### 3.3.4 Veröffentlichungen

- ♦ Purmann, M.; Styczynski, Z. A.:  
**Simplified evaluation of PEM-fuel cells by reduction of measurement parameters and using optimised measurement algorithms**  
In: Fuel Cell Science and Technology Meeting, München, 6.-7. Okt. 2004.  
Journal of Power Sources, Vol. 145, p.p. 399-406, Elsevir B.V. 2005
- ♦ Heideck, G.; Purmann, M.; Styczynski, Z. A.:  
**Multi channel voltage control for fuel cells**  
In: Fuel Cell Science and Technology Meeting, München, 6.-7. Okt. 2004.  
Journal of Power Sources, Vol. 145, p.p. 594-597, Elsevir B.V. 2005
- ♦ Haubrock, J.; Heideck, G.; Styczynski, Z. A.:  
**Independent power units with polymer membrane fuel cells**  
In: St. Petersburg Polytechnical University (Veranst.): 2005 IEEE St. Petersburg PowerTech (conference St. Petersburg, Russia June 27-30 2005). - proceedings.  
Piscataway: IEEE Operation Center, 2005, 6 S., [Elektronische Ressource]
- ♦ Angelov, A. N.; Styczynski, Z. A.:  
**Entwicklung und Realisierung einer webbasierten Lehrveranstaltung im Fach Alternative Energiequellen**  
Fachkolloquium Desdener Kreis, 04. - 05. April 2005, Duisburg, Deutschland.
- ♦ Angelov, A. N.; Styczynski, Z. A.; Orths, A.; Blümel, E.:  
**Anwendung von VRML-Technologie für die virtuellen Experimente mit einer Brennstoffzelle**  
8.IFF-Wissenschaftstage, pp. 165-168, ISBN 3-8167-6849-0, 22.-24. Juni 2005, Magdeburg, Deutschland.
- ♦ Angelov, A. N.; Friedrich, H.; Styczynski, Z. A.; Wollenberg, G.:  
**Teaching Electrical Engineering using E-Learning Methods at the Otto-von-Guericke-University Magdeburg**  
Proceedings of the International Conference on Engineering Education ICEE'2005, Volume 2, pp. 628-632, ISSN 1562-3580, 25.-29. July 2005, Gliwice, Poland.
- ♦ Angelov, A. N.; Haubrock, J.; Hadzi-Kostova, B.; Styczynski, Z. A.; Schweizer-Ries, P.:  
**Learning about renewables using VRML-technology**  
In: St. Petersburg Polytechnical University (Veranst.): 2005 IEEE St. Petersburg PowerTech (conference St. Petersburg, Russia June 27-30 2005). - proceedings.  
Piscataway: IEEE Operation Center, 2005, 5 S., [Elektronische Ressource]
- ♦ Hadzi-Kostova, B.; Styczynski, Z. A.; Krebs, R.:  
**New protection concepts for distribution systems with dispersed generation**  
In: St. Petersburg Polytechnical University (Veranst.): 2005 IEEE St. Petersburg PowerTech (conference St. Petersburg, Russia June 27-30 2005). - proceedings.  
Piscataway: IEEE Operation Center, 2005, 6 S., [Elektronische Ressource]
- ♦ Hadzi-Kostova, B.; Styczynski, Z. A.:  
**Teaching water power plants using an E-learning systems**  
In: St. Petersburg Polytechnical University (Veranst.): 2005 IEEE St. Petersburg PowerTech (conference St. Petersburg, Russia June 27-30 2005). - proceedings.  
Piscataway: IEEE Operation Center, 2005, 6 S., [Elektronische Ressource]

- ♦ Dzienis, C.; Bachry, A.; Styczynski, Z. A.:  
**The influence of the distribution system structure on distortion emission and propagation**  
In: St. Petersburg Polytechnical University (Veranst.): 2005 IEEE St. Petersburg PowerTech (conference St. Petersburg, Russia June 27-30 2005). - proceedings. Piscataway: IEEE Operation Center, 2005, 5 S., [Elektronische Ressource]
- ♦ Haubrock, J.; Heideck, G.; Styczynski, Z. A.:  
**Brennstoffzellen USV als Anwendung im liberalisierten Energiemarkt**  
In: TU Wien, Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft (Veranst.); AAEE (Austrian Association for Energy Economics) (Veranst.): Energiesysteme der Zukunft: Herausforderungen und Lösungspfade (4. Internationale Energiewirtschaftstagung Wien, Österreich 16. - 18. Februar 2005). Wien, 2005, [Elektronische Ressource] (IEWT 2005)
- ♦ Gamm, A.; Golub, I. I.; Bachry, A.; Styczynski, Z. A.:  
**Solving several problems of power systems using spectral and singular analyses**  
In: IEEE transactions on power systems [New York, NY] 20(2005), Nr. 1, S. 138 - 148 Imp.-Fact.: 0.821
- ♦ Dzienis, C.; Bachry, A.; Styczynski, Z. A.:  
**Estimating voltage quality in distribution systems using cfa-matrix description for non- linear loads**  
In: University of Liege (Veranst.): PSCC 2005 (15<sup>th</sup> power systems computation conference Liege, Belgium August 22-26 2005). Liege, 2005, 6 S., [Elektronische Ressource] (PSCC 15)
- ♦ Hadzi-Kostova, B.:  
**Protection Concepts in Distribution Networks with Decentralised Energy Resources**  
Diss. A, Res Electricae Magdeburgenses, Magdeburger Forum zur Elektrotechnik, Magdeburg, Jg. 3, Bd. 11, 2005. ISBN 3-929757-84-2.
- ♦ Rudion, K.; Orths, A.; Lebioda, A.; Styczynski, Z. A.:  
**Wind farms with DFIG as virtual power plants**  
In: The University of Strathclyde in Glasgow (Veranst.); KTH Electrical Engineering (Veranst.): Fifth International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power and Transmission Networks for Offshore Wind Farms (conference Glasgow, Scotland 07-08.04.2005). – proceedings. S. 115 – 122
- ♦ Lebioda, A.; Rudion, K.; Orths, A.; Styczynski, Z. A.:  
**Investigation of disposable reserve power in a large-scale wind farm**  
In: St. Petersburg Polytechnical University (Veranst.): 2005 IEEE St. Petersburg PowerTech (conference St. Petersburg, Russia June 27-30 2005). - proceedings. Piscataway: IEEE Operation Center, 2005, 6 S., [Elektronische Ressource]
- ♦ Rudion, K.; Styczynski, Z. A.; Szafran, J.:  
**Double Diploma Project – Step towards internationalization and globalization of electrical engineering education**  
In: Silesian University of Technology – Gliwice (Veranst.): International Conference on Engineering Education ICEE' 2005 (conference Gliwice, Poland 25-29.07.2005). – proceedings. Volume 2, S. 424-429, [Elektronische Ressource]

- ♦ Bachry, A.; Dzienis, C.; Krebs, R. ; Styczynski, Z. A.:  
**Crossed-frequency-admittance-matrix approach for voltage quality study in distribution power systems**  
In: ETH Zürich (Veranst.): EMC Week 2005 (16th international Zurich symposium on electromagnetic compatibility and technical exhibition Zurich, Switzerland February 13-18 2005). - proceedings. Zürich: ETH, 2005, S. 459 - 462, [Elektronische Ressource] (EMC Zurich 2005)
- ♦ Hadzi-Kostova, B.; Styczynski, Z. A.; Krebs, R.:  
**A New Approach in Teaching Digital Network Protection**  
In: TU Delft (Veranst.): FPS 2005 (International Conference on Future Power Systems, Netherlands November 16-18, 2005). – proceedings. Delft: TU, 2005, P07-01, [Elektronische Ressource]

## 3.4 Lehrstuhl für Leistungselektronik

### 3.4.1 Forschungsprofil

Das Forschungsprofil des Lehrstuhls für Leistungselektronik trägt der rasch fortschreitenden Entwicklung in diesem Gebiet der Elektrotechnik Rechnung, die maßgeblich geprägt wird durch die Verfügbarkeit neuer, optimierter Bauelemente einerseits sowie durch gestiegene Anforderungen an verschiedene technische Systeme andererseits, die zweckmäßigerweise unter Einsatz leistungselektronischer Stellglieder realisiert werden. Dieser enge Zusammenhang von Komponenten- und Systemebene findet bei der Forschung zum **Einsatz neuer Bauelemente in leistungselektronischen Systemen** besondere Berücksichtigung. Laufende Projekte befassen sich mit Systemen für Klein- und Niederspannung:

Zu den leistungselektronischen Systemen für Kleinspannung zählen Umrichter für Brennstoffzellenanlagen insbesondere kleinerer Leistung, wie sie u. a. zur dezentralen Energieversorgung eingesetzt werden. Die Zellen erzeugen aus Wasserstoff bzw. wasserstoffhaltigem Prozessgas elektrische Energie. Da jede Zelle eine belastungsabhängige Gleichspannung in der Größenordnung von lediglich etwa einem Volt abgibt, ist trotz Reihenschaltung für viele Verbraucher eine leistungselektronische Umformung der elektrischen Größen erforderlich. Gleiches gilt für die Ankopplung zusätzlicher Energiespeicher wie Batterien, die eine für die Brennstoffzelle schonende Betriebsführung mit mäßigen Lastzyklen ermöglichen. Die mit Kleinspannung gespeiste zellenseitige Leistungselektronik ihrerseits profitiert von der Entwicklung der auch in der Automobilelektronik zunehmend benötigten Leistungstransistoren: So sind inzwischen Leistungs-Mosfets mit sehr geringem Einschaltwiderstand verfügbar, die eine verlustarme leistungselektronische Umformung ermöglichen und somit einen Beitrag zur Realisierbarkeit und Optimierung entsprechender Systeme der dezentralen Energieversorgung leisten.

In der bereits erwähnten Fahrzeugelektronik werden zunehmend leistungselektronische Umformer für Stromversorgung oder drehzahlvariable Antriebe vorgesehen. Dies betrifft nicht nur Konzepte wie Brennstoffzellen-Fahrzeuge oder Kfz mit Hybridantrieb, sondern bereits konventionelle Automobile, in denen beispielsweise eine ökonomischere elektrische statt einer hydraulischen Lenkhilfe vorgesehen wird; ähnliche Anwendungen finden sich darüber hinaus in Flurförderzeugen wie Gabelstaplern u. ä. Als schwierig erweisen sich allerdings Aufbau und Integration entsprechender Systeme, die zahlreiche Fragestellungen zum elektrischen, thermischen und mechanischen Konzept sowie zu Betriebsverhalten und Zuverlässigkeit aufwerfen. Auch diesbezügliche Forschung muss folglich die Komponenten- wie die Systemebene umfassen.

