

**LEHRSTUHL FÜR ELEKTRISCHE ENERGIEVERSORGUNG**

**UNIVERSITÄT DORTMUND**

**UNIV.-PROF. DR.-ING. E. HANDSCHIN**



**JAHRESBERICHT 1998**

Herausgegeben vom

LEHRSTUHL FÜR ELEKTRISCHE ENERGIEVERSORGUNG

UNIVERSITÄT DORTMUND

UNIV. PROF. DR.-ING. E. HANDSCHIN

44221 Dortmund

Telefon: (0231) 755-2396

Telefax: (0231) 755-2694

E-Mail: [handschin@ev.e-technik.uni-dortmund.de](mailto:handschin@ev.e-technik.uni-dortmund.de)

REDAKTION: Dipl.-Ing. D. König, Dipl.-Ing. C. Lehmköster, Dipl.-Ing. J. Teupen

## **Vorwort**

Zum fünfundzwanzigsten Mal möchte ich Ihnen heute den Jahresbericht des Lehrstuhls für Elektrische Energieversorgung vorlegen. Eine solche Jubiläumsausgabe ist Grund genug, einmal mehr den Blick zurück schweifen zu lassen und dabei über die Arbeiten des vergangenen Jahres zu berichten. Die großen Veränderungen auf dem Gebiet der Energietechnik führen zu einem tiefgreifenden Paradigmenwechsel, der natürlich auch große Auswirkungen auf die universitären Arbeiten in Forschung und Lehre hat. Dabei wächst die Bedeutung der energiewirtschaftlichen Untersuchungen, da technische Innovationen unter den wirtschaftlichen Rahmenbedingungen geprüft werden müssen. Rationelle Energieanwendung und ein optimales Energiemanagement setzen leistungsfähige Modelle und komplexe Optimierungsverfahren voraus. Kombiniert mit wissenschaftlichen Methoden (Computational Intelligence) ergeben sich neue Lösungsansätze, die die zahlreichen Anforderungen der Praxis erfüllen können. Neben den eigenen Forschungsarbeiten an der Universität Dortmund ist die Pflege internationaler Kontakte sehr wichtig, damit auch in der Ausbildung die sich immer stärker ausprägende Globalisierung berücksichtigt werden kann. Das von der EU geförderte ALFA-Programm der Graduierten-Ausbildung auf dem Gebiet der Deregulierung ist ein gutes Beispiel für eine erfolgreiche und nachhaltige Zusammenarbeit mit europäischen und südamerikanischen Universitäten.

Diese kleine Zusammenfassung möchte ich mit meinem Dank an alle unsere Partner verbinden, die uns in den vergangenen Jahren begleitet und unterstützt haben. Dank dieser vertrauensvollen und guten Zusammenarbeit konnte manches auf den Weg gebracht und erfolgreich bearbeitet werden. Deshalb richten wir unsere Aufmerksamkeit auf die Zukunft. Wir werden unsere Anstrengungen gemeinsam darauf ausrichten, daß sich wieder mehr Studienanfänger dem ingenieurwissenschaftlichen Studium zuwenden. Vielleicht vermag auch der vorliegende Jahresbericht einiges an Information in dieser Richtung vermitteln. Interessante und anspruchsvolle Themen sind die beste Voraussetzung, um das Interesse junger Menschen an der Technik erneut zu wecken und so die großen Herausforderungen der Zukunft erfolgreich gestalten zu können.

**E. Handschin**

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Personal .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Kooperation mit anderen Forschungseinrichtungen.....</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Lehrbetrieb.....</b>	<b>6</b>
	3.1 Vorlesungen .....	6
	3.2 Seminare .....	7
	3.3 Praktika .....	8
	3.4 Projektgruppen.....	9
	3.5 Exkursionen.....	10
<b>4</b>	<b>Forschungs- und Entwicklungsarbeiten.....</b>	<b>11</b>
	4.1 Informationstechnische Verfahren für die Planung und Betriebsführung elektrischer Energieversorgungssysteme .....	11
	4.2 Modellierung und Simulation statischer und dynamischer Vorgänge in elektrischen Energieversorgungssystemen.....	28
	4.3 Schutz- und Leittechnik.....	41
<b>5</b>	<b>Vorträge .....</b>	<b>49</b>
	5.1 Beiträge für das Kolloquium.....	49
	5.2 Vorträge von Lehrstuhlmitgliedern.....	50
<b>6</b>	<b>Veröffentlichungen .....</b>	<b>52</b>
	6.1 Veröffentlichungen.....	52
	6.2 Forschungsberichte.....	56
	6.3 Diplomarbeiten .....	57
	6.4 Studienarbeiten .....	58
<b>7</b>	<b>Promotionen.....</b>	<b>59</b>

# 1 Personal

Lehrstuhlinhaber:	Univ. Prof. Dr.-Ing. E. Handschin		
Sekretariat:	Frau I. Gasthaus		
Lehrbeauftragte:	Prof. Dr.-Ing. H.-C. Müller (VEW Energie AG) Dr.-Ing. K. Albers (VEW Energie AG) Dr.-Ing. P. Stelzner (VEW Energie AG) Dr.-Ing. G. Traeder (VEW Energie AG)		
Akademische Gäste:	Dr.-Ing. Y. Wang, Tsinghua University, Beijing, China Dipl.-Ing. R. Palma Behnke, Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile Dipl.-Ing. A. Sarasua, Universidad Nacional de San Juan, Argentinien		
Wiss. Mitarbeiter:	Dipl.-Ing. D. König Dipl.-Ing. C. Becker                      Dipl.-Ing. A. Koel Dipl.-Ing. D. Kuhlmann                Dipl.-Ing. C. Leder Dipl.-Ing. C. Lehmköster              Dipl.-Ing. L. Neuhaus Dipl.-Ing. T. Nikodem                 Dr.-Ing. C. Rehtanz Dipl.-Ing. J. Teupen                    Dipl.-Ing. Th. Wiesner		
Technische Mitarbeiter:	Frau H. Giersberg                      Dipl.-Ing. W. Horenkamp Frau R. Meier                            Herr K.-D. Tesch		
Studentische Hilfskräfte:	J. Brosda	B. Fresen	C. Fricke
	J. M. Gomoluch	M. Gravermann	J.-M. Hindemitt
	Th. Iborg	M. Schmale	N. Schnurr
	R. Schröter	M. Schubert	S. Tesch
	D. Ujcic	F. Uphaus	P. Vogel
	L. Wlecke		

## **2 Kooperation mit anderen Forschungseinrichtungen**

*Zentrum für innovative Energieumwandlung*

*und -speicherung E.U.S. GmbH*

*Munscheidstr. 14*

*45886 Gelsenkirchen*

Die im Jahr 1994 gegründete Forschungsgesellschaft E.U.S. GmbH bearbeitet Aufgaben im Zusammenhang mit der Planung und dem Betrieb von elektrischen Energieanlagen insbesondere bzgl. verteilter Energieumwandlungs- und Energiespeicheranlagen. Die Partner der Gesellschaft sind Energieversorgungsunternehmen sowie Planer, Hersteller und Betreiber elektrischer Energieanlagen. Ein wichtiger Aspekt der Arbeit des Zentrums ist die Verknüpfung der Ergebnisse aus Forschung und Entwicklung verschiedener Universitäten und wissenschaftlicher Institute mit der Betriebserfahrung und dem Wissen namhafter Unternehmen.

*Zentrum für Beratungssysteme in der Technik, Dortmund e.V. ZEDO*

*Joseph-von-Fraunhofer-Str. 20*

*44227 Dortmund*

Es ist eine satzungsgemäße Aufgabe des ZEDO (Zentrum für Beratungssysteme in der Technik, Dortmund e.V.), Forschungs- und Entwicklungsvorhaben auf dem Gebiet neuer Techniken der Informationsverarbeitung zu fördern und den Transfer entsprechender Forschungsergebnisse in betriebliche Anwendungen sicherzustellen. In diesem Sinne unterstützt ZEDO aktiv verschiedene der am Lehrstuhl für Elektrische Energieversorgung bearbeiteten Forschungsvorhaben. Unter den von ZEDO aktuell bearbeiteten Entwicklungsprojekten sind zudem mehrere, die auf Forschungsergebnissen des Lehrstuhls für Elektrische Energieversorgung basieren.

*Siberian Energy Institute SEI*

*Russian Academy of Sciences*

*Lermontov Street 130*

*Irkutsk, 664033, Russia*

Mit dem SEI verbindet den Lehrstuhl für Elektrische Energieversorgung seit Jahren eine intensive Zusammenarbeit und ein reger wissenschaftlicher Austausch. Forschungsschwerpunkte stellen Untersuchungen zur Verwendung neuer Informationsverarbeitungstechnologien und Untersuchungen zum Einsatz von SMES in Energieversorgungsnetzen dar. Im Berichtszeitraum durften wir Herrn Prof. N. I. Voropai vom 09.11.-16.11.1998, Frau Dr. G. Fedotova und Frau Dr. I. Kolossok vom 09.11.-07.12.1998 als akademische Gäste am Lehrstuhl begrüßen.

*Universidad Politécnica de Valencia*  
*Prof. Dr.-Ing. C. Alvarez*  
*Camino de Vera N° 14*  
*Valencia 46071, Spain*

*Universidade Federal de Santa Catarina*  
*Prof. Dr.-Ing. M. Morozowski*  
*Campus Universitario/TRINDADE, C.P. 476*  
*Florianopolis - SC. 88040-900, Brasil*

*The Imperial College of Science,*  
*Technology and Medicine*  
*Dr.-Ing. A. Coonick*  
*Exhibition Road*  
*London SW7 2BT, UK*

*Pontificia Universidad Católica de Chile*  
*Prof. Dr.-Ing. H. Rudnick*  
*Department of Electrical Engineering*  
*Casilla 306, Correo 22*  
*Santiago, Chile*

*Universidad Nacional de La Plata*  
*Prof. -Ing. J. Riubrugent*  
*Calles 48 y 116*  
*1900 La Plata, Argentina*

Im Rahmen des ALFA-Programms der Europäischen Union ist der Lehrstuhl für Elektrische Energieversorgung Koordinator des Projektes "Cooperation in Energy System Research". ALFA ist die Abkürzung für "Amérique Latine - Formation Académique" und fördert die wissenschaftliche und akademische Zusammenarbeit von Hochschulinstitutionen aus Lateinamerika und Mitgliedsstaaten der Europäischen Union. Zielsetzung des Programms ist die Bildung von Kooperationsnetzwerken zur Durchführung gemeinsamer Forschungsaktivitäten sowie zum Austausch von 10 Studenten und Doktoranden. Im aktuellen Projektabschnitt wird ein Austauschprogramm für Doktoranden des Fachbereiches Elektrotechnik mit Schwerpunkt Energietechnik vorbereitet, das im Januar 1999 beginnen wird und zwei Jahre dauert. Diese Aktivitäten sind eng gekoppelt mit der Planung gemeinsamer Forschungsaktivitäten zu der Thematik der Umstrukturierung von Energieversorgungssystemen zur Förderung des Wettbewerbs. Zur dieser Thematik betreibt der Lehrstuhl für Elektrische Energieversorgung eine Datenbank zur Planung wettbewerbsorientierter Energieversorgungssysteme im Internet. Sie ist unter der Adresse <http://evpara.e-technik.uni-dortmund.de/> zu finden.

Mit der Universidad Politécnica de Valencia besteht über das ALFA-Projekt hinaus eine enge Zusammenarbeit im Rahmen des DAAD-Austauschprogramms „Acciones Integradas Hispano-Alemanas“. Im Mai 1998 war Herr Professor Carlos Alvarez durch Förderung des DAAD Gast am LS-EV. Während seines Aufenthaltes referierte Herr Professor Alvarez über den Energiesektor in Spanien und die zukünftigen Entwicklungen dieses Sektors.

Gefördert durch die Stiftung „Dortmunder-Gambrinus-Fellowships“ konnte Herr Professor Rudnick als akademischen Gast im Juni 1998 an der Universität Dortmund begrüßt werden. Während seines Aufenthaltes referierte Herr Professor Rudnick über den Deregulierungsprozeß des Energieversorgungssektor in Lateinamerika.

*Technische Universität Wroclaw TUW  
Elektrotechnische Fakultät  
Wybrzeze Wyspianskiego 27  
50-370 Wroclaw, Polen*

*Instytut Automatyki Systemow  
Energetycznych IASE  
ul. Wystawowa 1  
51-618 Wroclaw, Polen*

Nach der gemeinsamen Bearbeitung eines von der EU geförderten Projektes im Bereich innovativer Informationsverarbeitungstechnologien findet weiterhin ein intensiver Informationsaustausch zwischen IASE, TUW und dem Lehrstuhl auf den Gebieten von FACTS als auch der Lehre statt.

*Silesian Technical University of Gliwice  
Institute of Power Systems and Control  
Ul. B. Krzywoustego 2  
44-100 Gliwice, Polen*

Mit dem Institut von Prof. Dr. W. Winkler verbindet den Lehrstuhl eine freundschaftliche Beziehung, die durch einen regen Austausch zum Ausdruck kommt. Im Berichtszeitraum besuchte Herr Prof. Winkler den Lehrstuhl, um das Korreferat über die Promotionsarbeit eines Lehrstuhlmitgliedes zu übernehmen.

*Intelligent Power System Center (IPSC)  
Electrical Engineering and Science Research Institute  
Seoul National University  
San 56-1, Sinlim-Dong, Kwanak-Ku  
Seoul 151-742, Korea*

Mit dem Institut von Prof. Jong-Keun Park verbindet den Lehrstuhl eine auf einem Kooperationsvertrag basierende Beziehung, die durch regen Austausch zum Ausdruck kommt. Gegenstand dieses Vertrages ist ein Austausch von Erfahrungen und Ergebnissen in Lehre und Forschung auf verschiedenen Gebieten der elektrischen Energieversorgung. Im Berichtszeitraum arbeitete Herr cand.-ing. J. Brosda vom 18.05.98 bis zum 31.07.98 an seiner Diplomarbeit im IPSC. Weiterhin besuchten Herr Prof. J.-K. Park und Herr Y.-E. Park den Lehrstuhl, wobei Herr Y.-E. Park einen Teil seiner master degree thesis am

Lehrstuhl schrieb. Für diese Zusammenarbeit wird durch den Deutschen Akademischen Austauschdienst (DAAD) gefördert.

## **3 Lehrbetrieb**

### **3.1 Vorlesungen**

#### **Elektrische Energietechnik I (WS)**

*Prof. Dr.-Ing. E. Handschin*

Obligatorische Vorlesung für alle Studenten der Fakultät Elektrotechnik im 5. Semester.

Inhalt: Drehstrom-Systeme; Elemente der elektrischen Energieversorgung; Betriebsverhalten; Kraftwerkstechnik.

#### **Elektrische Energietechnik II (SS)**

*Prof. Dr.-Ing. E. Handschin*

Obligatorische Vorlesung für alle Studenten der Fakultät Elektrotechnik im 6. Semester.

Inhalt: Berechnung elektrischer Energieversorgungssysteme im stationären und dynamischen Zustand; Schutztechnik; Wirtschaftlichkeit.

#### **Energieübertragungssysteme I (WS)**

*Prof. Dr.-Ing. E. Handschin*

Wahlpflichtvorlesung für Studenten der Fachrichtung Energietechnik im 7. Semester.

Inhalt: Stationäre Netzberechnung; Sensitivitätsanalyse; Kurzschlußberechnung für symmetrische und unsymmetrische Fehler; Optimierung; State Estimation.

#### **Energieübertragungssysteme II (SS)**

*Prof. Dr.-Ing. E. Handschin*

Wahlpflichtvorlesung für Studenten der Fachrichtung Energietechnik im 8. Semester.

Inhalt: Dynamisches Netzverhalten; Netzregelung; statische und dynamische Stabilität.

#### **Elektrizitätswirtschaft (SS)**

*Prof. Dr.-Ing. E. Handschin*

Wahlpflichtvorlesung für Studenten der Fachrichtung Energietechnik im 8. Semester.

Inhalt: Verbundsysteme; Liberalisierung Optimierung; Wirtschaftlichkeitsrechnung; Laststeuerung; Bezugsüberwachung; Instandhaltung.

#### **Energieversorgung (WS)**

*Prof. Dr.-Ing. H.C. Müller / Dr.-Ing. G. Traeder*

Wahlpflichtvorlesung für Studenten der Fachrichtung Energietechnik im 7. Semester.

Inhalt: Planung von Nieder-, Mittel und Hochspannungsnetzen; technische Bewertung; Wirtschaftlichkeit.

### **Verfahren der Computational Intelligence in der elektrischen Energieversorgung**

(WS)

*Dr.-Ing. C. Rehtanz*

Wahlpflichtvorlesung mit intensiven Rechnerübungen für Studenten der Fachrichtung Energietechnik im 7. Semester.

Inhalt: Künstliche Neuronale Netze, Evolutionäre Strategien, Genetische Algorithmen, Fuzzy-Theorie, Expertensysteme, Evidenztheorie.

### **Aufbau und Netzbetrieb von Windkraftanlagen (SS)**

*Dr.-Ing. C. Rehtanz*

Wahlpflichtvorlesung für Studenten der Fachrichtung Energietechnik im 8. Semester.

Inhalt: Energiewandlung, Strömungsprozesse, Bauarten (Generatoren, Umrichtersysteme), Einsatzfelder, Netzanschluß, Netzurückwirkungen, Wirtschaftlichkeit.

### **Netzleittechnik (SS)**

*Dr.-Ing. K. Albers / Dr.-Ing. P. Stelzner*

Wahlpflichtvorlesung für Studenten der Elektrotechnik im 7. Semester und Studenten der Informatik mit Nebenfach Elektrotechnik.

Inhalt: Netzanalyse; Kraftwerksführung; Spannungs-Blindleistungsoptimierung; Mensch-Maschine-Kommunikation; Realisierung und Betrieb von komplexen Netzleitsystemen; Trainingssimulation.

## **3.2 Seminare**

### **Innovative Energieversorgung (SS)**

*Dr.-Ing. C. Rehtanz*

Inhalt: Gesamtwirtschaftliche Beurteilung von CO<sub>2</sub>-Minderungsstrategien; Nutzen und Technologien innovativer Systeme der Energieversorgung; Speichertechnologien; Energietechnische Integration diskontinuierlicher Einspeiseanlagen; Technologie ausgewählter Komponenten.

### **Regenerative Energien und neue Energieversorgungssysteme (WS)**

*Dr.-Ing. C. Rehtanz*

Dieses Seminar wurde interdisziplinär mit dem Lehrstuhl für Energieprozeßtechnik der Chemietechnik von Prof. Dr.-Ing. K. durchgeführt.

Inhalt: Strukturen liberalisierter Energiemärkte; Energiemanagement; Rationelle Energiewandlung und -verwendung; Solarthermische und photovoltaische Energietechnik; Dezentrale Energieversorgung; Speichertechnologien; Netzanbindung

### 3.3 Praktika

Im Rahmen des von allen Lehrstühlen und Arbeitsgebieten der Fakultät Elektrotechnik gemeinsam organisierten Pflicht- und Wahlpraktikums während des Studiums werden vom Lehrstuhl für Elektrische Energieversorgung folgende Versuche angeboten:

**Messung von Energie und Leistung:** Behandlung verschiedener Meßverfahren für die ein- und dreiphasige Messung von Energie und Leistung bei symmetrischer und unsymmetrischer Belastung.

**Simulation elektromagnetischer Ausgleichsvorgänge:** Schaltvorgänge in Netzwerken mit Energiespeicher, Simulation von Schalthandlungen im realen Netz, Numerische Integrationsverfahren.

**Regelung von Wirk- und Blindleistung:** Symmetrische Komponenten in asymmetrischen Netzen, Beeinflussung von Wirk- und Blindleistungsflüssen mit Längs- und Querregeltransformatoren, Messung von Wirk- und Blindleistung an einem Dreiphasennetzmodell bei symmetrischer Belastung.

**Planung elektrischer Energieversorgungssysteme:** Planung eines Energieversorgungsnetzes bei vorgegebener Lage von Verbrauchern und Kraftwerken unter Einhaltung umfangreicher Randbedingungen. Überprüfung der gewählten Struktur durch Lastflußberechnung. Simulation einer Einfachstörung.

**Simulation von Lastverteileraufgaben:** Planung des Blockeinsatzes eines Kraftwerksparks unter Berücksichtigung von technischen und wirtschaftlichen Randbedingungen und einer vorgegebenen Lastprognose. Simulation der Schalthandlungen in der Lastverteilung mit Reaktion auf unvorhergesehene stochastische Ereignisse.

**Dynamische Simulation eines Energieversorgungssystems:** Die grundsätzlichen dynamischen Vorgänge, die mit der Wiederherstellung des Gleichgewichts zwischen Erzeugung und Verbrauch nach einer Störung verknüpft sind und insbesondere nach Ausfall einer Kraftwerkseinspeisung ablaufen, werden aufgezeigt. Sowohl lineare als auch nichtlineare Modelle für Kraftwerke und Netz werden dabei im Mittelzeitbereich mittels digitaler Simulation untersucht.

### 3.4 Projektgruppen

Zur Förderung der Teamarbeit wird die Mitarbeit in Projektgruppen empfohlen. In diesem Berichtszeitraum wurden folgende Projektgruppen angeboten:

**Überprüfung der Anwendbarkeit neuronaler Netze zur Bestimmung des optimalen Schaltzustandes eines Energieübertragungssystems:** Die Deregulierung der Energiemärkte macht eine Erschließung maximaler Einsparpotentiale in der Energieerzeugung und -übertragung durch die Energieversorgungsunternehmen notwendig, um im sich einstellenden Wettbewerb eine ideale Ausgangsposition zu erlangen. Eine Möglichkeit einer Reduzierung der Übertragungskosten stellt sich in der Ermittlung eines optimalen Schaltzustandes des Übertragungsnetzes dar. Mit Hinblick auf die sich nur langsam ändernde Topologie eines Übertragungsnetzes scheint das Training eines neuronalen Netzes geeignet zu sein, diese Optimierung vorzunehmen. In der Arbeit sollen die verschiedenen Arten künstlicher neuronaler Netze sowie der Kohonen-Karte mit Hinblick auf ihre Anwendbarkeit für das vorgestellte Optimierungsproblem untersucht werden.

**Energiebilanz eines typischen Universitätsgebäudes:** Im Rahmen des interdisziplinären Studienprojekts "Nachhaltige UniDo" ist für das Physikgebäude P1 eine Energiebilanz im Hinblick auf das technische und benutzerorientierte Energieeinsparpotential aufzustellen. Ein wesentlicher Teil der Energiebilanz ist, neben der Heizenergie, der Verbrauch an elektrischer Energie. Die verbrauchte elektrische Energie soll durch Messungen an verschiedenen Abgängen ermittelt werden. Auf der Grundlage der ermittelten Ergebnisse soll ein Energiesparkonzept für das Physikgebäude P1 entwickelt werden. Diese Projektgruppe wird in Zusammenarbeit mit den Fakultäten Bauwesen, Raumplanung und Statistik durchgeführt.

**Elektrische Energietechnik leichter lernen mit Java:** Durch das Internet und die Computertechnik ergeben sich auch für den Vorlesungs- und Übungsbetrieb neue Möglichkeiten, Wissen anschaulicher und verständlicher zu vermitteln. Ziel dieser Projektgruppe ist daher, herauszuarbeiten, welche dieser neuen Möglichkeiten sinnvoll für den modernen Übungsbetrieb im Rahmen der Vorlesung "Elektrische Energietechnik" genutzt werden können. Im einzelnen sollen geeignete Übungsbeispiele aus der Vorlesung ausgewählt, mit Hilfe der Programmiersprache Java umgesetzt und in die WWW-Seiten des Lehrstuhls eingebunden werden.

**Prozeßvisualisierung des Drehstromnetzmodells:** Für das am LS-EV vorhandene Drehstromnetzmodell wird die konventionelle Steuerung durch eine innovativ moderne Rechnersteuerung ersetzt, um eine wesentlich flexiblere Implementierung neuartiger Regelalgorithmen ohne Veränderung der Hardwareverdrahtung zu ermöglichen. Bisheriger

Ausbauzustand ist die komplette Umsetzung der lokalen Stationsleitwarten, welche untereinander über ein Novell-gestütztes LAN kommunizieren können. Im Rahmen einer weiteren Arbeit soll eine Netzleitwarte auf Basis von Windows NT entstehen, von welcher aus sich die einzelnen Stationsleitwarten fernsteuern lassen.