Die Arbeiten zu leistungselektronischen Systemen mit neuen Bauelementen für Niederspannung – d. h. in netzgekoppelten Anwendungen typischerweise einige Hundert Volt – konzentrieren sich gegenwärtig auf die Stromversorgungstechnik: So werden verschiedene neuzeitliche Transistortypen auf ihre Eignung für resonanten Betrieb in einem Matrixumrichter, der eine Vorrichtung zur kontaktlosen, elektromagnetischen Energieübertragung versorgt, untersucht.

Weitere Aktivitäten beziehen sich auf Systeme mit Bauelementen aus für die Leistungselektronik neuen Materialien wie Silizium-Karbid oder Gallium-Arsenid. Obwohl entsprechende Komponenten mit vielversprechenden Eigenschaften inzwischen verfügbar sind, erfolgt ihr Einsatz in leistungselektronischen Systemen bisher noch zögernd. Dies ist die Motivation, im Frühjahr 2006 zu einem SiC-User-Forum einzuladen; es wird ausgerichtet von ECPE - dem European Center for Power Electronics - und vorbereitet vom Lehrstuhl als einem von dessen Kompetenzzentren.



An die vorgenannten Themen knüpft eng der zweite, am Lehrstuhl bereits langjährig gepflegte Forschungsschwerpunkt - die **Leistungselektronik und Prozesstechnologie für elektrothermische Verfahren** - an: Hier wird an Stromversorgungstechnik für physikalische Beschichtung sowie für das Lichtbogen- und Widerstandsschweißen gearbeitet, was intensive Beschäftigung mit dem jeweiligen optimal zu betreibenden Prozess erfordert.

So können die Ergebnisse von auf Vakuum-Bogenentladung basierenden Beschichtungsprozessen für verschiedenste Werkstücke mit Hilfe von leistungselektronischen Stellgliedern, die beispielsweise einen pulsformigen Verlauf des Bogenstroms einprägen oder über Spulen definierte elektromagnetische Felder erzeugen, optimiert werden. Im Rahmen experimentell ausgerichteter Forschungsarbeiten müssen die Prozesse mit verschiedenen Parametern betrieben und untersucht werden, wobei die speisenden Stromversorgungen ebenfalls teilweise zu entwickeln sind. Deren Leistungsteile sind hierbei in der Regel eng verwandt mit denjenigen von Stromquellen für das Lichtbogenschweißen, das mit Strömen und Spannungen in ähnlicher Größenordnung betrieben wird; es handelt sich üblicherweise um mit hoher Taktfrequenz betriebene Durchflusswandler.

Andere Aspekte sind beim mit hohen Strömen im Kiloampere-Bereich durchgeführten Widerstandsschweißen zu berücksichtigen: Hier erweist sich die Auslegung der Systeme – einschließlich passiver Komponenten wie Transformatoren – als anspruchsvoll; darüber hinaus spielen Feldemissionen und damit Fragestellungen der elektromagnetischen Verträglichkeit eine entscheidende Rolle. Sie werden im Rahmen einer Forschergruppe der DFG mit simulativen und messtechnischen Untersuchungen bearbeitet.

So hat sich angesichts des ausgeprägt interdisziplinären Charakters vieler der beschriebenen Arbeiten an leistungselektronischen Systemen eine Zusammenarbeit mit Arbeitsgruppen anderer Lehrstühle sowie außeruniversitärer Institute bewährt. Die am Lehrstuhl für Leistungselektronik selbst angewandte Methodik ist geprägt durch eine Kombination theoretischer Untersuchungen – wie Berechnung, Modellbildung und Simulation – mit experimentellen Arbeiten – insbesondere an Bauelement, leistungselektronischem System und Prozess. Einige im Jahr 2005 bearbeitete Projekte werden im folgenden Abschnitt detaillierter erläutert.

### 3.4.2 Forschungsprojekte

#### Einsatz neuer Bauelemente in leistungselektronischen Systemen

##### **Dezentrales brennstoffzellenbasiertes Energieversorgungssystem für den stationären Bereich in der Klasse 20 kW: Teilprojekt „Wechselrichter und Batterieumrichter“**

Kooperationen: Lehrstuhl Elektrische Netze und Alternative Elektroenergiequellen,  
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (Projektleitung)  
Max-Planck-Institut Dynamik komplexer technischer Systeme

Förderung: Land Sachsen-Anhalt

Bericht: Dr.-Ing. I. Merfert

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens werden die wissenschaftlichen Grundlagen für den Aufbau einer brennstoffzellenbasierten Energieversorgungsanlage mit 20 kW elektrischer Leistung untersucht und Lösungen für eine praktische Umsetzung erarbeitet. Diese Aufgabe schließt sowohl die Topologie und Bauelementeauswahl für den Umrichter der Brennstoffzelle und der Batterieanlage, als auch den Wechselrichter für Ankopplung an das Netz ein. Als Grundkonzept für die Anordnung der Wandler wurde die in Bild 50 gezeigte Anordnung gewählt.

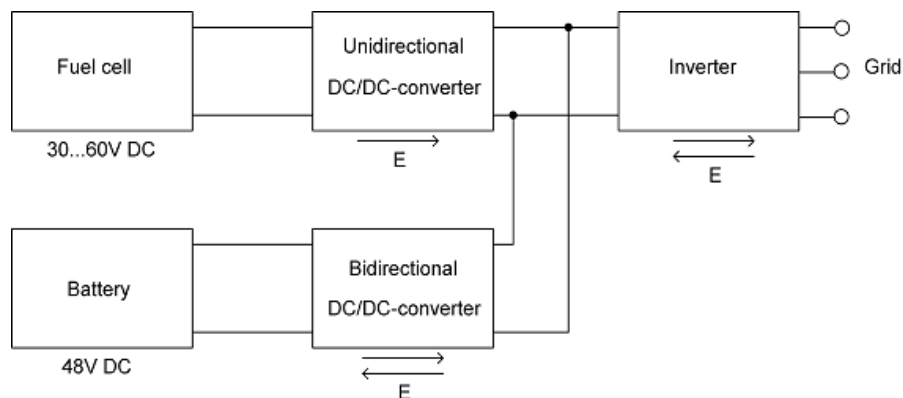
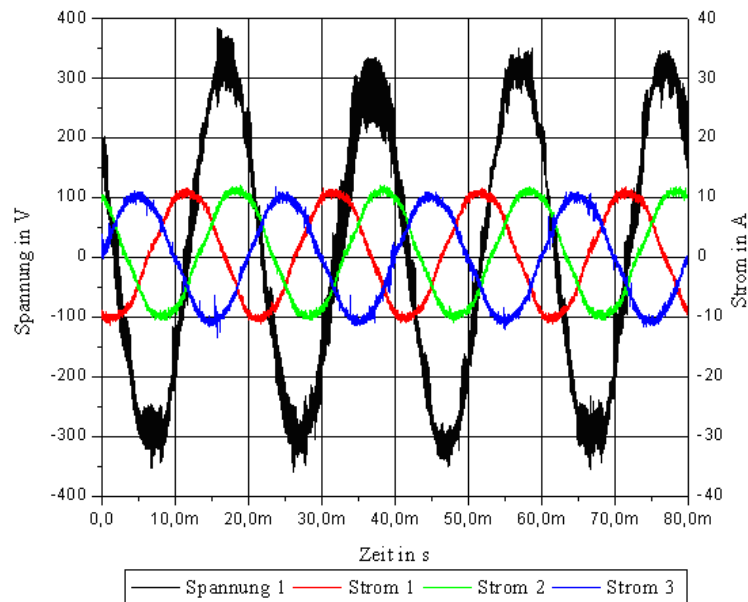


Bild 50: Prinzipielle Struktur des Brennstoffzellensystems

Ein weiteres Ziel dieses Teilprojektes ist die simulationstechnische Untersuchung der erforderlichen Funktionseinheiten der Steuerungssoftware für die leistungselektronischen Komponenten in der Anlage. Hierbei wird ein besonderer Schwerpunkt auf die Analyse der Netzbelastung mit verschiedenen Steueralgorithmen gelegt. Die Kopplung zwischen Brennstoffzelle und Versorgungsnetz soll durch einen Umrichter und einen Wechselrichter erfolgen. Der erste Entwurf des genannten Umrichters bestand aus einem Hochsetzsteller mit geteilter Drossel, der eine galvanische Verbindung zwischen Brennstoffzelle und Wechselrichter aufweist. Gegenwärtig wird ein potentialtrennender Wandler mit ähnlichen elektrischen Eigenschaften wie denen des Hochsetzstellers entworfen und aufgebaut.

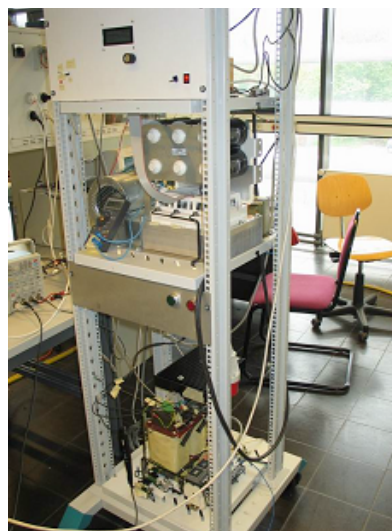
Bestandteil der Anlage ist aber auch eine Batterieanlage, um Lastspitzen, Spannungseinbrüche des Netzes und Anregelzeiten der Brennstoffzelle überbrücken zu können. Zu untersuchen sind hier Fragen einer optimalen Regelung der in das Netz einzuspeisenden Leistungsanteile aus Brennstoffzelle und Batterie (Lastmanagement). Dazu werden zunächst verschiedene Topologien mit gegenwärtig verfügbaren leistungselektronischen Bauelementen modelliert und anschließend simuliert. Ein Prototyp für den ausgewählten bidirektionalen DC/DC-Wandler befindet sich gegenwärtig im Aufbau.

Ferner wird der Wechselrichter neben seiner Energieeinspeisefunktion auch die Netzqualität am Einspeisepunkt durch Blindleistungskompensation verbessern. Spezielle Software für diese Aufgabe wird erstellt. In Bild 51 wird der Netzwechselrichter in seiner Funktion als Blindleistungskompensator, zunächst ausschließlich für die 50-Hz-Grundwelle, betrieben. Die bisherige Steuerung des Netzwechselrichters durch einen Mikroprozessor wird derzeit auf ein leistungsfähiges DSP-Steuerungssystem umgestellt, Bild 52.



*Bild 51: Netzspannung der Phase L1 und die drei Leiterströme für eine Blindleistungskompensation mit  $Q = -5\text{kVar}$  durch den 3-Phasen-Wechselrichter*

Nach der Realisierung der einzelnen leistungselektronischen Topologien und ihrer individuellen Regelschaltungen wird das Zusammenspiel innerhalb der Anlage steuer- und regelungstechnisch untersucht und optimiert unter Berücksichtigung der übergeordneten Steuerstrategie der Systemsoftware.



*Bild 52: Versuchsstand zur Untersuchung der Brennstoffzellenwandler*

## Leistungselektronik für niedrige Betriebsspannung

Bericht: Dipl.-Ing. St. Förster

Bei Einsatz von Leistungselektronik in mobilen Anwendungen ist die verfügbare Betriebsspannung (beispielsweise bei Einsatz von Brennstoffzellen) prinzipbedingt meist sehr viel kleiner als in netzgespeisten Konfigurationen. Zwar muss das Leistungsteil eines Antriebes der bei gleichbleibender Leistung resultierenden Stromerhöhung genügen, es kann in seinem Aufbau jedoch vorteilhaft auf die niedrigere Betriebsspannung ausgelegt werden.

Im Rahmen der hier beschriebenen Arbeiten soll ein dreiphasiges Niederspannungs-Leistungsteil konzipiert und realisiert werden, welches für den Einsatz in einer mobilen Anwendung am dort verfügbaren Bordnetz vorgesehen ist.

Die niedrige Betriebsspannung ermöglicht den Einsatz von MOSFET-Bauelementen, Bild 53. Diese können beispielsweise auf DCB oder IMS-Substraten isoliert aufgebaut und verschaltetet werden. Im Vordergrund der Untersuchungen steht zunächst die elektrische und thermische Modellierung und Optimierung des Aufbaus, so dass für die Systemauslegung bedeutsame Effekte wie Streuinduktivitäten und Wärmespreizung bestimmt werden können.

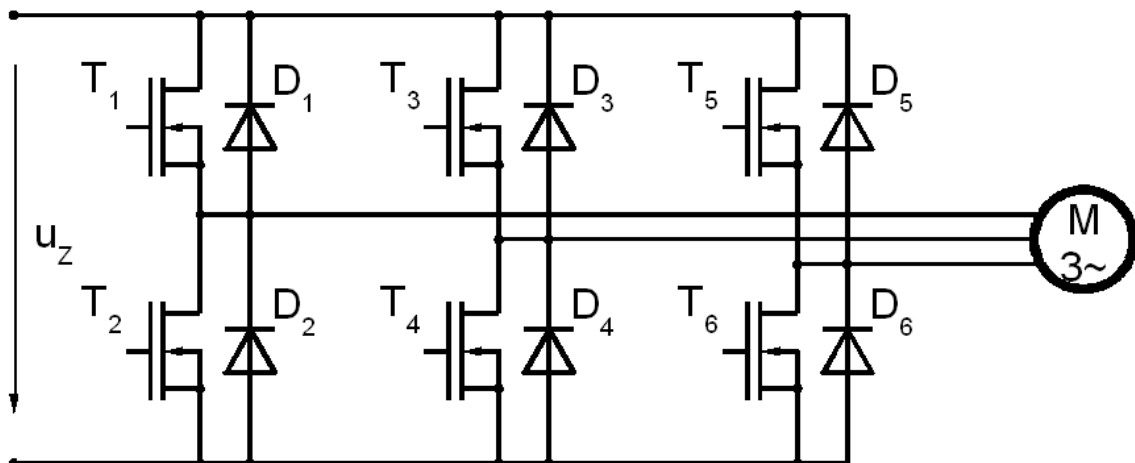
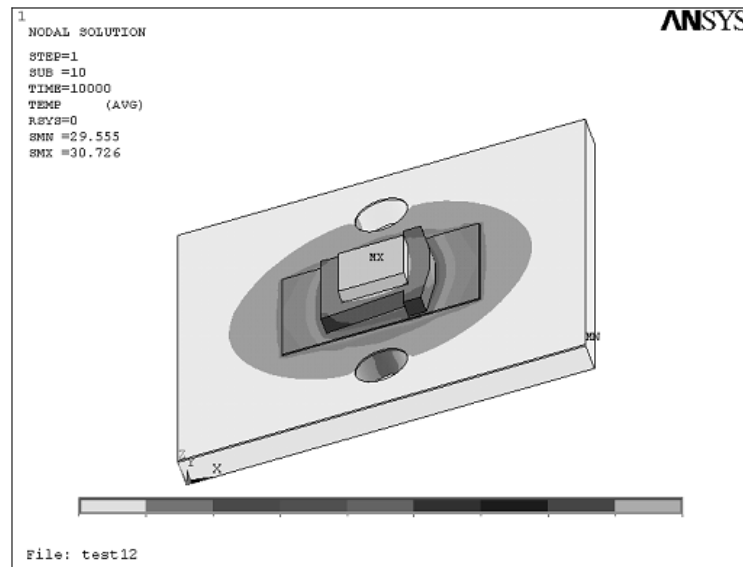


Bild 53: Leistungsteil eines dreiphasigen Antriebsumrichters mit MOSFETs

Neben theoretischen Betrachtungen und Messungen an Versuchsaufbauten ist der rechnergestützte Einsatz der FEM-Simulation ein wichtiger Teil der Arbeiten, Bild 54. Diese ermöglicht nicht nur eine Modellierung möglicher Designvarianten, sondern auch die Betrachtung weiterer Freiheitsgrade innerhalb der gleichen Berechnungsaufgabe. Damit lassen sich strukturmechanische Kontaktprobleme wie auch Einflüsse unterschiedlicher thermischer Verformung der Materialien einbeziehen.



*Bild 54: Temperatur eines IMS-Trägers, erwärmt durch die über die Geometrie einer MOSFET-Montagefläche eingeprägte Verlustleistung*

## Hochfrequent getakteter Matrixconverter für kontaktlose Energieübertragungssysteme

Kooperationen: Institut für Automation und Kommunikation e.V. Magdeburg (ifak)

Förderung: Land Sachsen-Anhalt

Bericht: Dipl.-Ing. A. Ecklebe

Für eine zunehmende Zahl von Spezialanwendungen aus der Transporttechnik, dem Maschinenbau, der Medizintechnik oder der Verfahrenstechnik besteht ein erhebliches Anwendungspotential für kontaktlose induktive Energieübertragungssysteme im Leistungsbereich bis zu einigen Kilowatt. Eine Hauptverlustquelle stellt derzeit die mehrfache Energiewandlung auf der Primärseite dar.

Im Forschungsvorhaben wird der Einsatz eines Matrixumrichters als primärer Stromrichter für kontaktlose Energieübertragungssysteme untersucht (vgl. Bild 55). Der Umrichter reduziert die Anzahl der notwendigen Energiewandlungen, vermeidet die Verwendung von Zwischenkreiskondensatoren und verringert die Verluste auf der Primärseite. Die spezielle Anwendung erfordert hohe Schaltfrequenzen ( $>100$  kHz) und stellt damit besondere Ansprüche an die verwendeten leistungselektronischen Komponenten.

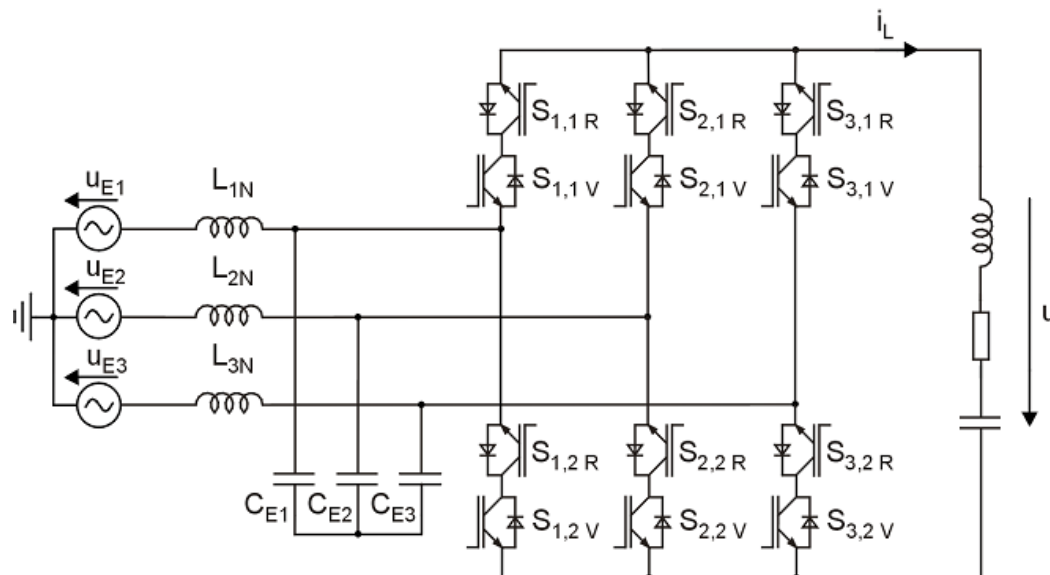
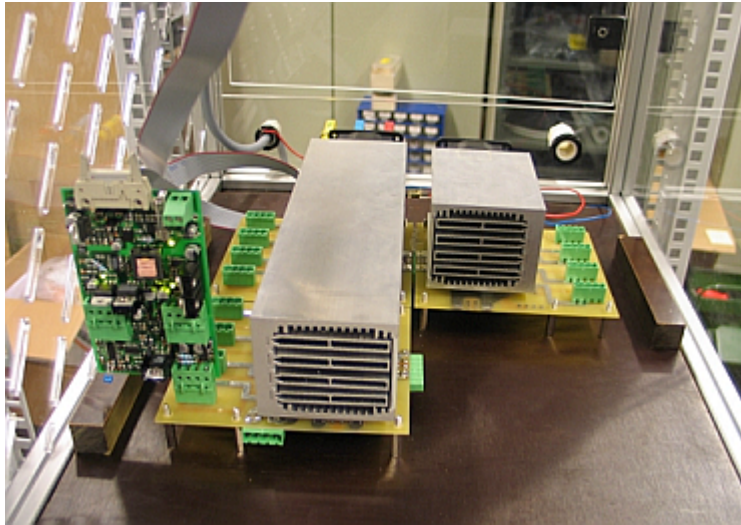


Bild 55: Topologie des 3 zu 2 phasigen Matrixconverters mit resonanter Last

Im Mittelpunkt der Arbeiten stand die Entwicklung eines universellen Kommutierungsverfahrens, welches einen Übergang zwischen den Eingangsphasen ohne Laststromunterbrechung und Kurzschlüsse ermöglichen muss, sowie der Aufbau eines geeigneten Laborversuchsstandes (siehe Bild 56). Die Analyse der Betriebszustände der einzelnen Module des Matrixumrichters stellt den ersten Schritt für die Evaluierung eines Kommutierungsverfahrens dar. Daraus konnten die wesentlichen Anforderungen und Einschränkungen abgeleitet werden. Bisher wurde die Kommutierung ausschließlich mit Hilfe einer SABER-Matlab-Simulink-Stateflow Cosimulation getestet. Nach der Fertigstellung des Versuchsstandes erfolgt die Implementierung in einen geeigneten Controller. Um den Anforderungen an Schnelligkeit und Leistungsbedarf für die Steuerung des Umrichters gerecht zu werden, wurde dafür ein DSP-FPGA System der Firma AIX-Control erworben. Im Zuge der praktischen Arbeiten wurde zusätzlich – mit maßgeblicher Unterstützung wissenschaftlicher Hilfskräfte – die Entwicklung und Fertigung eines komplexen Leistungshalbleitertreibers, sowie die Planung und Fertigung eines Sicherheitsaufbaus realisiert.