**Darstellung von Lastflußergebnissen mittels HTML-Code:** Die Lastflußrechnung ist die grundlegende Funktion in der Netzleittechnik zur Bestimmung eines aktuellen Netzzustandes. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt üblicherweise in Netzbildeditoren oder in Form von Listen. Während die grafische Anzeige nur beschränkte Netzausschnitte wiedergibt, sind die Listen bei größer werdenden Netzen schnell unübersichtlich und lassen kaum eine Verbindung zwischen den Daten eines Betriebsmittels und den verbundenen Knoten zu. Die aus dem Internet bekannte Sprache HTML erlaubt eine sinnvolle Verknüpfung der Daten zwischen den Knoten und den angeschlossenen Betriebsmitteln und kann somit eine übersichtliche Darstellung bieten. Ziel der Projektgruppe ist die Erstellung einer Funktion zur Ausgabe der Lastflußergebnisse im HTML-Format, die an ein bestehendes Programmpaket zur Lastflußberechnung anzukoppeln ist.

**Prüf- und Meßverfahren im Hinblick auf die Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) von leitungsgebundenen Störgrößen:** Jede elektrische Einrichtung muß den entsprechenden EMV-Vorschriften genügen, wenn es innerhalb der EG eingesetzt oder betrieben wird. Zur Sicherstellung der elektromagnetischen Verträglichkeit einer elektrischen Einrichtung sind alle in Frage kommenden Störeinflüsse zu untersuchen. Grundsätzlich kann zwischen leitungsgebundenen und nichtleitungsgebundenen Störeinflüssen unterschieden werden. In dieser Arbeit sind die zugrundeliegenden Normen für leitungsgebundene Störeinflüsse hinsichtlich der erforderlichen Meß- und Prüfverfahren zu selektieren. Dabei sind als Teilaufgaben die Normen für leitungsgebundene Störgrößen zusammenzustellen, die unterschiedlichen Normen und Empfehlungen im Hinblick auf die Meß- und Prüfverfahren zu vergleichen und ein Anforderungsprofil für eine entsprechende Testeinrichtung zu erstellen.

### 3.5 Exkursionen

Im Berichtszeitraum wurden in Zusammenarbeit mit dem IEEE-PES German Chapter zwei eintägige Exkursionen am 9. Juli 1998 zum Steinkohlebergwerk Ibbenbüren der Preussag Anthrazit AG sowie zum Kraftwerk Ibbenbüren der RWE Energie AG und am 10. September 1998 zur Firma Vaillant in Remscheid durchgeführt.

## **4 Forschungs- und Entwicklungsarbeiten**

### **4.1 Informationstechnische Verfahren für die Planung und Betriebsführung elektrischer Energieversorgungssysteme**

#### **4.1.1 Simulation und Bewertung von Übertragungsdienstleistungen in Energieversorgungssystemen basierend auf bilateralen Energielieferverträgen**

Mit dem Inkrafttreten des Gesetzes zur Neuregelung des Energiewirtschaftsrechts wurde in der Bundesrepublik Deutschland ein Organisationsrahmen geschaffen, der die Gebietsmonopole in der elektrischen Energieversorgung öffnet und den Wettbewerb in den Bereichen Elektrizitätserzeugung und Endkundenbelieferung fördert. Dieses Gesetz schreibt die Entflechtung der Bereiche Elektrizitätserzeugung von Transport und Verteilung vor und sieht als organisatorischen Rahmen für den Elektrizitätsmarkt das Modell des verhandelten Netzzugangs vor. Innerhalb einer Übergangsfrist bis voraussichtlich zum Jahr 2005 können kommunale Verteilungsunternehmen wahlweise das Alleinabnehmermodell realisieren. Zur praktischen Umsetzung des Wettbewerbs ist der Prozeß der Energieversorgung unter technischen und wirtschaftlichen Aspekten an die neuen Strukturen anzupassen.

Entscheidungsprozesse für die Planung und den Betrieb von Energieversorgungssystemen finden in vertikal integrierten Strukturen zentral statt. Unter den neuen organisatorischen Strukturen ist der Prozeß der Energieversorgung durch eine Dezentralisierung der Entscheidungsprozesse geprägt. Entscheidungen über den Einsatz von Kraftwerkseinheiten werden durch bilaterale Verträge zwischen den einzelnen Energieerzeugern und Abnehmern getroffen. Für die Umsetzung der im Strommarkt abgestimmten Einspeise- und Entnahmefahrpläne ist die Nutzung der Übertragungs- und Verteilungsnetze, das heißt die Bereitstellung von Übertragungsdienstleistungen (ÜDL), grundlegend. Die Aufrechterhaltung einer zuverlässigen und sicheren Energieversorgung unter Wettbewerbsbedingungen stellt, bedingt durch die größere Komplexität des Problems und den höheren Koordinationsaufwand, eine Herausforderung für alle beteiligten Akteure dar. Für einen funktionierenden Wettbewerb ist die technische und organisatorische Umsetzung der ÜDL und die Bestimmung von Entgelten für ÜDL nach diskriminierungsfreien Grundsätzen von zentraler Bedeutung.

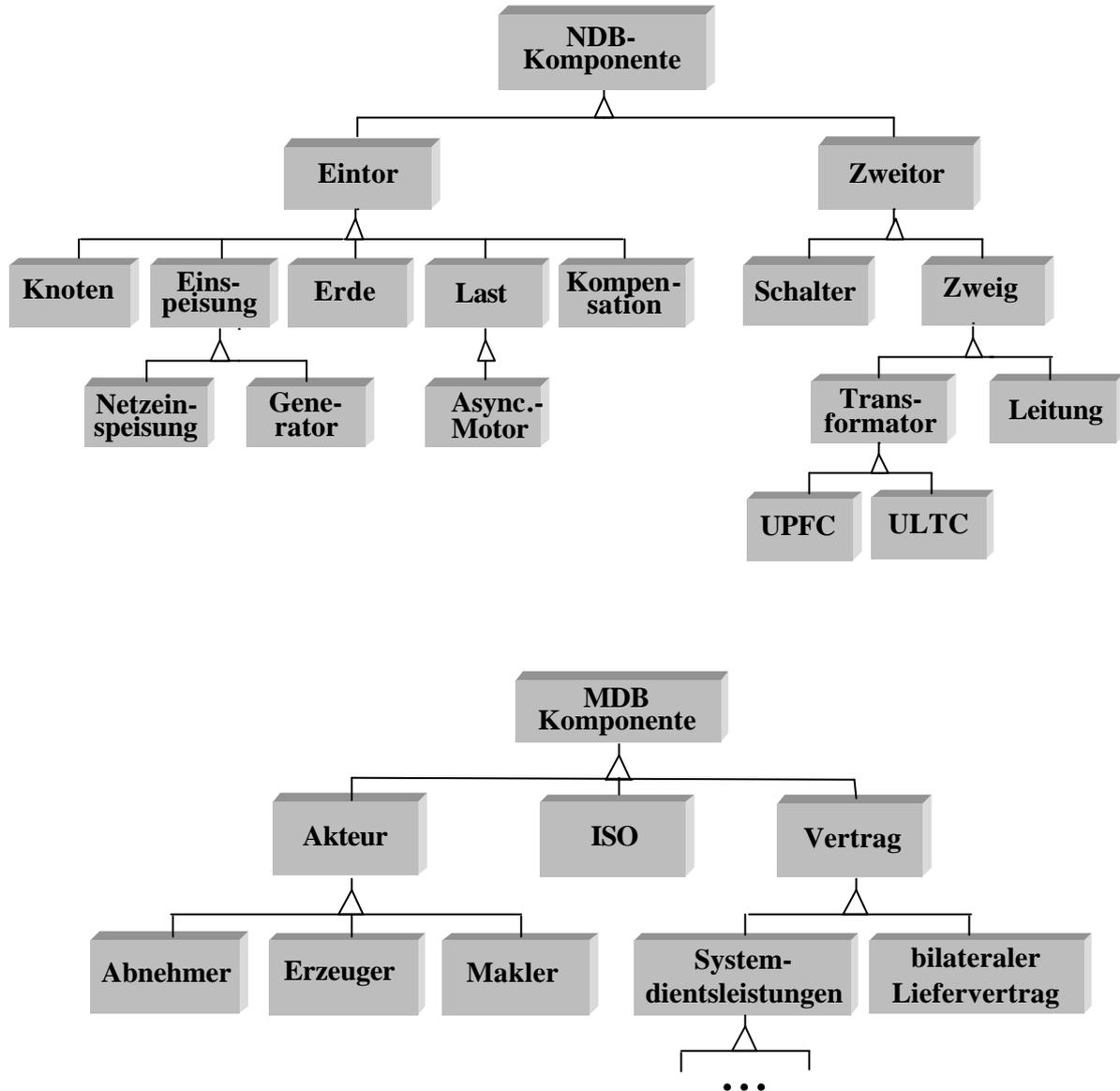
Existierende Simulationsprogramme, die zur Unterstützung der Entscheidungsfindung für Planung und Betrieb eingesetzt werden, sind den neuen Rahmenbedingungen anzupassen. Insbesondere ist der Elektrizitätsmarkt mit den informationstechnischen Schnittstellen zum

physikalisch-technischen Modell des Versorgungsprozesses abzubilden. Hinsichtlich des Marktmodells ist die strikte Entflechtung der Bereiche Erzeugung und Transport bzw. Verteilung zu beachten. Tabelle 4.1 gibt einen Überblick über die Aufgaben und Zuständigkeiten der einzelnen Marktakteure.

**Tabelle 4.1:** Aufgaben und Zuständigkeiten der Marktakteure

<b>Verbraucher:</b>	<b>Erzeuger:</b>	<b>Netzbetreiber:</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>? Abschluß bilateraler Energielieferverträge</li> <li>? Spezifikation der Fahrpläne für ÜDL</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>? KW-Einsatzoptimierung</li> <li>? Anmeldung ÜDL</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>? Netzplanung</li> <li>? Überprüfung der Zulässigkeit von ÜDL</li> <li>? Bestimmung der Entgelte für ÜDL</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>? Bezugsüberwachung und -optimierung</li> <li>? Laststeuerung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>? Einspeisung nach Fahrplan</li> <li>? Umsetzung der Regelbefehle des Netzbetreibers</li> <li>? Vorhaltung und Bereitstellung von Minutenreserve</li> <li>? Primärregelung</li> <li>? Blindleistungserzeugung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>? Netzleitstelle: Netzüberwachung und -führung</li> <li>? Lastverteiler: - Frequenzhaltung - Regelung Übergabeleistung</li> <li>? Spannungshaltung und Einsatz der Blindleistungseinspeisung = Koordination und Einsatz der Systemdienstleistungen</li> </ul>

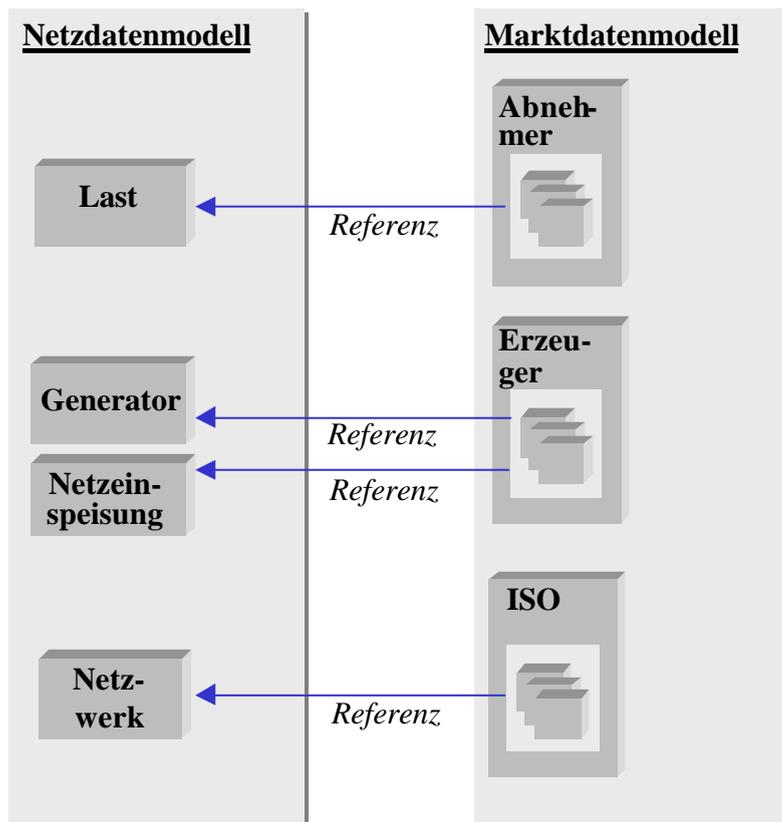
In der vorliegenden Arbeit wurde ein Programmsystem zur Simulation von Energieversorgungssystemen und Bewertung von ÜDL entwickelt. Das Programm enthält als Kernkomponenten zwei Datenmodelle zur Beschreibung des Energieversorgungssystems, die jeweils als objektorientierte Klassenbibliotheken realisiert sind. Die objektorientierte Realisierung bietet gegenüber der klassischen prozeduralen Programmierung den Vorteil, daß klare Schnittstellen zwischen Markt und physikalischem System definiert werden können. In Bild 4.1 sind die Klassenhierarchiediagramme des Netz- und Marktmodells dargestellt.