*Bild 56: Versuchsstand des 3 zu 2 phasigen resonanten Matrixumrichters mit Sicherheitsaufbau und eigens entwickeltem Treiber*

Die Arbeiten werden mit der Fertigstellung des Versuchsstandes, der Implementierung des Software und zahlreichen Messungen fortgesetzt.

## Leistungselektronik und Prozesstechnologie für elektrothermische Verfahren

### Modifiziertes Puls-Arc-Verfahren für industrielle Beschichtungsanlagen mit mehreren unabhängigen Verdampfern IPARC

Förderung: BMBF

Bericht: Dr.-Ing. O. Sobolyev, Dr.-Ing. W. Fischer

Das Ziel der vorliegenden Arbeit bestand in der Erweiterung des modifizierten Puls-Arc-Verfahrens auf einen Betrieb mit mehreren unabhängigen Verdampfern. Für neben theoretischen Untersuchungen durchgeführte Messungen standen entsprechende industrielle Beschichtungsanlagen zur Verfügung. Als Katodenmaterial wurden Ti und TiAl eingesetzt.

Der erste Teil der Arbeit befasste sich mit der Auswahl eines geeigneten Schaltungskonzeptes zur effizienten Pulsstromversorgung mehrerer Verdampfer. Hierbei wurde davon ausgegangen, dass alle Verdampfer symmetrisch angesteuert werden sollen und der gesamte Beschichtungsprozess nicht von verlöschenden Lichtbögen kritisch beeinflusst werden darf.

Aus dem Vergleich mehrerer Konzepte hat sich die zyklische Verteilung des Pulsstromes, der von einer Quelle bereitgestellt wird, als am besten geeignet erwiesen. Die Aufrechterhaltung der einzelnen Bogenentladungen wird während des gesamten Entladungsprozesses von DC-Grundstromquellen gewährleistet. Mit dem gewählten Leistungsteilkonzept können auch die unerwünschte Parallelschaltung von Katoden und die damit verbundenen Zündschwierigkeiten vermieden werden. Als technische Lösung für einen gleichzeitigen Betrieb von mehreren Verdampfern wurde eine Zentraleinheit mit transistorisiertem Pulsverteiler (Demultiplexer) ausgewählt.

Im Weiteren wurde ein Überblick über die notwendigen physikalischen Anforderungen an die Puls- und Grundstromquellen gegeben, die sich aus den beschichtungsprozess-technischen Vorgaben und den plasmaphysikalischen Eigenschaften des Lichtbogens ergeben. Diesen wurde eine Inverterpulsstromquelle mit zwei asymmetrischen Halbbrückenwechselrichtern in Parallelschaltung gerecht. Anschließend wurden mit der entwickelten Pulsstromversorgung an zwei Beschichtungsanlagen Prozessuntersuchungen durchgeführt. Sie beinhalteten Ionenstrommessungen mit statischen und rotierenden Sonden sowie die Bestimmung der Beschichtungsrate und der Dropletmission. Bild 57 zeigt die auf drei Katoden verteilten Pulsströme.

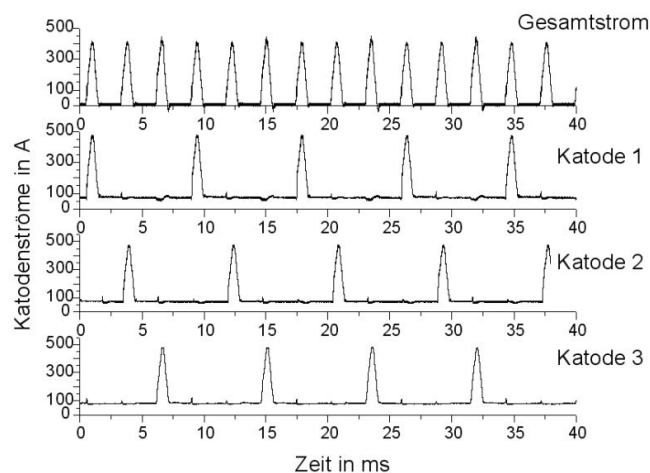


Bild 57: Auf drei Katoden aufgeteilte Stromimpulse



Es wurde festgestellt, dass die Gesamtionenstromdichte aufgrund energiemindernder Zusammenstöße bis zu 25% kleiner als die Summe der partialen Ionenströme von 3 Katoden war. Der mit rotierenden Sonden untersuchte Einfluss der Pulsamplitude auf die mittlere Ionenstromdichte kann im Bereich bis 500 A als gering eingeschätzt werden. Die normierte Beschichtungsrate stieg durch die Erhöhung des mittleren Ionenstroms auf das Substrat beim gepulsten Prozess bis um den Faktor 2,6 für TiN-Beschichtungen und um den Faktor 2,1 für TiAlN-Beschichtungen gegenüber der DC-Arc-Beschichtung an.

Eine im Puls-Modus gegenüber dem DC-Modus erhöhte Teilchenionisation im Zusammenhang mit relativ geringer Partikelproduktion war die Ursache für die sehr dichte Mikrostruktur der abgeschiedenen TiAlN-Schichten. Gegenüber konventionellen DC-Stromversorgungen bietet die für mehrere Verdampfer entwickelte Pulsstromversorgung den entscheidenden Vorteil, dass dropletarme Schichten bei kürzeren Beschichtungszeiten hergestellt werden können.

## Modifiziertes Puls-Arc-Verfahren mit Magnetfeldführung

Förderung: DFG  
Bericht: Dipl.-Ing. E. Hettkamp

Das Ziel des Forschungsvorhaben besteht darin, für das modifizierte Puls-Arc-Verfahren eine Möglichkeit zu schaffen, den Prozess durch ein veränderliches, dem Bogenstrom angepasstes Magnetfeld zu beeinflussen.

Das modifizierte Puls-Arc-Verfahren ist durch die Variationsmöglichkeiten der elektrischen Parameter in weiten Grenzen beeinflussbar. Eine Kombination des Verfahrens mit dem Steered-Arc-Verfahren hat erste Erkenntnisse auf dem Gebiet der magnetischen Beeinflussung des modifizierten Puls-Arc-Verfahrens erbracht. Ein entscheidender Nachteil ist bisher jedoch die fehlende Möglichkeit, das Magnetfeld dem Prozess anzupassen.

Die Steuerung eines externen Magnetfeldes während der Verfahrenskombination von Steered-Arc- und modifizierten Puls-Arc-Prozess gibt diesem Verfahren neue Freiheitsgrade. Die vorgesehenen Untersuchungen sollen zu einem besseren Verständnis der grundlegenden Zusammenhänge zwischen den elektrischen und magnetischen Parametern und den resultierenden Plasmaeigenschaften und Schichten beitragen.

Für die Versorgung der notwendigen Magnetspule wurde eine Stromquelle entwickelt und aufgebaut, die sowohl statische als auch gepulste Magnetfelder mit Hilfe der Magnetspule erzeugen kann, Bild 58. Für den Einsatz der Spule bei gepulsten Prozessen ist es durch einen Microcontroller möglich, eine Synchronisation des Spulenstromes auf den Bogenstrom vorzunehmen.

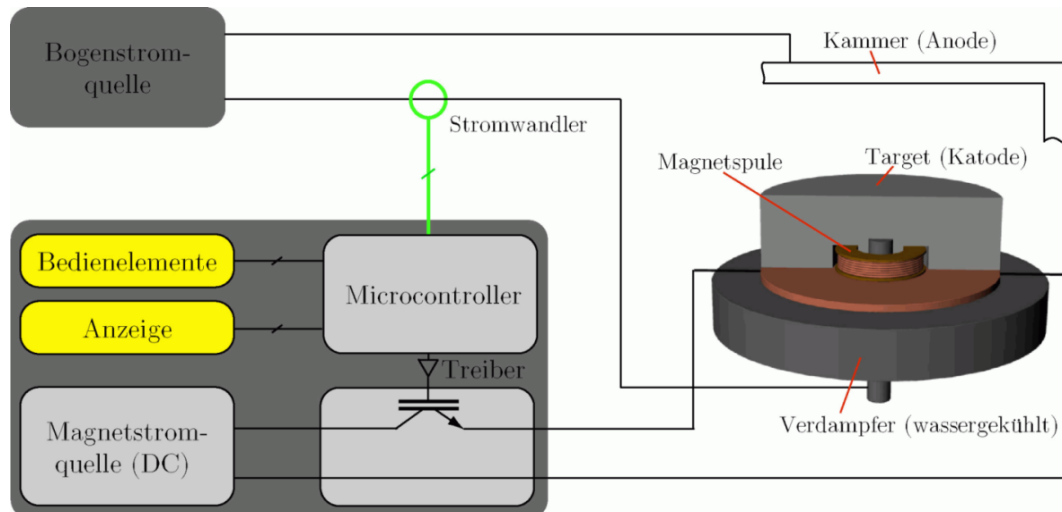


Bild 58: Schematische Übersicht der Komponenten der Magnetstromquelle

Dabei soll während der Grundstromphase des Bogenstromes das Magnetfeld wirken, während es in der Pulsphase ausgeschaltet bleibt. Mit dem Einbau der Magnetspule in die Beschichtungsanlage und der Realisierung einer für Pulsprozesse anwendbaren Magnetstromversorgung ist die Möglichkeit für eine Anpassung eines Magnetfeldes an einen gepulsten Prozess gegeben.

Auf der Grundlage des realisierten Magnetsystems werden dann verschiedene Untersuchungen durchgeführt. Die vorgenommenen Ionenstrommessungen haben z. B. gezeigt, dass ein vorhandenes Magnetfeld bei einem Steered-Arc-Prozess eine Verringerung der Mittelwerte des Ionenstromes im Vergleich zum Random-Arc hervorruft. Es ist aber ebenfalls erkennbar, dass dieser Tendenz, je nach verwendetem Targetmaterial, durch Verwendung eines gepulsten Prozesses mit synchronisiertem Spulenstrom entgegengewirkt werden kann.

Bild 59 kann entnommen werden, dass mit steigendem Spulenstrom, also einem Ansteigen der Magnetfeldstärke, eine Abnahme des Mittelwertes des Ionenstromes an den Sonden  $0^\circ$  und  $22,5^\circ$  zu beobachten ist. Dieses Verhalten ist bei Verwendung des gepulsten Prozesses ausgeprägter. An der Sonde  $45^\circ$  wird kaum ein Einfluss sichtbar.

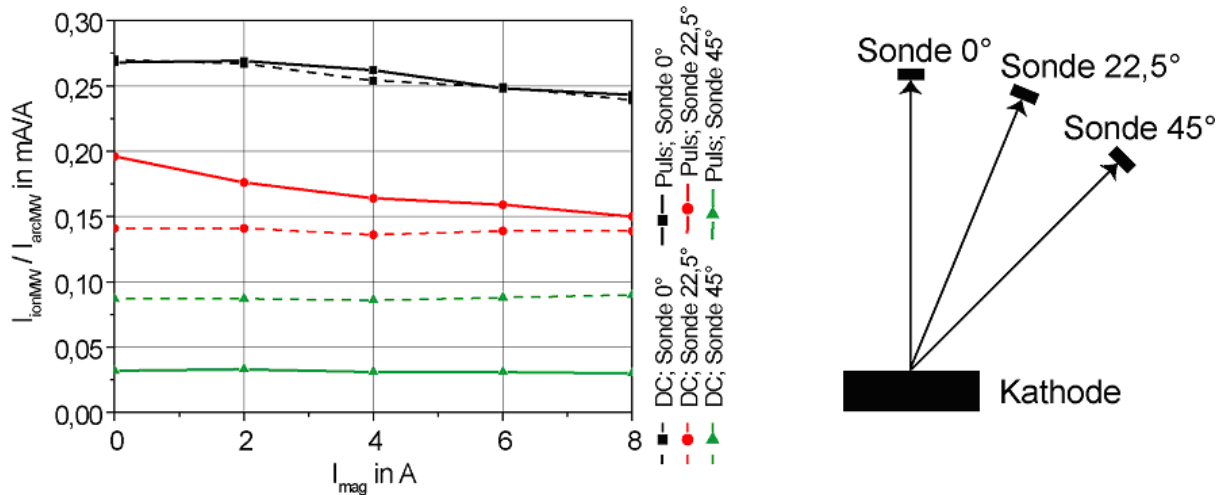


Bild 59: Mittelwert des Ionenstromes in Bezug auf den Bogenstrom für einen DC- und einen Pulsprozess bei gleichem Mittelwert des Bogenstromes ( $I_{\text{arcMW}} = 120 \text{ A}$ ) in Abhängigkeit vom Spulenstrom unter Verwendung eines Ti-Targets

Die Verwendung eines auf den Bogenstrom synchronisierten Magnetfeldes im Vergleich zu einem permanent wirkenden Magnetfeld zeigte, dass ein auf den Bogenstrom synchronisiertes Magnetfeld meist eine geringere Dropletmission zur Folge hat.

**Elektromagnetische Störemissionen von gepulsten Lichtbogen- und Widerstandsschweißanlagen**  
**(Teilprojekt 1 der DFG-Forschergruppe 417: EMV bei technologischen Prozessen mit gepulsten Leistungen)**

Kooperationen: Lehrstuhl Elektrische Netze und Alternative Elektroenergiequellen,  
 Lehrstuhl Theoretische und Allgemeine Elektrotechnik,  
 Lehrstuhl Elektromagnetische Verträglichkeit und Theoretische  
 Elektrotechnik, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg,  
 Förderung: DFG  
 Bericht: Dr.-Ing. R. Döbbelin, Dipl.-Phys. R. Herms

Moderne Schweißtechnologien finden in der Industrie breite Anwendung. Als dominierende Fügeverfahren sind dabei das Lichtbogenschweißen und das Widerstandsschweißen anzusehen. Bei beiden Verfahrensgruppen gewinnen die Varianten, die mit einer Pulsation des Leistungseintrages in den Prozess arbeiten, zunehmende Bedeutung.

Die in diesem Teilprojekt der DFG-Forschergruppe 417 durchzuführenden Untersuchungen zielen auf eine Minderung der EMV-Probleme von Lichtbogen- und Widerstandsschweißanlagen mit gepulster technologischer Last. Schwerpunkte bilden leistungsteilinterne Maßnahmen zur Minderung der geleiteten Störemission von Inverterstromquellen für das Lichtbogenschweißen, wobei auch die Realisierung der Leistungsteile in Form von resonanten Schaltungstopologien einbezogen wird. Neben Fragen der elektromagnetischen Verträglichkeit zwischen Geräten (der technischen EMV) wird auch Fragen der elektromagnetischen Verträglichkeit zur Umwelt (EMVU) zunehmende Beachtung beigemessen. Die Bediener von Widerstandsschweißeinrichtungen sind bei ihrer Tätigkeit den aus den hohen, im kA-Bereich liegenden Schweißströmen resultierenden Umgebungsmagnetfeldern ausgesetzt. Davon ausgehend werden im Rahmen des Forschungsvorhabens Finite-Elemente-Simulationen mit dem Programm ANSYS zur Analyse der sich ergebenden Feldverteilungen durchgeführt, in deren Rahmen auch der Einfluss der zu schweißenden Bauteile auf die Magnetfeldverteilung berücksichtigt wird.

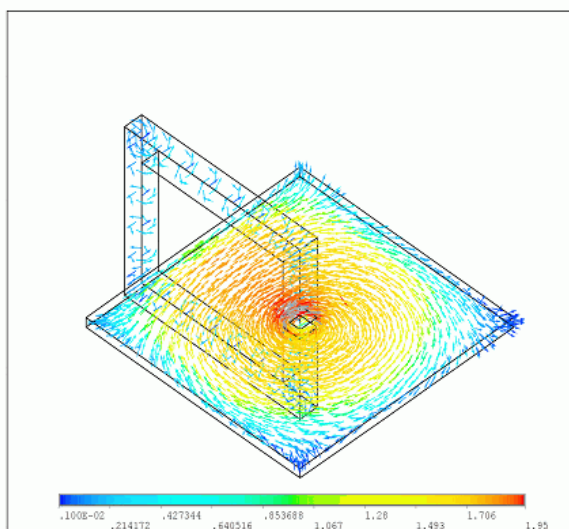


Bild 60: Feldverteilung in einem fast vollständig aufmagnetisiertem Werkstück bei 40 kA Schweißstrom (Platte: 500x500x16), simuliert

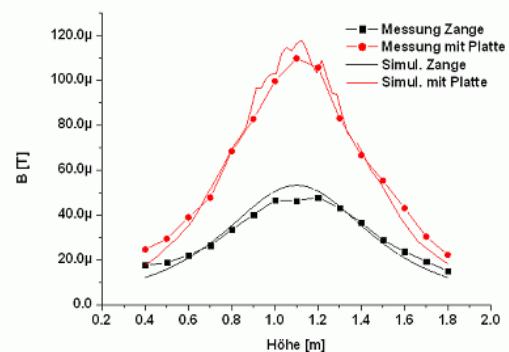


Bild 61: Flussdichteverteilung entlang der Körperachse eines Bedieners 400mm vor der Zange bei 1kA

Bei ferromagnetischem Schweißgut können sich infolge von Feldkonzentrationen im Bereich der zu schweißenden Teile lokale Feldüberhöhungen ergeben, Bild 61. In Bild 60 und Bild 62 ist das aufmagnetisierte Werkstück dargestellt. Bild 63 zeigt die B(H)-Kurve des Werkstücks.

Bild 64 zeigt einen horizontalen Schnitt durch das Schweißgut. Eine lokale Flussdichteerhöhung im Umfeld des Werkstücks veranschaulicht Bild 65. Die Feldverteilung ist über den Abstand vom Zangenmittelpunkt aufgetragen.

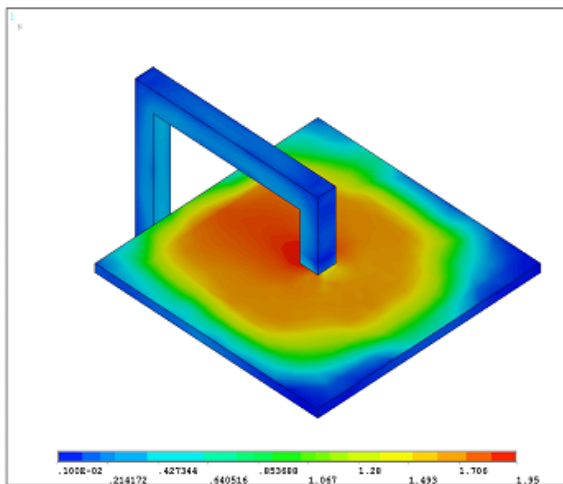


Bild 62: Feldverteilung in einem fast vollständig aufmagnetisierten Werkstück bei 40 kA Schweißstrom (Platte: 500x500x16), simuliert