**Bild 4.1:** Klassenhierarchien des Netz- und Marktdatenmodells

Das objektorientierte Netzdatenmodell (Netzdatenbank, NDB) dient der Beschreibung der physikalisch-technischen Netzkomponenten und der topologischen Verknüpfung der Komponenten. Da Netzberechnungsprogramme in der Regel auf einem knoten-/zweigbasierten Konzept aufbauen, wurden die Objekte Eintor und Zweitor eingeführt. Alle topologisch relevanten Objekte werden als Unterklassen dieser beiden Klassen realisiert. Das objektorientierte Marktmodell (Marktdatenbank, MDB) repräsentiert den Elektrizitätsmarkt. Es enthält Objektklassen zur Repräsentation der Marktakteure und der Verträge zwischen den Marktakteuren.

Zur Dateneingabe und Ergebnisvisualisierung ist ein Netz- und Marktdateneditor als graphische Benutzeroberfläche realisiert. Intern wird ein konkretes Energieversorgungssystem als Menge von Objekten des Netz- und Marktdatenmodells dargestellt. Hierbei werden die existierenden Zusammenhänge innerhalb des Gesamtsystems als dynamische Verknüpfungen zwischen den Objekten abgebildet. In Bild 4.2 ist der Zusammenhang zwischen den Marktakteuren Erzeuger und Abnehmer und den physikalischen Komponenten Generator resp. Last dargestellt. Das Objekt Erzeuger enthält hierbei Referenzen auf diejenigen Generatorobjekte, die in seinem Besitz sind. Befindet sich die Einspeisung einer ÜDL außerhalb des Regelbereichs der zu beliefernden Last, wird die Einspeisung des Erzeugers als Netzeinspeisung an der Kuppelstelle repräsentiert. Analog besitzen Abnehmerobjekte Referenzen auf Lastobjekte. Objekte der Klasse Netzbetreiber enthalten eine Referenz auf ein Netzwerkobjekt, das alle Netzdatenbankobjekte eines Regelbereiches beinhaltet.



**Bild 4.2:** Verknüpfung der Objekte über Referenzen

Als Simulations- und Bewertungsverfahren stehen die in Tabelle 4.2 zusammengefaßten Simulationsobjekte zur Verfügung, die über definierte Datenschnittstellen mit den beiden objektorientierten Datenmodellen verknüpft sind. Die implementierten Simulationsobjekte lassen sich hierbei in zwei Gruppen aufteilen. Neben Standardverfahren, die an die neuen organisatorischen Rahmenbedingungen anzupassen sind, erfordert ein liberalisierter Energieversorgungsmarkt Verfahren zur Bewertung der Kosten von ÜDL.

**Tabelle 4.2:** Simulationsobjekte

<b>Standardverfahren:</b>	<b>Bewertung von ÜDL:</b>
? Lastflußrechnung	? Bestimmung von Netznutzungsentgelten: verschiedene Varianten von Tarifmodellen basierend auf Briefmarkentarif, Grenzkostenmethode, Verbändevereinbarung, Entfernungs-Leistungs-Methode, etc.
? Momentanoptimierung (OPF)	
? wirtschaftliche Lastverteilung	
? Kurzfristoptimierung der Kraftwerkseinsatzplanung	? Entgelte für Systemdienstleistungen
	? Kosten der Ausgleichsversorgung
	? Kosten für Übertragungsverluste

Die zur Dateneingabe und Ergebnisvisualisierung realisierten graphischen Benutzeroberflächen sind in Bild 4.3 dargestellt. Innerhalb des dargestellten Netzdateneditors werden Betriebsmittel und deren topologische Verknüpfung spezifiziert. Die im Rahmen von Simulationsszenarien berechneten Netzbetriebszustände werden graphisch dargestellt. Der Marktdateneditor dient zur Definition der Marktakteure und der vertraglichen Beziehungen zwischen den Akteuren. In Bild 4.3 sind exemplarisch Erzeuger- und Abnehmerobjekte dargestellt, die untereinander bilaterale Energielieferverträge abschließen. Einzelne Erzeuger sind hierbei mit einem oder mehreren Generatorobjekten des Netzdatenmodells verknüpft.

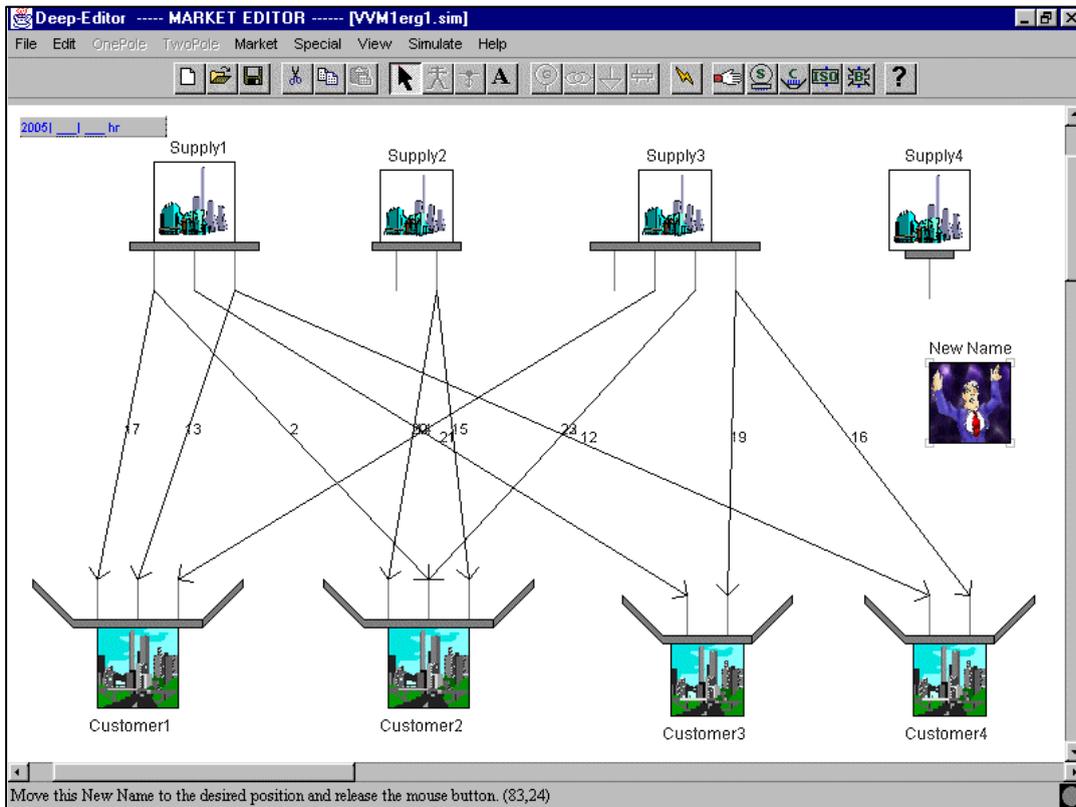
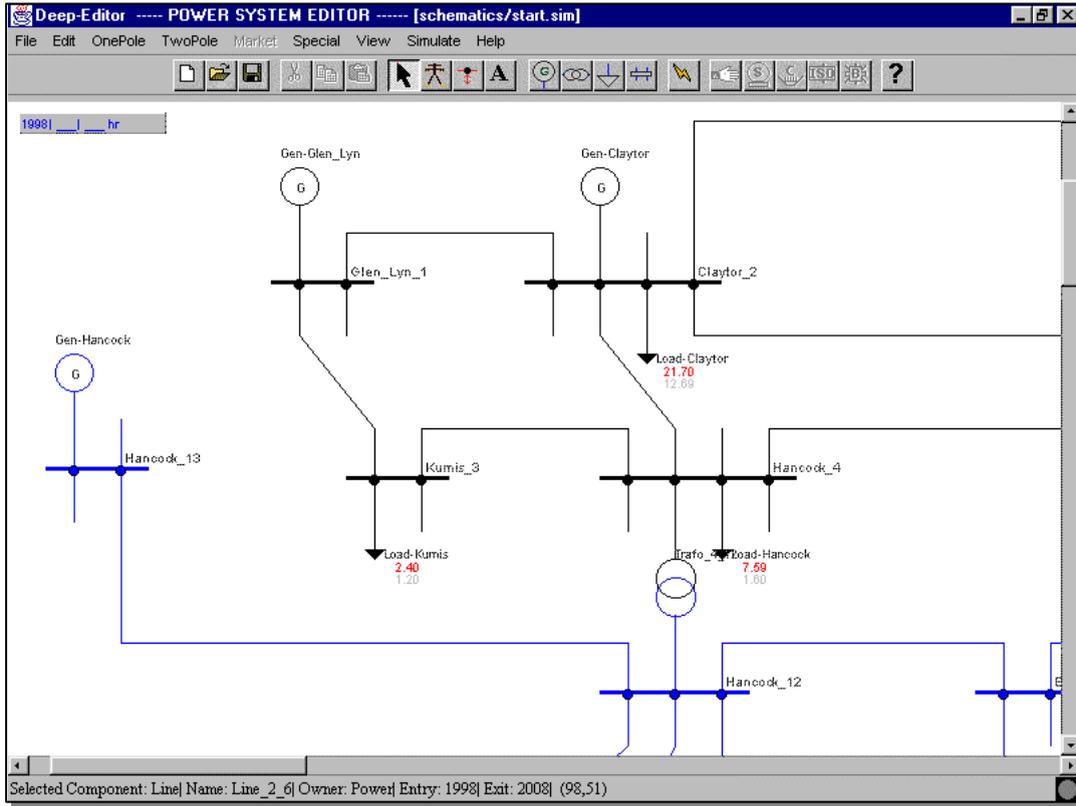


Bild 4.3: Netz- und Marktdateneditor

Die Anwendung der Simulationsverfahren erfolgt für die einzelnen spezifizierten Akteure. So wird beispielsweise die Bestimmung des Kraftwerkseinsatzplanes entsprechend Tabelle 4.1 individuell für jedes Erzeugerobjekt durchgeführt. Hierbei wird die Optimierung für diejenigen Kraftwerkseinheiten durchgeführt, die als Objektreferenzen dem betrachteten Erzeugerobjekt zugewiesen sind. Der während des Simulationszeitraums von einem Erzeuger zu deckende Lastbedarf resultiert aus den bilateralen Verträgen, die dem Erzeugerobjekt zugeordnet sind. Die Kraftwerkseinsatzpläne der einzelnen Erzeuger definieren Einspeisefahrpläne an den Netzknoten, deren Wirkleistungen in jeder 15-Minuten-Zeitperiode der Summe der in den bilateralen Verträgen spezifizierten Lasten entsprechen. Zusammen mit den vorgegebenen Lastverläufen der Abnehmer sind somit die Fahrpläne der ÜDL als Eingangsdaten für Simulationsrechnungen bestimmt. Im Rahmen der Simulationen kann die physikalisch-technische Durchführbarkeit der Übertragungsdienstleistungen bewertet und Entgelte für die einzelnen ÜDL nach unterschiedlichen Verfahren bestimmt werden.

T. Nikodem, R. Palma

#### **4.1.2 Der optimale Lastfluß in einem deregulierten Energiemarkt unter Berücksichtigung von FACTS-Betriebsmitteln**

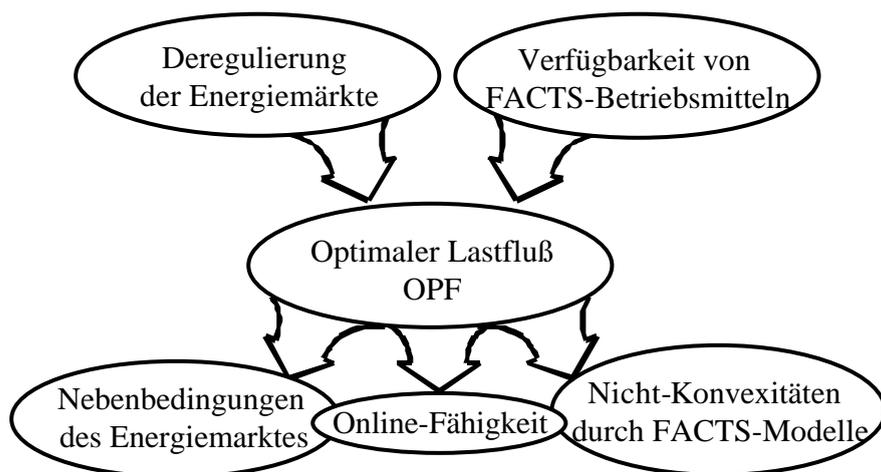
Veränderte Randbedingungen im Bereich der elektrischen Energieversorgung resultierend aus der politisch motivierten Deregulierung der Energiemärkte und der aktuellen Verfügbarkeit von leistungselektronischen Übertragungselementen machen eine Neubewertung der Verfahren zur online-Berechnung des optimalen Netzzustandes notwendig. Die neuartigen Übertragungselemente führen auf das Konzept der schnell anpassungsfähigen Energieübertragungssysteme (EÜS), die auch als Flexible AC Transmission Systems (FACTS) bezeichnet werden. Als Referenz der leistungselektronischen Übertragungselemente dient dabei der Universale Lastflußregler (Unified Power Flow Controller, UPFC), der die Merkmale aller FACTS-Betriebsmittel in sich vereint. Durch den Einsatz von FACTS-Betriebsmitteln in einem deregulierten Energiemarkt erhält der Netzbetreiber erweiterte Möglichkeiten zur Optimierung des Netzzustandes. Hierbei wird durch die aktive Lastflußsteuerung ein bisher ungenutztes Potential in der Netzzustandsoptimierung erschlossen, welches einer Erhöhung des Profites des Netzbetreibers entspricht. Die kurzfristigen Realisierungs- und Planungszeiten von FACTS-

Betriebsmitteln im Vergleich zum Neubau von Übertragungsleitungen, die auf zunehmende Akzeptanzprobleme in der Öffentlichkeit stoßen, stellen ferner eine Alternative zur Schaffung zusätzlicher Übertragungskapazitäten dar. Weitere Vorteile durch eine Integration lastflußsteuernder Betriebsmittel ergeben sich in der Berücksichtigung einer Vielzahl von Restriktionen, die in einem deregulierten Markt aus vertraglichen Bindungen mit Kunden, Kraftwerksbetreibern sowie den Betreibern benachbarter Netze resultieren.

Die Zielfunktionen einer Netzzustandsoptimierung in der elektrischen Energieversorgung kann nach verschiedenen Kriterien erfolgen:

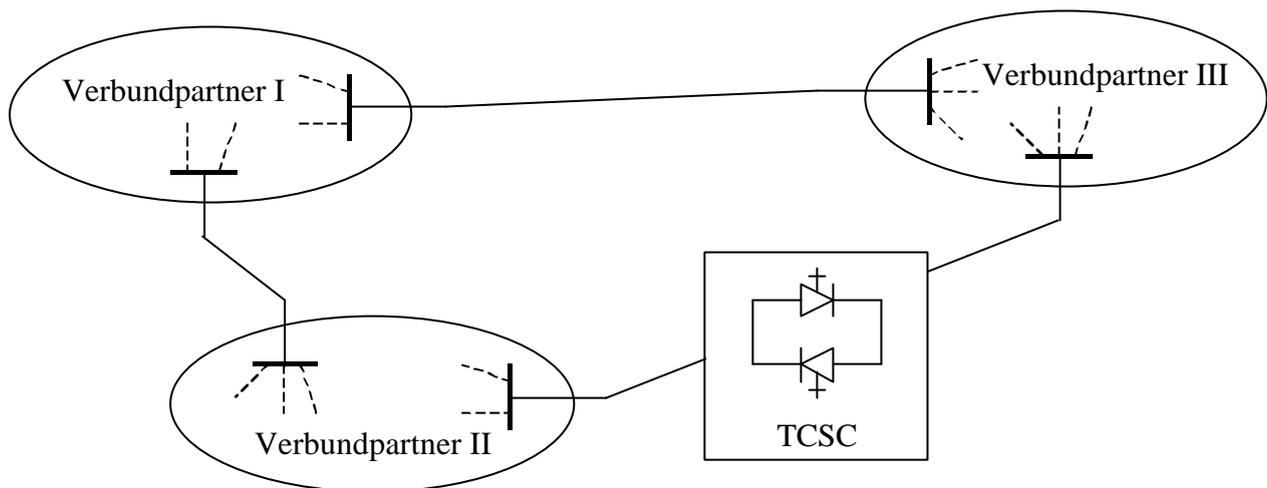
1. Reduktion der Kosten des Energiebezugs und -transportes (Wirk- und Blindleistungsoptimierung),
2. Verlustoptimierung (Spannungs-Blindleistungsoptimierung)
3. Erhöhung der übertragbaren Leistung im EÜS

Die Veränderungen im technischen und wirtschaftlichen Umfeld der elektrischen Energieversorgung machen eine Anpassung des optimalen Lastflusses an die veränderten Rahmenbedingungen in einem freien Energiemarkt notwendig. Die Optimierungsziele innerhalb des EÜS unterliegen neben technischen auch einer Vielzahl von wirtschaftlichen Nebenbedingungen, die bei einer Netzzustandsoptimierung zu berücksichtigen sind. Ebenso sind die Erwartungen an die online-Fähigkeit des optimalen Lastflusses strengerer Anforderungen unterlegen, um eine unmittelbare Reaktion auf die voraussichtlich schnell veränderlichen Preise in einem freien Energiemarkt vorzunehmen (Bild 4.4).



**Bild 4.4:** Der optimale Lastfluß in einem veränderten Umfeld

Bei der Integration von FACTS-Betriebsmitteln in eine Netzzustandsoptimierung sind neben den erweiterten Steuerungsmöglichkeiten der leistungselektronischen Übertragungselemente Nicht-Konvexitäten in Abhängigkeit des gewählten Modells und der Netztopologie zu beachten, die eine Anwendbarkeit der verschiedenen Modelle einschränken. Dieser Zusammenhang wird durch das folgende Beispielnetz veranschaulicht, in dem drei Verbundpartner über Kuppelleitungen miteinander verbunden sind (Bild 4.5).

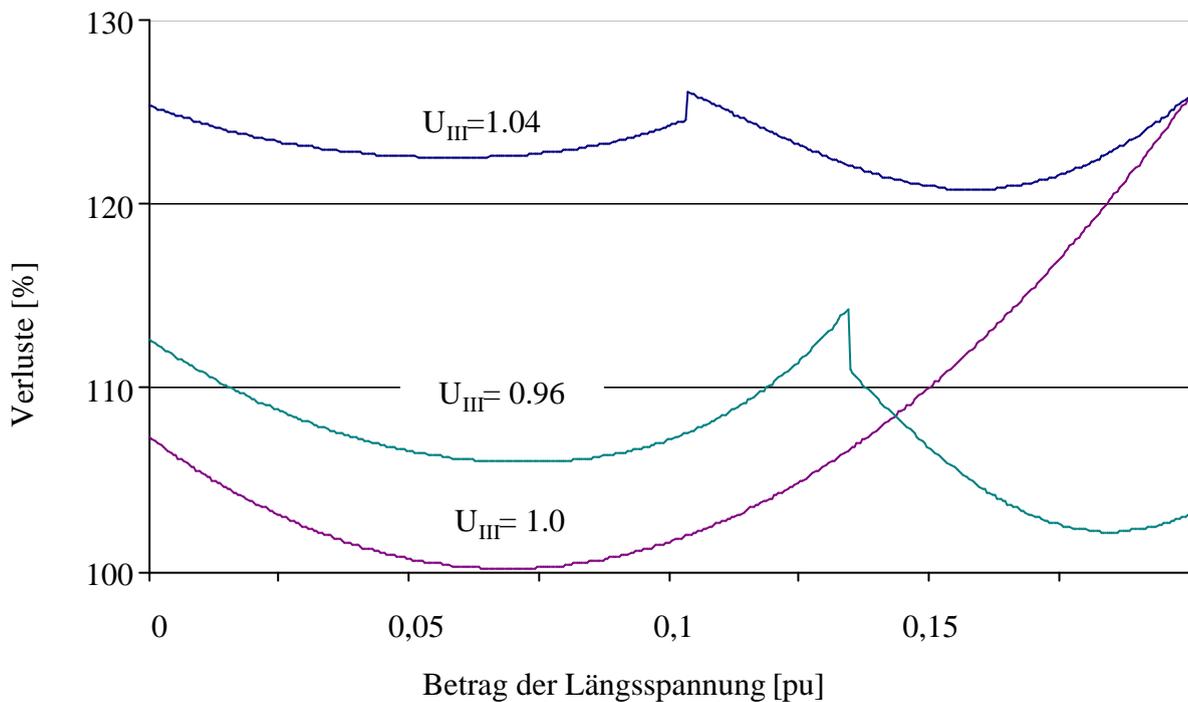


**Bild 4.5:** Versorgungssituation

Die Kuppelleitung zwischen den Verbundpartnern II und III verfügt über eine leistungselektronisch gesteuerte Serienkompensation (Advanced Series Compensation, ASC), die eine Regelung der ausgetauschten Wirkleistung erlaubt. Die Modellierung des ASC erfolgt mittels einer Spannungsquelle im Längszweig der Kuppelleitung. Der Winkel, bei dem diese Spannungsquelle in das EÜS einspeist, ergibt sich aus der Forderung der Wirkleistungsinvarianz des FACTS-Betriebsmittels. Hierzu kann durch den ASC nur Blindleistung erzeugt oder absorbiert werden, entsprechend einer induktiven oder kapazitiven Wirkung dieses FACTS-Betriebsmittels. Die Forderung entspricht der Einstellung eines Winkels der Längsspannungsquelle, der senkrecht auf dem Leitungsstrom steht, wodurch zwei mögliche Lösungen dieser Nebenbedingung berechnet werden können.

Für das EÜS in Bild 4.5 sind in Bild 4.6 die prozentualen Veränderungen der Netzverluste bezogen auf das Optimum in Abhängigkeit der eingepprägten Längsspannung des ASC und der Spannung an der Kuppelstelle des Verbundpartners III dargestellt. Die Unstetigkeitsstellen zeigen eine Umkehr des Leistungsflusses auf der Kuppelleitung II-III, die ausgelöst wird durch die Berechnung der zweiten möglichen Lösung der Forderung nach

Wirkleistungsinvarianz. Diese Nicht-Konvexität des dargestellten FACTS-Modells kann durch eine Begrenzung des Optimierungsbereiches der Zustandsvariablen oder durch eine Transformation der Spannungsquellen des FACTS-Betriebsmittels in ein lineares Modell vermieden werden.



**Bild 4.6:** Netzverluste bei Variation der Längsspannung des ASC und der Spannung an der Kuppelstelle

Die Lösung der physikalisch formulierten Zustandsoptimierung mit einer nichtlinearen Zielfunktion sowie nichtlinearen Gleichheits- und Ungleichheits-Nebenbedingungen erfolgt mittels der sequentiellen quadratischen Programmierung. Dieses Verfahren vereinigt die Vorteile des Newton-Lagrange-Verfahrens in Form eines Konvergenzverhaltens zweiter Ordnung mit den Eigenschaften der quadratischen Programmierung, die eine direkte Berücksichtigung von Ungleichheits-Nebenbedingungen erlaubt. Mit der sequentiellen quadratischen Programmierung liegt somit ein Optimierungsverfahren vor, welches eine Berücksichtigung von Ungleichheits-Nebenbedingungen ohne Einsatz von Heuristik unter Beibehaltung der quadratischen Konvergenzeigenschaften ermöglicht.

Durch die eingesetzten Verfahren und Modelle wird eine Grundlage geschaffen, die Anforderungen an einen Optimalen Lastfluß in einem deregulierten Markt in Form einer geeigneten Berücksichtigung der Nebenbedingungen und der online-Fähigkeit zu erfüllen.

Eine Vermeidung von Nicht-Konvexitäten durch die Berücksichtigung von FACTS-Betriebsmitteln ist durch eine geeignete Modellbildung möglich.

Carsten Lehmköster

Dieses Forschungsvorhaben wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Schwerpunktprogrammes "Systemtheoretische Verfahren zur Führung transeuropäischer Energieversorgungssysteme" gefördert.