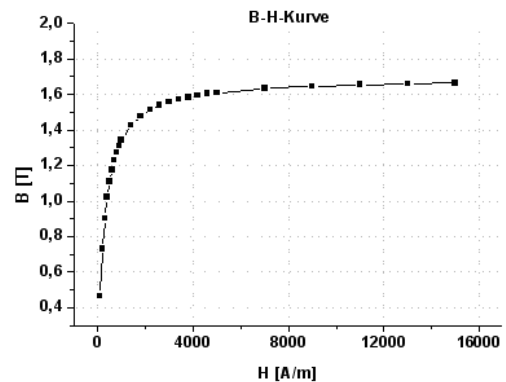


Bild 63: B-H-Kurve des Werkstücks

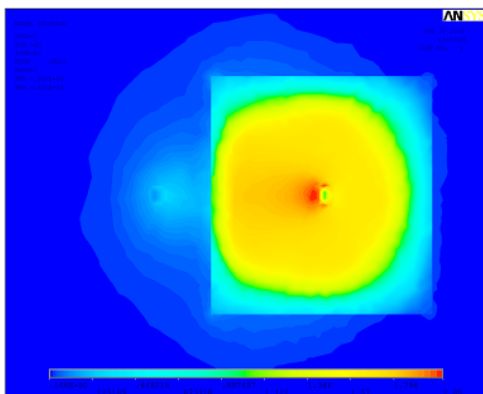


Bild 64: Feldverteilung in einem fast vollständig aufmagnetisierten Werkstück bei 40 kA Schweißstrom (Platte: 500x500x16), simuliert

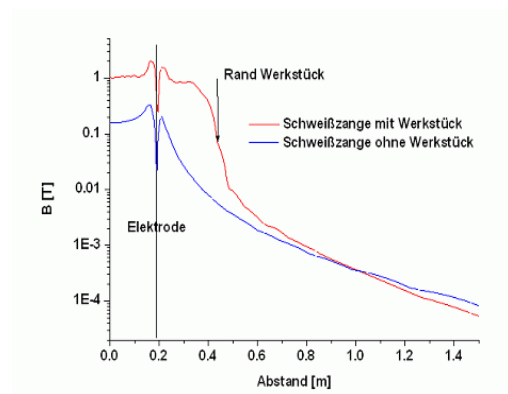


Bild 65: Flussdichtebtrag vom Zentrum der Schweißzange horizontal durch das Werkstück in Richtung des Bedieners

## Erweiterung des Anwendungsbereiches des Kondensatorimpulsschweißens

Förderung: DFG  
 Bericht: Dipl.-Ing. T. Winkler

Anlagen zum Impulsschweißen mit transformierter Kondensatorentladung werden in verschiedenen Bereichen der Fertigung zum Fügen nach dem Widerstandsschweißprinzip eingesetzt. Das Verfahren gewinnt aufgrund seiner spezifischen Vorteile, wie den sehr kurzen Schweißzeiten und der – verglichen mit anderen Leistungsteilen und bei gleicher Ausgangsstromhöhe – geringeren und gleichmäßigeren Netzbelastung, weiter an Bedeutung. Die elektrische Funktion einer Kondensatorimpulsschweißeinrichtung und ein typischer Schweißstromverlauf mit charakteristischen Kenngrößen werden im Bild 66 illustriert.

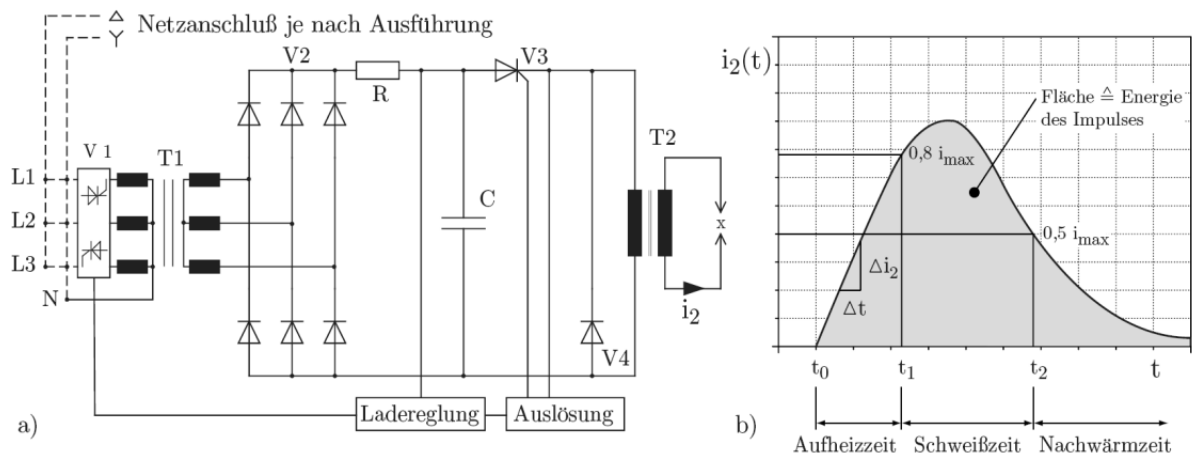


Bild 66: Prinzipschaltung einer Kondensatorimpulsschweißeinrichtung (a) und typischer Ausgangsstromverlauf (b)

Die Form des Zeitverlaufs des Ausgangsstromes der Kondensatorimpulsschweißeinrichtung wird maßgeblich vom Impulstransformator bestimmt. Dessen Wicklungsausführung (z. B. mit Unterteilung in kammer- oder scheibenförmige Sekundärwicklungen) trägt zu einer streuinduktivitätsarmen Ausführung des Transformators bei, die für das Erreichen des angestrebten Zeitverlaufs notwendig ist. Der Impulstransformator besitzt in der Regel wassergekühlte Sekundärwicklungen mit der Windungszahl 1, ggf. aus mehreren parallelgeschalteten Einzelwindungen bestehend. Der Aufbau eines Impulstransformators ist daher sehr aufwändig und bedarf einer überwiegend manuellen Fertigung, mit dementsprechend hohen Fertigungskosten.

Berechnungs- oder Dimensionierungsvorschriften für derartige Impulstransformatoren sind kaum bekannt. Zudem ist die konkrete Anpassung an die zu realisierenden Schweißaufgaben relativ kompliziert. Die dafür erforderlichen elektrischen und mechanischen Modifikationen an Impulstransformatoren werden bei den Herstellern in der Regel auch heute noch empirisch vorgenommen.

Von Wechselstromtransformatoren her bekannte Berechnungsverfahren wurden zur Verwendung für Impulstransformatoren angepasst und in ein Berechnungsprogramm implementiert. Damit wird die Berechnung der Streuinduktivitäten unterstützt. Die Ergebnisse der Streuinduktivitätsberechnung gehen in die Schaltungssimulation ein, Bild 67, Bild 68.

Das Maß der Wicklungsunterteilung hat einen entscheidenden Einfluss auf die Streu-

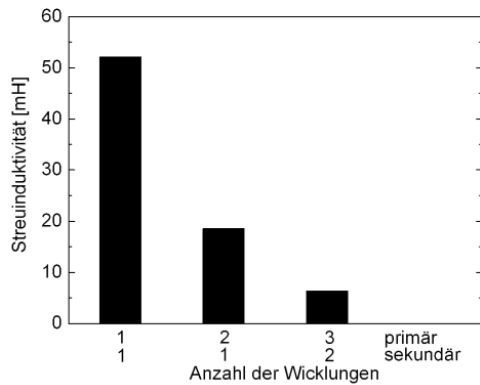


Bild 67: Streuinduktivität eines Impulstransformators in Abhängigkeit von der primären und sekundären Wicklungsunterteilung

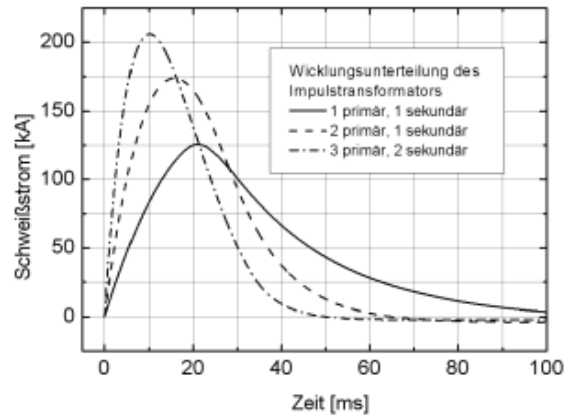


Bild 68: Einfluss der Wicklungsunterteilung auf den Ausgangsstrom

induktivität, allerdings ist zu beachten, dass durch die notwendige Verschaltung der Einzelwicklungen zusätzliche Induktivitäten entstehen. Dies und der zusätzliche Aufwand macht es erforderlich, ein Optimum der Wicklungsunterteilung zu finden.

Die Parameter des Impulstransformators sind Ausgangspunkt für die schaltungstechnische Analyse weiterer Einflussgrößen auf den Ausgangsstrom, wie Übersetzungsverhältnis, Kapazität der Kondensatoren, primärseitige und ausgangsseitige Widerstände und Induktivitäten.

Als Ergebnis des Forschungsvorhabens werden Grundlagen für eine verfahrenstechnische Erweiterung des Anwendungsbereiches des Kondensatorimpulsschweißens erwartet.

### 3.4.3 Promotionen

**Dr.-Ing. Oleksandr Sobolyev**

#### **Stromversorgungen und Prozessuntersuchungen beim Vakuumbogenbeschichtungsverfahren mit mehreren Verdampfern**

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. G. Wollenberg, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Prof. Dr. rer. nat. habil. A. Lunk, Universität Stuttgart

verteidigt am: 12.07.2005

Das Ziel der Arbeit bestand in der Erweiterung des modifizierten Puls-Arc-Verfahrens auf einen Betrieb mit mehreren unabhängigen Verdampfern. Für die experimentellen Arbeiten standen zwei industrielle Beschichtungsanlagen mit jeweils vier und sechs Verdampfern zur Verfügung. Als Katodenmaterial wurden Ti und TiAl eingesetzt.

Der erste Teil der Arbeit befasst sich mit der Auswahl eines geeigneten Schaltungskonzeptes zur effizienten Pulsstromversorgung mehrerer Verdampfer. Hierbei wurde davon ausgegangen, dass alle Verdampfer symmetrisch angesteuert werden sollen und der gesamte Beschichtungsprozess nicht von verlöschenden Lichtbögen kritisch beeinflusst werden darf. Aus dem Vergleich mehrerer Konzepte hat sich die zyklische Verteilung des von einer Quelle gelieferten Pulsstromes als besonders geeignet erwiesen. Als technische Lösung für den gleichzeitigen Betrieb von mehreren Verdampfern wurde eine Zentraleinheit mit transistorisiertem Pulsverteiler (Demultiplexer) realisiert, Bild 69.