### **4.1.3 Unit Maintenance Scheduling in Open Electric Power Systems**

Deregulation is the widely recognised development trend of modern power systems. Unit maintenance scheduling in an open electric power system will have many new characteristics and become quite different from that in vertically integrated power systems.

First, unit maintenance scheduling will not be decided only by the system dispatch centre any more but will be mainly decided by owners of the units. In an open market environment, these owners will try to schedule their unit maintenance according to the operating conditions of their units, the quotations on the energy market and other economic factors. The goals of their unit maintenance schedule are to try to make their units have as long as possible life span and to make their production earn as much as possible profit. Different owners of units make their own unit maintenance schedule separately and do not take into consideration the external unit maintenance schedules.

Second, from the view point of the system dispatch centre, the unit maintenance activities of all unit owners in the system is independent, discontinuous and irregularly distributed in geography, this will cause many problems in power quality and transmission security. To overcome this circumstance, the system dispatch centre certainly should make some coordination on these various individual unit maintenance schedules in light of an optimisation objective of the whole system such as level energy reserve rate or level risk rate during the whole unit maintenance period. At the same time the system dispatch centre will also try to avoid the occurrence of the phenomenon that too many units within one region are maintained simultaneously which will cause energy supply insufficiency and energy transmission insecurity problems in the system.

To satisfy the different requirements of both decision makers and further to guarantee that an optimal solution can still be found even in case that some of the maintenance schedules

have to be modified to some extent, a compromise unit maintenance scheduling methodology has to be explored. The main difficulties in solving this problem lie in the following two aspects:

- 1) How to properly determine the components of the optimisation objective function and mathematically integrate them?
- 2) What is the most appropriate method to accomplish this optimisation? These questions will be discussed in the sequel.

Generally, the unit owners will get their maximum benefit if the system unit maintenance scheduling is exactly consistent to their original unit maintenance schedule, and any violation of their original schedule will incur a benefit penalty whose extent will be determined by the length of the maintenance time deviation from their originally expected starting time. To guarantee the power quality and transmission security of the system, all unit owners will accept a reasonable or sometimes even a compulsory adjustment to their initial maintenance schedule when they believe that it is necessary from the view point of the system dispatch centre. In case that they would bear the loss caused by this adjustment alone, they hope that all unit owners participating in the unit maintenance scheduling will share this loss. Based on this consideration, a new mixed optimisation objective function of the problem will be considered which tries to maintain a level loss rate among all unit owners and at the same time a level energy reserve rate during the whole maintenance period is formulated as:

$$f ( P_1^r, \dots, P_M^r, T_1^d, \dots, T_M^d ) \min \sum_{i=1}^M \frac{T_i^d \cdot T_{aver}^d}{T_{aver}^d}^2$$

$$\min k \sum_{i=1}^M \frac{P_i^r \cdot P_{aver}^r}{P_{aver}^r}^2 \quad (4.1)$$

where

- $k$  Scale factor
- $M$  Number of periods for maintenance
- $N$  Number of units to be maintained
- $P_i^r$  Energy reserve rate of the  $i$ th time interval
- $P_{aver}^r$  Average energy reserve rate
- $T_i^d$  Maintenance time deviation of the  $i$ th unit
- $T_{aver}^d$  Average maintenance time deviation

In addition to the constraints considered in the traditional level energy reserve rate optimisation method which include maintaining crews, maintenance time, minimum time interval for repeat maintenance, system energy reserve margin and tie line transmission limits, the following four kinds of new constraints will be taken into consideration for the optimisation of unit maintenance scheduling in an open energy market environment:

1. The individual, original unit maintenance schedule of all unit owners;
2. The earliest and latest maintenance starting time accepted by the unit owners;
3. Energy reserve margin of each region, and

Conditions under which compulsory measures have to be taken by the system dispatch centre.

Genetic algorithms have been approved to be a practical solution method for unit maintenance scheduling, but the traditional continuous genetic building block will not be applicable in deregulated electric power systems because in most cases the independent maintenance activities in an open environment will become discontinuous. This applies not only for a system but also for a plant and even for an individual unit. Hence, a new genetic algorithm with discontinuous genetic building blocks in the chromosome structure as shown in Fig. 4.7 is proposed.

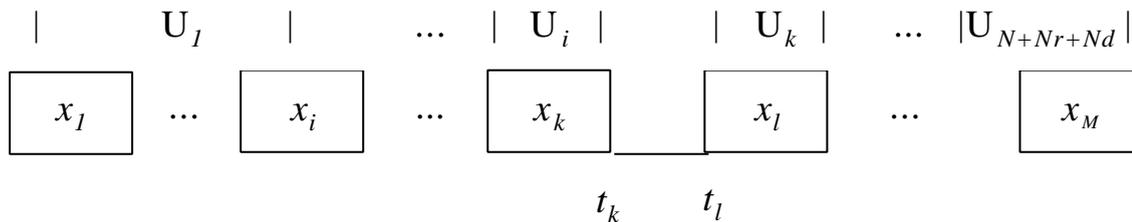


Fig. 4.7: A chromosome for discontinuous unit maintenance scheduling

In certain time periods  $[t_k, t_l]$  there is no unit to be maintained, and there may be several such kinds of time intervals in a discontinuous chromosome.  $x_k$  is a code digit which is a positive integer and satisfies  $1 \leq x_k \leq M$ .  $N_r$  and  $N_d$  are the number of repeated maintenance units and the number of maintenance disturbed units respectively. An additional efficient computation module attached to the genetic algorithm will also be developed to calculate the energy reserve margin of each region and the transmission security of the tie lines among regions. To improve the computational speed, the new algorithm is designed as a parallel genetic algorithm to be executed on a distributed computer network.

New methods need to be explored to solve the unit maintenance scheduling problem in deregulated power systems. Since the problem will be optimised from several different aspects, there will be more than one components in the optimisation objective function. The new genetic algorithm proposed seems to be a feasible solution method to the problem considered.

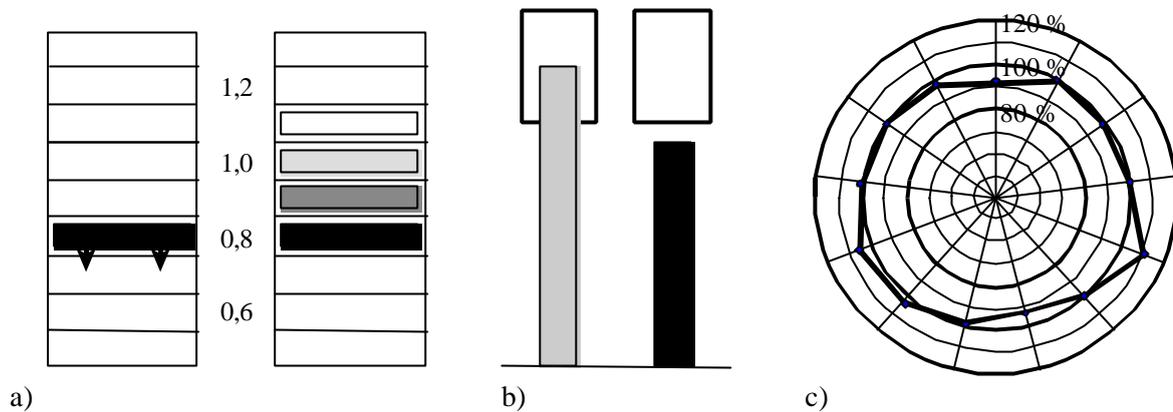
Yaoyu Wang

Der wissenschaftliche Aufenthalt von Herrn Wang wurde von der Alexander-von-Humboldt-Stiftung gefördert.

#### **4.1.4 Intelligente Werkzeuge für die Zustandsbewertung und –visualisierung**

In der Betriebsführung von Systemen der Energieversorgung wird heute bereits eine hohe Anzahl von Daten erzeugt, verarbeitet, ausgewertet und dem Bedienpersonal solcher Systeme online zur Verfügung gestellt. Aufgrund der sich ändernden technischen wie wirtschaftlichen Randbedingungen (Vergrößerung der Verbundsysteme, zunehmende informationstechnische Durchdringung der Anlagen auf Grund preisgünstigerer und leistungsfähigerer Informationstechnologie, Liberalisierung und Deregulierung der Energieversorgung) wird die Menge von Meßwerten, Meldungen und Prognosen aber auch wirtschaftlicher Rahmeninformationen, die in der Netzbetriebsführung zu verarbeiten sind, noch ganz erheblich ansteigen. Zur Bewertung dieser Datenflut bedarf es einerseits effizienter Hilfsmittel und die erzielten Ergebnisse müssen andererseits für den Bediener eindeutig und übersichtlich visualisiert werden, um auf Ereignisse innerhalb des Energieversorgungssystems zielgerichtet reagieren zu können.

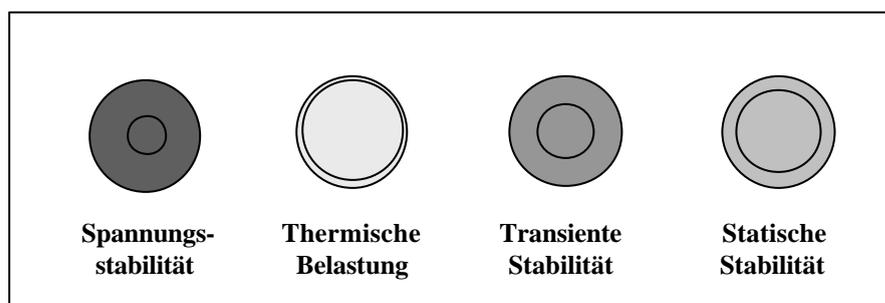
Herkömmliche Lösungen für die Netzbetriebsführung basieren zum großen Teil auf der Kontrolle von Einzelwerten (z.B. Sammelschienenspannungen oder Abgangsströmen). Grenzwertkontrollen zeigen an, ob Meßwerte zu hoch oder zu niedrig liegen (Bild 4.8). Die Einordnung des Systemzustands in die Gesamtheit aller Zustände ist so nicht immer möglich, denn dazu müßte dem Bediener ein bewertender Überblick über alle Einzelwerte präsent sein. Alarmierungen treten erst bei einer Grenzwertverletzung auf. Dabei wird jedoch nicht deutlich, ob die Grenzwertverletzung durch einfache Maßnahmen korrigiert werden kann, da das System als Ganzes noch ausreichende Ausweichkapazitäten bietet, oder ob das System bereits so stark belastet ist, daß sich eine lokale Störung systemweit ausbreiten wird.



**Bild 4.8:** Beispiele für Prozeßdatendarstellung: a) Balkendiagramm mit Trendanzeige  
b) Balkendiagramm mit Normalbereich  
c) Kiviati-Diagramm

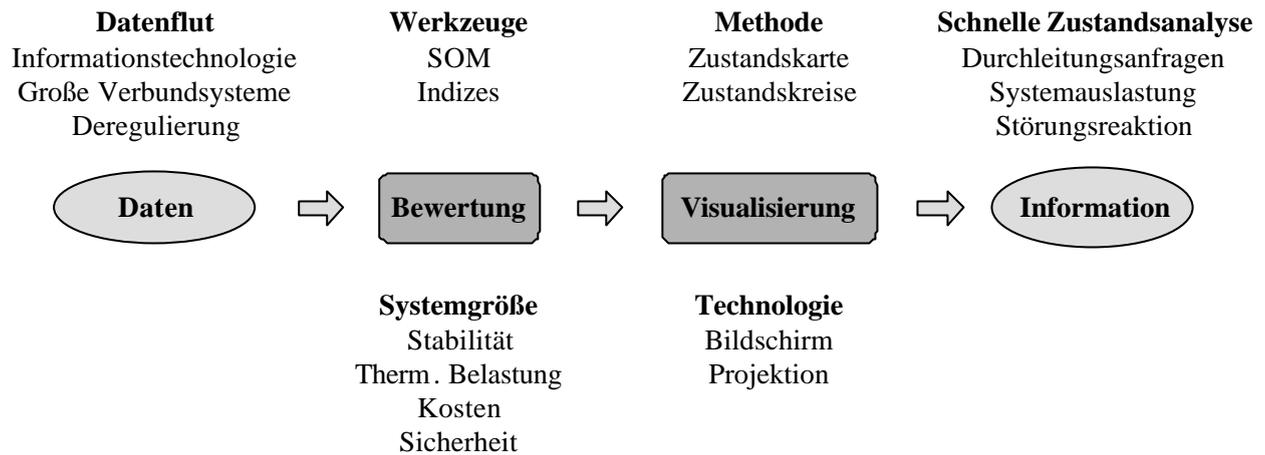
Aus dieser Situation heraus besteht die Notwendigkeit, eine Systemsicht zu entwickeln. Im Rahmen des Forschungsvorhabens werden globale Zustandsindikatoren auf Basis der vorhandenen Betriebsdaten erarbeitet, die in ihrer Gesamtheit den Netzzustand umfassend charakterisieren. Die Indizes beschreiben beispielsweise das Stabilitätsverhalten, die Betriebsmittelauslastung und das Spannungsprofil. Wichtig ist hierbei, daß sie sowohl ein Maß für den Systemzustand als Ganzes sind aber auch eindeutig die Überschreitung von Grenzen bei einzelnen Werten erkennen lassen.

Um die Darstellung des momentanen Systemzustands und seine Einordnung in die Gesamtheit der Zustände zu ermöglichen ist eine bewertende Visualisierung notwendig. Bild 4.9 zeigt eine Darstellungsform für globale Zustandsindizes. An der Färbung läßt sich gut erkennen, welche momentanen Eigenschaften das System charakterisieren. Der innere Kreis, der die gleiche Information repräsentiert, ermöglicht quantitative Aussagen.



**Bild 4.9:** Visualisierung von Zustandsindizes





**Bild 4.11:** Informationsmanagement-System

Die Betriebsdaten werden den Bewertungskomponenten zugeführt. Diese schaffen die Voraussetzungen für die Visualisierung. Dem Benutzer werden die verdichteten Informationen, die aus den Daten gewonnen werden, als bewertendes Hilfsmittel anschaulich zugänglich gemacht.

C. Leder, C. Rehtanz

Dieses Forschungsvorhaben wird durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Schwerpunktprogramms „Systemtheoretische Verfahren zur Führung trans-europäischer Energiesysteme“ gefördert.

## **4.2 Modellierung und Simulation statischer und dynamischer Vorgänge in elektrischen Energieversorgungssystemen**

### **4.2.1 Instandhaltungs- und Erneuerungsstrategien in Verteilungsnetzen**

Durch die Novellierung des Energierechtes werden die Rahmenbedingungen der Energieversorgung, insbesondere für die Verteilungsnetze, grundlegend verändert. Anstelle der bislang regulierten Stromversorgung mit geschlossenen Konzessionsgebieten wird ein deregulierter Markt mit der Verpflichtung zur diskriminierungsfreien Durchleitung treten. Das bisher bilaterale Vertragsverhältnis zwischen Kunde und Energieversorgungsunternehmen wird zunehmend komplexeren Beziehungen weichen; es wird sich ein Spannungsfeld zwischen dem Kunden und seinen Anforderungen, dem Stromvertrieb und dessen Produktgestaltung sowie dem jeweiligen Netzbetreiber und den von seinem Netz bereitgestellten Netzleistungen entwickeln. Unter Marktbedingungen werden sich Regelungsmechanismen herausbilden, die das Verhalten und den Spielraum der jeweils am Prozeß der Energieversorgung Beteiligten beeinflussen.

Für den Netzbetreiber bedeutet diese Änderung der Rahmenbedingungen vor allem, daß er sein Netz zukünftig mit den Erlösen aus der Durchleitung betreiben muß. Dies macht eine Neuorientierung, insbesondere bei Betrieb und Errichtung des Netzes, erforderlich. Der Betrieb der Netze wird sich nicht mehr, wie bislang, an einer möglichst hohen Versorgungsqualität und -zuverlässigkeit orientieren können. Vielmehr wird der Netzbetreiber zukünftig nur mehr den Aufwand betreiben, zu dem er aufgrund von Zusagen, vertraglichen Verpflichtungen gegenüber einem Vertrieb oder einem Kunden in seinem Netz oder aufgrund externer Anforderungen (Vorschriften, Gesetze) verpflichtet ist. Die vereinbarte Versorgungsqualität und die zugesicherten Netzleistungen müssen, sollen sie kostengünstig erreicht werden, gezielt und aktiv erarbeitet werden. Wesentliche Stellschrauben sind hierbei zielgerichtete Instandhaltungs- und Erneuerungsstrategien die unter den oben genannten Gesichtspunkten optimiert sind.

Die Optimierung der Vorgehensweisen bei Instandhaltung und Erneuerung von Verteilungsnetzen setzt allerdings voraus, daß entsprechende Methoden zur Beurteilung der Versorgungsqualität und Netzleistungen sowie des Erfüllungsgrades der Versorgungsaufgabe des Verteilungsnetzes unter den genannten neuen Rahmenbedingungen vorliegen. In einem ersten Schritt werden daher Ansätze zur Definition und Quantifizierung der Versorgungsqualität und der Netzleistungen unter Berücksichtigung von Wettbewerbs- und Marktaspekten für Verteilungsnetze erarbeitet. Dabei sind neben den technischen

Kenngößen auch Zusagen und vertragliche Verpflichtungen gegenüber Kunden oder Vertriebsorganisationen zu beachten. Weitere Aspekte sind z.B. eine regionale Differenzierung von Netzgebieten aufgrund unterschiedlicher Netz- und Kundenstrukturen sowie eine Analyse, für welche Risiken zukünftig ein Netzbetreiber verantwortlich ist (z.B. Anlagen-, Arbeitssicherheit, Substanzverzehr, Spannungsqualität) und welche Risiken bei einem Vertrieb anzusiedeln sind (z.B. Produktrisiko).

In einem zweiten Schritt wird untersucht, welchen quantitativen Einfluß unterschiedliche Instandhaltungs- oder Erneuerungsmaßnahmen auf den Erfüllungsgrad der Versorgungsaufgabe, die Qualität der Versorgung und der Netzleistungen sowie auf die vom Netzbetreiber zu verantwortenden Risikobereiche haben. In diesem Zusammenhang ist auch zu klären, inwieweit unterschiedliche Instandhaltungs- und Erneuerungsmaßnahmen Auswirkungen auf den Erhalt der vorhandenen Anlagensubstanz haben. Dies macht eine genaue Abgrenzung zwischen Instandhaltungs-, Erneuerungsmaßnahmen und sonstigen betrieblichen Maßnahmen erforderlich. Bei genauerer Kenntnis dieser Wirkungsmechanismen können dann Methoden entwickelt werden, mit denen der Instandhaltungs- und Erneuerungsbedarf in einem bestehenden Verteilungsnetz bestimmt werden kann, um zielgerichtet die gestellte Versorgungsaufgabe und die Vorgaben zur Substanzerhaltung zu erfüllen.

Bei der Bearbeitung dieses Themenkomplexes wird der Schwerpunkt auf die Betrachtung von Verteilungsnetzen (Flächennetzen) gelegt.

Johannes Stürmer, RWE Energie AG

#### **4.2.2 Trennstellenoptimierung in Verteilungsnetzen auf der Grundlage einer multikriteriellen Lastmodellierung**

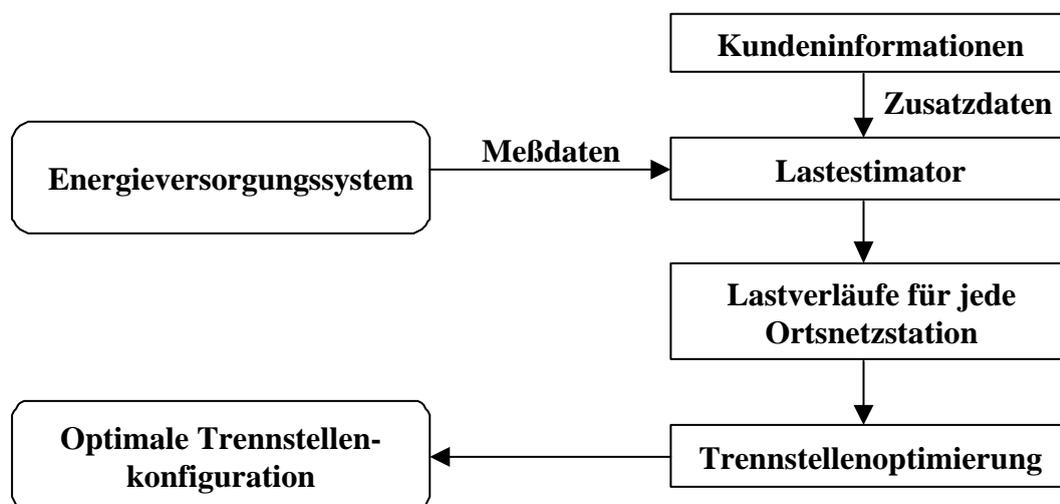
Aufgrund der bevorstehenden Liberalisierung der europäischen Strommärkte ist die Steigerung der Effizienz und Effektivität der Betriebsführung und Planung von Verteilungsnetzen eine zentrale Aufgabe der Netzbetreiber. Die Trennstellenoptimierung bietet eine Möglichkeit, um die bestehenden Netzressourcen besser auszuschöpfen bzw. die Netzkosten durch Minimierung der Netzverluste zu verringern.

Aufgabe der Trennstellen in Verteilungsnetzen ist die Überführung der ringförmig konzipierten Netze in Strahlennetze, um so die Vorteile einer einfachen und sicheren Netzbetriebsführung mit den Vorteilen einer schnellen Wiederversorgung im Fehlerfall

durch Verlagerung der Trennstellen zu kombinieren. Die Festlegung dieser Trennstellen wird im allgemeinen für den Maximallastzustand durchgeführt. Die Positionierung der Trennstellen wird für diesen Maximallastzustand so festgelegt, daß die Netzverluste minimal werden oder eine möglichst gleichmäßige Aufteilung der Lasten auf die entstehenden Leitungsstränge stattfindet.

Diese Vorgehensweise kann zu suboptimalen Lösungen führen, da die Topologie der Verteilungsnetze eine Vielzahl von verschiedenen Möglichkeiten zur Festlegung der Trennstellen bietet (kombinatorisches Problem) und der Maximallastzustand nur einen zeitlich begrenzten Ausschnitt der vollständigen Lastsituation darstellt. Hieraus leitet sich die Konsequenz ab, daß für den Maximallastzustand optimale Trennstellen nicht für einen größeren Optimierungszeitraum, z. B. ein Jahr, die optimale Trennstellenkonfiguration darstellen müssen.

Um die Trennstellenkonfiguration zu bestimmen, die für den Optimierungszeitraum eines Jahres zu minimalen Verlusten führt, ist ein Optimierungsverfahren entwickelt worden, welches auf typisierte Lastverläufe zurückgreift, die auf dem Konzept der multikriteriellen Lastmodellierung basieren. Die Lösung des kombinatorischen Problems der Trennstellenoptimierung wird mit genetischen Algorithmen durchgeführt. Bild 4.12 zeigt das Ablaufdiagramm zur Bestimmung optimaler Trennstellen in Verteilungsnetzen. Das zu optimierende Energieversorgungssystem stellt Meßdaten zur Verfügung, die unter Einbeziehung zusätzlicher Kundendaten, wie Jahresenergieverbräuche, etc., in einem Lastestimator zur Bestimmung von Lastverläufen für jede Netzstation herangezogen werden. Auf der Grundlage dieser modellierten Lastverläufe kann mit dem Algorithmus zur Trennstellenoptimierung die optimale Trennstellenkonfiguration ermittelt werden.