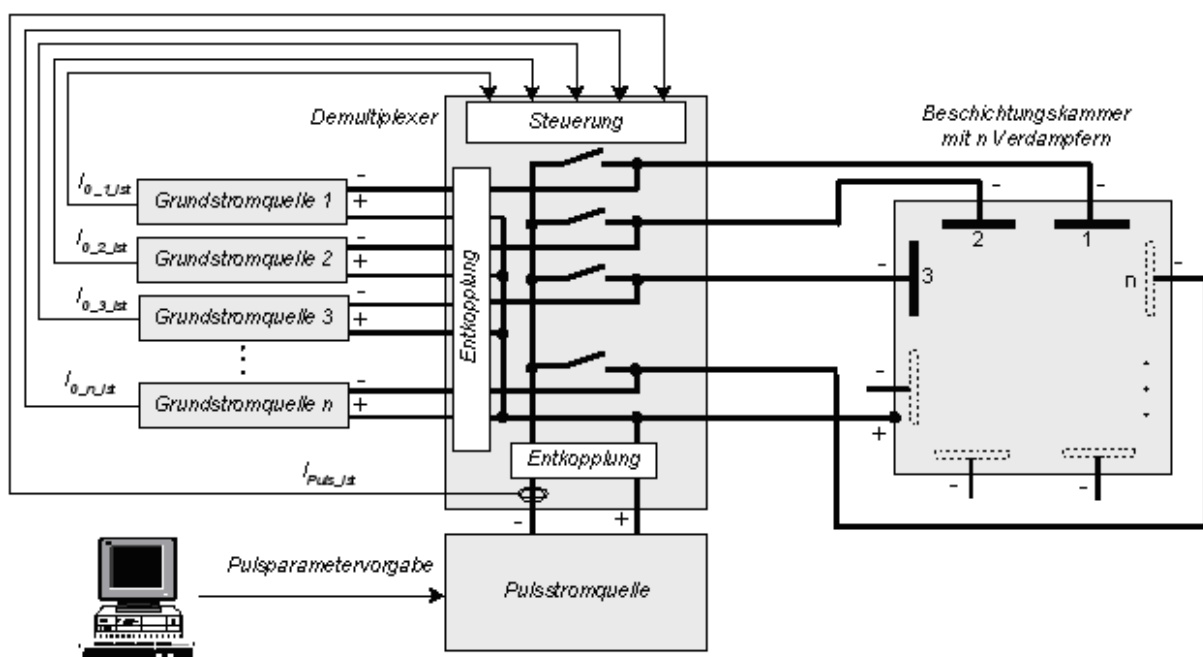


Bild 69: Blockschaltbild des Gesamtkonzeptes für Pulsstromeinspeisung mehrerer Bogenverdampfer

Im Weiteren wird ein Überblick über die notwendigen physikalischen Anforderungen an die Puls- und Grundstromquellen gegeben, die sich aus den beschichtungsprozess-technischen Vorgaben und den plasmaphysikalischen Eigenschaften des Lichtbogens ergeben.

Die Prozessuntersuchungen beinhalteten Ionenstrommessungen mit statischen und rotierenden Sonden sowie die Bestimmung der Beschichtungsrate und der Droplettemission. Als Hauptergebnis der Messungen für den statischen Betrieb wurde festgestellt, dass die Gesamtionenstromdichte kleiner ist als die Summe der partialen Ionenströme von 3 Katoden. Die Ursache dafür liegt in den energiemindernden Zusammenstößen. Diese Differenz weist



eine Abhängigkeit von der Pulsamplitude und der Pulsfrequenz auf und erreicht Werte von bis zu 25%. Die Beschichtungsversuche ergaben, dass die normierte Beschichtungsrate durch die Erhöhung des mittleren Ionenstroms beim gepulsten Prozess bis zu 2,6mal für TiN-Beschichtungen und um das 2,1-fache für TiAlN-Beschichtungen gegenüber der DC-Arc-Beschichtung ansteigt. Die erhöhte Teilchenionisation im Puls-Modus war im Zusammenhang mit einer relativ geringer Partikelproduktion die Ursache für die sehr dichte Mikrostruktur der abgeschiedenen TiAlN-Schichten.

Gegenüber konventionellen DC-Stromversorgungen bietet die für mehrere Verdampfer entwickelte Pulsstromversorgung den entscheidenden Vorteil, dass dropletarme Schichten in kürzeren Beschichtungszeiten hergestellt werden können.



*Bild 70: Am Otto-von-Guericke-Denkmal*

### 3.4.4 Veröffentlichungen

- ♦ Krykunov, O.; Merfert, I.; Lindemann, A.:  
**DC/DC-Wandler für Brennstoffzellensysteme**  
In: VDI-Gesellschaft-Energietechnik (Hrsg.): 5. Fachtagung Brennstoffzelle : industrieller Strukturwandel, BZ in der Hausenergietechnik ; Tagung, Hamburg, 19. und 20. April 2005. Düsseldorf: VDI-Verl., 2005, S. 309 - 317 (VDI-Berichte 1874)
- ♦ Merfert, I.; Krykunov, O.; Lindemann, A.:  
**High power tapped-inductor boost converter for fuel cell applications**  
In: ZM Communications GmbH (Veranst.): Power electronics intelligent motion power quality 2005 (International conference Nürnberg, Germany, June 7 - 9, 2005) - proceedings. Nürnberg: ZM Communications, 2005, S. 517 - 522 (PCIM Europe 2005)
- ♦ Mecke, R.; Rathge, C.; Ecklebe, A.; Lindemann, A.:  
**Bidirectional switches for matrix converter in contactless energy transmission systems**  
In: EPE Association (Veranst.): Power electronics and applications: EPE 2005 (11<sup>th</sup> European conference Dresden, Germany 11 - 14 September 2005). Brussels, Belgium: EPE Association, 2005, [Elektronische Ressource] (EPE 2005)
- ♦ Ecklebe, A.; Fischer, W.; Lindemann, A.:  
**Device power losses of a matrix converter for resonant loads**  
In: ZM Communications GmbH (Veranst.): Power electronics intelligent motion power quality 2005 (International conference Nürnberg, Germany, June 7 - 9, 2005) - proceedings. Nürnberg: ZM Communications, 2005, S. 640 - 645 (PCIM Europe 2005)
- ♦ Lindemann, A.:  
**Optimisation of low voltage power MOSFET components for high current applications**  
In: EPE journal : European power electronics and drives journal [Brussels] 15(2005), Nr. 3, S. 5-10
- ♦ Lindemann, A.:  
**Comparison of primary transistors in auxiliary flyback converters for driver and logic supply from mains-fed DC link**  
In: ZM Communications GmbH (Veranst.): Power electronics intelligent motion power quality 2005 (International conference Nürnberg, Germany, June 7 - 9, 2005). - proceedings. Nürnberg: ZM Communications, 2005, S. 119 - 124 (PCIM Europe 2005)
- ♦ Amro, R.; Lutz, J.; Rudzki, J.; Thoben, M.; Lindemann, A.:  
**Double-sided low-temperature joining technique for power cycling capability at high temperature.**  
In: EPE Association (Veranst.): Power electronics and applications: EPE 2005 (11<sup>th</sup> European conference Dresden, Germany 11 - 14 September 2005). Brussels, Belgium: EPE Association, 2005, [Elektronische Ressource] (EPE 2005)
- ♦ Lindemann, A.; Ecklebe, A.:  
**Optimisation of primary transistors in flyback converters with high input voltage**  
In: EPE Association (Veranst.): Power electronics and applications: EPE 2005 (11<sup>th</sup> European conference Dresden, Germany 11 - 14 September 2005). Brussels, Belgium: EPE Association, 2005, [Elektronische Ressource] (EPE 2005)

- ♦ Sobolyev, O.:  
**Stromversorgungen und Prozessuntersuchungen beim Vakuumbogenbeschichtungsverfahren mit mehreren Verdampfern**  
2005, VIII, 137 S. Magdeburg, Univ., Fak. für Elektrotechnik und Informationstechnik, Diss., 2005
- ♦ Sobolyev, O.; Fischer, W.:  
**Modifiziertes Puls-Arc-Verfahren mit mehreren unabhängigen Verdampfern**  
In: Deutsche Gesellschaft für Plasmatechnologie e.V. (Veranst.): Plasmatechnologie, BFPT 12 (12. Bundesdeutsche Fachtagung, Braunschweig 21. - 23.03.2005). Braunschweig, 2005, S. 149 - 152 (BFPT 12)
- ♦ Lindemann, A.; Fischer, W.; Sobolyev, O.; Anklam, J.; Hraby, H.; Jaeschke, B.:  
**Modifiziertes Puls-Arc-Verfahren für industrielle Beschichtungsanlagen mit mehreren unabhängigen Verdampfern (IPARC)**  
Magdeburg, 2005, [Elektronische Ressource]
- ♦ Hettkamp, E.; Mecke, H.:  
**The influence on the plasma and the coating caused through a combination of streered arc and modified pulsed arc processes**  
In: Surface and coatings technology [Amsterdam] 200(2005), S. 634-638
- ♦ Döbbelin, R.; Winkler, T.; Lindemann, A.:  
**Environmental EMC aspects of resistance welding equipment**  
In: University of Zielone Góra, Institute of Electrical Engineering (Hrsg.): Compatibility in power electronics (4<sup>th</sup> International workshop Gdynia, Poland 1-3 June 2005). Zielona Góra: Univ., 2005, S. 129 - 131 (CPE 2005) - Langfassung auf Tagungs-CD-ROM
- ♦ Mecke, H.; Döbbelin, R.; Winkler, T.:  
**Cost-effective mitigation measures concerning conducted emission of resistance welding inverters**  
In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (Veranst.); ... (Veranst.): Electromagnetic compatibility and electromagnetic ecology (6<sup>th</sup> International symposium Saint-Petersburg June, 21-24 2005). - proceedings. Piscataway, NJ: IEEE Operations Center, 2005, S. 25 - 29
- ♦ Döbbelin, R.; Winkler, T.; Winkler, R.; Gaertner, U.:  
**Verringerung der elektromagnetischen Störemissionen von Widerstandsschweißeinrichtungen durch leistungsteilinterne Maßnahmen**  
In: Schweißen und Schneiden [Düsseldorf] 57(2005), Nr. 7, S. 306 - 310; 312; 314, 316

## 3.5 Institutsebene

### 3.5.1 Kooperationen

#### Technische Universität Wroclaw (Polen)

Zwischen der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg und der Technischen Universität Wroclaw besteht eine Kooperationsvereinbarung. Ziel der Zusammenarbeit im deutsch-polnischen Jahr 2005 ist der Wissenschaftstransfer über Ländergrenzen hinweg. Im Rahmen der Kooperation findet ein regelmäßiger Austausch von Wissenschaftlern und Studenten statt. Im Jahr 2005 besuchte Herr Dr. Herlender zu Forschungszwecken unser Institut. Herr Dr. Herlender arbeitete während seines Aufenthaltes an der Vorbereitung seiner Habilitationsschrift. Weiterer Schwerpunkt der Kooperation besteht in dem gemeinsam angebotenen Doppeldiplomstudiengang für Studenten beider Universitäten.

#### Institut National Polytechnique de Grenoble (Frankreich)

Mit dem Institut National Polytechnique de Grenoble findet ein reger Austausch von Studenten und Wissenschaftlern statt. Im Jahr 2005 besuchte bereits zum zweiten Mal Frau Dipl.-Ing. Ignatova den Lehrstuhl Elektrische Netze und Alternative Elektroenergiequellen im Rahmen eines dreimonatigem Auslandsaufenthaltes. Frau Ignatova ist PhD-Studentin an dem Institut National Polytechnique de Grenoble und beschäftigt sich mit ausgewählten Problemen zur Spannungsqualität der öffentlichen Versorgung. In diesem Themengebiet nutzt Sie intensiv die Möglichkeiten in unserem Power Quality Labor.

#### Virginia Polytechnic Institute and State University (USA)

Im Rahmen der Kooperation mit der Virginia Polytechnic Institute and State University (USA) besuchte Prof. Phadke unsere Universität und hielt hier zwei Gastvorlesungen (vgl. Gastdozenten). Herr Prof. Phadke ist ein ausgewiesener Experte auf dem Gebiet der Hochspannungsnetzschutztechnik und maßgeblich an der Entwicklung moderner Schutz- und Filteralgorithmen beteiligt. In diesem Zusammenhang betreute er als Gutachter die Promotion von Frau Dr. Hadzi-Kostova am Lehrstuhl Elektrische Netze und Alternative Elektroenergiequellen. In Zukunft wird ein intensiver Austausch wissenschaftlicher Assistenten mit der Virginia Polytechnic Institute and State University stattfinden.



*Bild 71: Prof. Phadke während seines Magdeburg-Aufenthalts mit Prof. Styczynski (v.l)*

### 3.5.2 Kolloquien

#### Beiträge:

- ♦ Fischer, W.:  
**Simulation in der Lehre und/oder Simulation lehren?**  
IEEE Joint IAS/PELS/IES German Chapter, Wuppertal, 8. April 2005
- ♦ Heideck, G.; Haubrock, J.:  
**Steuerungskonzept für ein autonomes Brennstoffzellensystem**  
Fachkolloquium „Dresdner Kreis“, Duisburg, 04. bis 05.04.2005
- ♦ Angelov, A.:  
**Entwicklung und Realisierung einer webbasierten Lehrveranstaltung im Fach „Alternative Energiequellen“**  
Fachkolloquium „Dresdner Kreis“, Duisburg, 04. bis 05.04.2005
- ♦ Ecklebe, A.:  
**Saber-Simulink/Stateflow Co-Simulation of a Resonant Matrix Converter**  
Synopsis User Group Meeting (SNUG), München, 03. bis 04.05.2005
- ♦ Parol, M.:  
**Electricity consumption short-term forecasting on the distribution level with the use of artificial neural network**  
Magdeburg, 19.05.2005
- ♦ Parol, M.:  
**Optimisation of 110 kV electric power sub-transmission multi-meshed network configurations by means of adaptive evolutionary techniques**  
Magdeburg, 20.05.2005
- ♦ Krykunov, O.:  
**Hochsetzsteller für ein 5-kW-Brennstoffzellensystem**  
Doktorandenkolloquium „Leistungselektronik Nord“, Hannover, 24.05.2005
- ♦ Hettkamp, E.:  
**Das modifizierte Puls-Arc-Verfahren - Grundlagen und Möglichkeiten der Prozessbeeinflussung**  
Doktorandenkolloquium „Leistungselektronik Nord“, Hannover, 24.05.2005
- ♦ Döbbelin, R.:  
**Environmental magnetic fields of resistance welding equipment**  
58<sup>th</sup> Annual Assembly and International Conference of International Institute of Welding (IIW), Commission VIII (Health and Safety), Prag, 09. bis 15.07.2005
- ♦ Ecklebe, A.; Lindemann, A.:  
**Schaltverhalten höhersperrender Transistoren bei geringen Strömen in Gleichspannungswandlern**  
34. Kolloquium Halbleiter-Leistungsbaulemente und ihre systemtechnische Anwendung, Freiburg i. Br., 24. bis 25.10.2005

- ♦ Rudzki, J.; Sittig, R.; Amro, R.; Lutz, J.; Thoben, M.; Lindemann, A.:  
**Zuverlässigkeitsuntersuchungen von leistungselektronischen Testmodulen mit beidseitigen NTV-Kontakten**  
34. Kolloquium Halbleiter-Leistungsbaulemente und ihre systemtechnische Anwendung  
Freiburg i. Br., 24. bis 25.10.2005
- ♦ Dzienis, C.:  
**Nonlinearity by PQ modeling and simulation**  
PhD Colloquium, Magdeburg, 25.10.2005
- ♦ Haubrock, J.:  
**Brennstoffzellen**  
PhD Colloquium, Magdeburg, 25.10.2005
- ♦ Phadke, G.:  
**Weitbereichsmessung in elektrischen Hochspannungsnetzen**  
Magdeburg, 25.10. 2005
- ♦ Lindemann, A.:  
**Einfluss dezentraler Energieerzeuger auf die Power Quality**  
Seminar im Rahmen des EU-Weiterbildungsprogramms LPQIVES mit internationaler  
Zertifizierungsmöglichkeit.  
Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung, Magdeburg, 07. bis 08.11.2005
- ♦ Döbbelin, R.:  
**Umgebungsmagnetfelder von Widerstandsschweißeinrichtungen**  
Vortrag auf der Sitzung der Arbeitsgruppe FA Q 6 „Arbeitssicherheit und Umweltschutz“  
des DVS, Düsseldorf, 15.11.2005
- ♦ Winkler, T.:  
**Magnetfeldemissionen von Widerstands-Schweißeinrichtungen**  
Doktorandenkolloquium „Leistungselektronik Nord“, Magdeburg, 16.11.2005
- ♦ Förster, S.:  
**Thermische Untersuchungen an isolierten leistungselektronischen Aufbauten**  
Doktorandenkolloquium „Leistungselektronik Nord“, Magdeburg, 16.11.2005

#### Ausrichtung folgender Veranstaltungen:

- ♦ 37. Sitzung der Arbeitsgruppe AG V 3.6 „Messen und Prozessregelung“ des Deutschen  
Verbandes für Schweißen und verwandte Verfahren (DVS),  
08. bis 09.11.2005
- ♦ Doktorandenkolloquium „Leistungselektronik Nord“, 16.11.2005,  
Veranstaltung der entsprechenden Lehrstühle der
  - Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
  - Helmut-Schmidt-Universität der Bundeswehr Hamburg
  - Universität Bremen
  - Universität Hannover
  - Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

### Projekttreffen:

- ♦ Seminar mit Herrn Prof. Dr.-Ing. O. Ruhle (Siemens)  
18.01.2005
- ♦ Treffen mit Herrn Dr. J. Kazachkov (USA) bei Siemens, Erlangen zum Thema  
„Windturbinenmodellierung“  
31.01.2005
- ♦ Seminar mit Herrn Dr. R. Krebs (Siemens)  
01.02.2005

### Arbeitskreise:

#### **Dresdener Kreis „Elektroenergieversorgung 6“**

Im April 2005 nahm der Lehrstuhl Elektrische Netze und Alternative Elektroenergiequellen am jährlichen Treffen des Dresdener Kreises in Duisburg teil. Beim diesjährigen Treffen waren die Universitäten Dresden, Hannover, Duisburg-Essen, Magdeburg und das Fraunhofer Institut Magdeburg, sowie Industriepartner der Areva Schorch GmbH vertreten. Von unserem Institut haben Prof. Dr.-Ing. Z. A. Styczynski, Dipl.-Ing G. Heideck, Dipl.-Ing. C. Dzienis, M. Sc. A. Angelov und M. Sc. J. Haubrock an dem Treffen teilgenommen. Von Seiten des Lehrstuhls LENA wurden die Aktivitäten im Bereich der Brennstoffzellenforschung und der Nutzung von E-Learning im Rahmen eines Fachkolloquiums vorgestellt. Die Veranstaltung ist von einem attraktiven Ergänzungsprogramm umrahmt worden. Unter anderem wurde das Transformatorenwerk der Areva-Schorch GmbH bei Mönchengladbach besichtigt. Die wissenschaftlichen Ergebnisse des Treffens sind in einem Sonderheft „Dresdner Kreis Elektroenergieversorgung 6“ nachzulesen.

#### **Treffen der Interessengemeinschaft „Batterien in Netzen IBN e.V.“**

Halbjährlich trifft sich die Interessengemeinschaft „Batterien in Netzen IBN e.V.“ zum Erfahrungsaustausch im Rahmen eines Kolloquiums. Das erste Treffen fand am 24. Februar 2005 statt. Veranstaltet hatte das Treffen das ZSW in Ulm. Als Teilnehmer des Lehrstuhls Elektrische Netze und Alternative Elektroenergiequellen nahm Herr M. Sc. Haubrock am Treffen in Ulm teil. Herr Haubrock stellte das unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Z. A. Styczynski herausgegebene Buch „Modern System Application of the Modern Battery Storage“ den Teilnehmern des IBN Treffens vor. Das Buch kann direkt beim Herausgeber bezogen werden:

Edmund Hanschin, Zbigniew A. Styczynski:

#### **Modern System Application of the Modern Battery Storage**

Magdeburger Forum zur Elektrotechnik, Band 8, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Magdeburg 2004, ISBN: 3-929757-75-3

Bestellungen bitte an: melanie.baumgarten@et.uni-magdeburg.de

Das zweite Treffen des IBN e.V. fand am 10. Oktober 2005 in Büdigen bei der Firma Exide (Sonnenschein) statt. Zusätzlich zu den Mitgliedern des IBN e.V. nahmen an diesem Treffen auch internationale Gäste, vor allem aus den USA, teil. Im Rahmen des Kolloquiums hielt Herr M. Sc. Haubrock als Vertreter von Prof. Dr.-Ing. Z. A. Styczynski einen Vortrag zum Thema „Uninterruptible Power Supply (UPS) as Application for PEM Fuel Cells“.