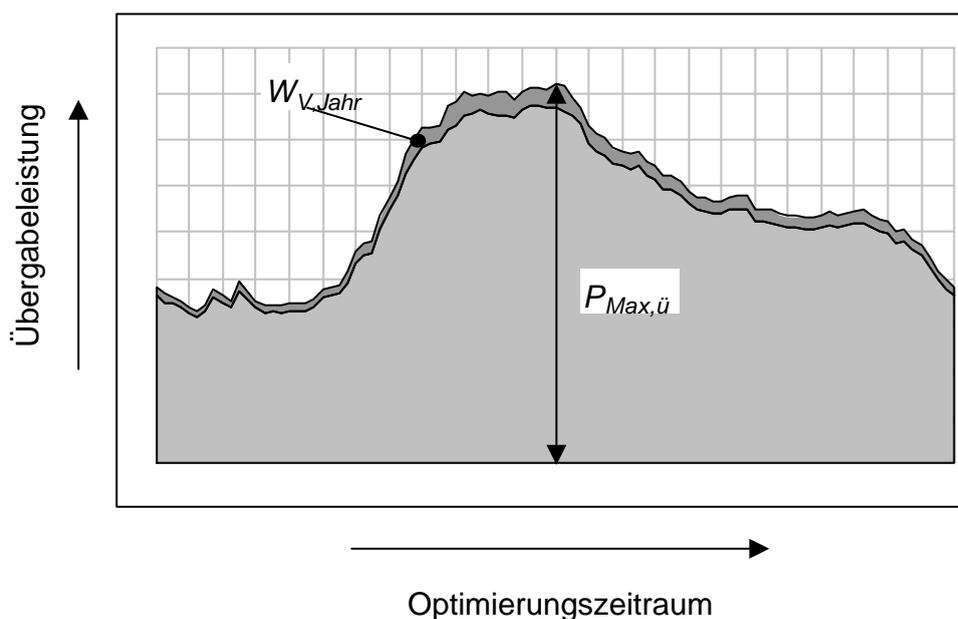


**Bild 4.12:** Ablaufdiagramm zur Bestimmung optimaler Trennstellen in Verteilungsnetzen

Die für den genetischen Algorithmus notwendige binäre Codierung der Steuergrößen, d. h. der Trennstellenpositionen, geschieht aufgrund des diskret vorliegenden Optimierungsproblems folgendermaßen: Eine eingelegte Trennstelle repräsentiert eine binäre 1 und eine ausgeschaltete Trennstelle eine binäre 0 im genetischen Muster. Im Rahmen der Rekombinations- und Mutationsprozesse der genetischen Algorithmen ist sicherzustellen, daß die Trennstellenkonfiguration zu keiner Versorgungsunterbrechung von Verbrauchern führt. Zusätzlich sind als Nebenbedingungen die Spannungsgrenzen nach DIN IEC 38 und die thermischen Belastungsgrenzen der Betriebsmittel einzuhalten.

Für die Optimierung stehen folgende Zielfunktionen zur Verfügung:

1. Minimierung der Jahresverlustenergie  $W_{v,Jahr}$  und der Minimierung der maximalen Übergabeleistung  $P_{max,ü}$  des vorgelagerten Netzes (Bild 4.13)
2. Minimierung des Spannungsbandes an den Netzstationen

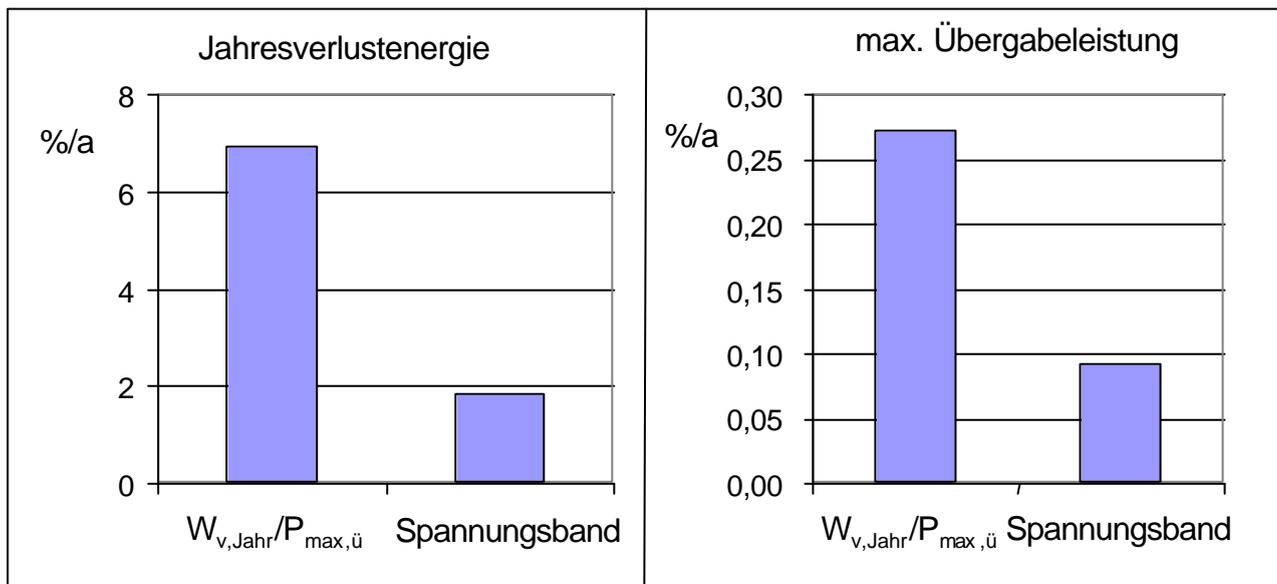


**Bild 4.13:** Definition der Jahresverlustenergie  $W_{v,Jahr}$  und der maximalen Übergabeleistung  $P_{max,ü}$

Beispielhaft ist die Trennstellenoptimierung für ein ländliches 150-knotiges 10-kV-Mittelspannungsnetz mit insgesamt 170 Leitungen durchgeführt worden. 19 Trennstellen sind in dem Netzbezirk notwendig, um die Netzstruktur in eine radiale Struktur zu überführen. Die in Bild 4.14 dargestellten Optimierungsergebnisse zeigen, daß für die Zielfunktion 1 (Minimierung der Jahresverlustenergie und der maximalen Übergabe-

leistung) durch die Trennstellenoptimierung eine Reduzierung der Jahresverlustenergie um 7 % und eine Reduzierung der maximalen Übergabeleistung um 0,27 % möglich ist. Hierzu sind 8 Trennstellen von den bestehenden 19 zu verlagern. Wird eine Optimierung des Spannungsbandes (Zielfunktion 2) durchgeführt, beträgt die Reduzierung der Jahresverlustenergie 2 % und die Reduzierung der maximalen Übergabeleistung 0,1 %.

Der hier vorgestellte Algorithmus zeigt nur einen Ausschnitt aus den insgesamt zur Verfügung stehenden Möglichkeiten. Als weitere Steuergrößen können in der Optimierung Blindleistungseinspeisungen durch FACTS-Betriebsmittel, BHKW oder Brennstoffzellen berücksichtigt werden. Zusätzlich ist eine Optimierung der Sollwertvorgaben des Hochspannungs-/Mittelspannungs-Transformator-Reglers im Umspannwerk sowie eine Optimierung der Stufenstellung der Netzstationstransformatoren möglich. Da zwischen den verschiedenen Steuergrößen Abhängigkeiten bestehen, wird eine gleichzeitige und nicht sequentielle Optimierung dieser Steuergrößen durchgeführt. Hierdurch wird im Gegensatz zur sequentiellen Optimierung der Steuergrößen die Wahrscheinlichkeit für das Auffinden des globalen Optimums stark erhöht.



**Bild 4.14:** Prozentuales Einsparpotential der Jahresverlustenergie und der maximalen Übergabeleistung für verschiedene Zielfunktionen

Die Optimierung der Steuergrößen erfolgt nicht nur für einen Netzbetriebszustand, z. B. dem Maximallastzustand, sondern die Zielfunktion bewertet typische Netzbetriebszustände eines Jahres. Dabei wird auf typisierte Lastverläufe zurückgegriffen, die der Lastestimator zur Verfügung stellt. Da die Zielfunktion aus Sicht der genetischen Algorithmen eine

externe Funktion bildet, ist die Bewertung der Netzbetriebszustände durch schnelle Methoden der Lastflußberechnung möglich.

Aufgrund der guten Parallelisierbarkeit von genetischen Algorithmen erfolgte die programmtechnische Umsetzung in Form eines Master-Slave Konzeptes. Aufgabe des Masters ist die Verwaltung der Individuen, Durchführung der Rekombinations- und Mutationsprozesse sowie Kommunikation mit den Slave-Prozessen. Auf den Slaves erfolgt die Bewertung der Individuen auf der Grundlage von Lastflußberechnungen. Sind ausreichend Prozessoren vorhanden, wie z. B. auf einem Parallelrechnersystem, ist eine schnelle Optimierung aller Steuergrößen durch das gewählte Master-Slave Konzept möglich.

Jörg Teupen

#### **4.2.3 Automatische Erzeugung von Fuzzy-Regeln in autonomen Regelungssystemen für FACTS**

FACTS-Geräte bieten generell eine erweiterte Steuerbarkeit elektrischer Energieübertragungssysteme. Je nach baulicher Ausführung besitzen sie die Eigenschaft, als Quer- und Längskompensation, Speicher, Hochspannungsgleichstromübertragung und Schrägeregler in elektrische Energieübertragungssysteme einzugreifen. Die Regeleingriffe können aufgrund des Einsatzes moderner Leistungselektronik in diesen Betriebsmitteln kontinuierlich und im Kurzzeitbereich erfolgen. Es ergeben sich dadurch unterschiedliche Einsatzgebiete im Bereich der schnellen Lastflußregelung, Spannungsregelung und Stabilitätsverbesserung.

Umfangreiche Systemstudien und der Einsatz von Prototyp-Entwicklungen von FACTS-Geräten in realen Netzen haben gezeigt, daß deren technische Vorteile nur in Verbindung mit einer gezielten Erweiterung der Schutz- und Leittechnik gewinnbringend ausgenutzt werden können. Bei einer unzureichenden Adaption der erweiterten Regeleingriffe durch FACTS-Geräte an wechselnde Betriebssituationen oder Fehlerzustände im Energieversorgungssystem ist eine erhebliche Verschlechterung des dynamischen Verhaltens und eine Gefährdung des sicheren stationären Betriebes zu erwarten. Im folgenden sind konkrete Fehler-Ereignisse und Änderungen des Betriebszustandes aufgelistet, die als kritisch in Verbindung mit dem Einsatz von FACTS-Geräten in Energieversorgungssystemen einzustufen sind. Sie erheben die Forderung nach ereignisorientierten koordinierenden Adaptionen der lokalen Betriebsmittelregelungen und Sollwerte zur Abwendung von Gefährdungen der stationären und dynamischen Netzsicherheit.

- ?? Beim Einsatz von leistungsflußregelnden Betriebsmitteln und querkompensierenden Betriebsmitteln zur Spannungsregelung müssen beim Ausfall eines querkompensierenden Betriebsmittels schnelle Sollwertanpassungen der leistungsflußregelnden Betriebsmittel erfolgen, um eine Verletzung der zulässigen Spannungsgrenzen zu verhindern.
- ?? Ein leistungsflußregelndes Betriebsmittel befindet sich durch den Ausfall eines Übertragungselementes in einer Regelmasche, in der sich ein weiterer leistungsflußgeregelter Leitungszug befindet, so daß kein Ausgleich der Verschiebung des Wirkleistungsflusses existiert. In diesem Falle muß mindestens ein leistungsflußregelndes FACTS-Gerät deaktiviert werden.
- ?? Ein leistungsflußgeregelter Leitungszug fällt aus. In diesem Fall müssen die Sollwerte anderer Betriebsmittel neu berechnet werden, um Leitungsüberlastungen und Versorgungsengpässen entgegenzuwirken.
- ?? Durch den Ausfall eines Betriebsmittels in einer Regelmasche können Überlastungen anderer Betriebsmittel entstehen, sofern keine Sollwertänderung der im Betrieb befindlichen leistungsflußregelnden Betriebsmittel erfolgt.
- ?? Vergrößerungen der Verbraucher-Lasten können bei aktiver Turbinenregelung und Leistungs-Frequenz-Regelung einer oder mehrerer Kraftwerke zu Betriebsmittelüberlastungen führen, sofern mit der Übertragung von Regelleistung die Soll-Leistungsflüsse für FACTS-Geräte nicht angepaßt werden. In diesem Zusammenhang müssen jedoch die Konditionen für die vertraglich geregelten Energielieferungen in deregulierten Energieversorgungssystemen beachtet werden.
- ?? Durch das sehr schnelle Reaktionsverhalten von FACTS-Geräten und deren lokaler Regelungen werden nach einer Veränderung des Betriebszustandes oftmals alle Regelungen aktiv. Dadurch kann es zu einer ungewollten negativen Beeinflussung mehrerer Regler kommen, da diese jeweils nur eng begrenzte Aufgaben erfüllen, die zeitlich unabhängig voneinander ablaufen sollen. Daher müssen die in jedem Zeitbereich wichtigen Regelungsaufgaben ausgewählt und andere Regler währenddessen deaktiviert werden (zeitliche und funktionale Entkopplung der Teilregler). Tritt z. B. ein Kurzschluß im Regelungspfad auf, so müssen die Arbeitspunktregelungen verlangsamt werden, um starke Leistungspendelungen zu verhindern, die durch eine zu rasche Reaktion der Arbeitspunktregelungen entstehen können.

?? Bei einer starken Veränderung des Betriebszustandes, beispielsweise der Wechsel vom Stark- zum Schwachlastfall, müssen die Regler-Parameter der FACTS-Geräte neu angepaßt werden.

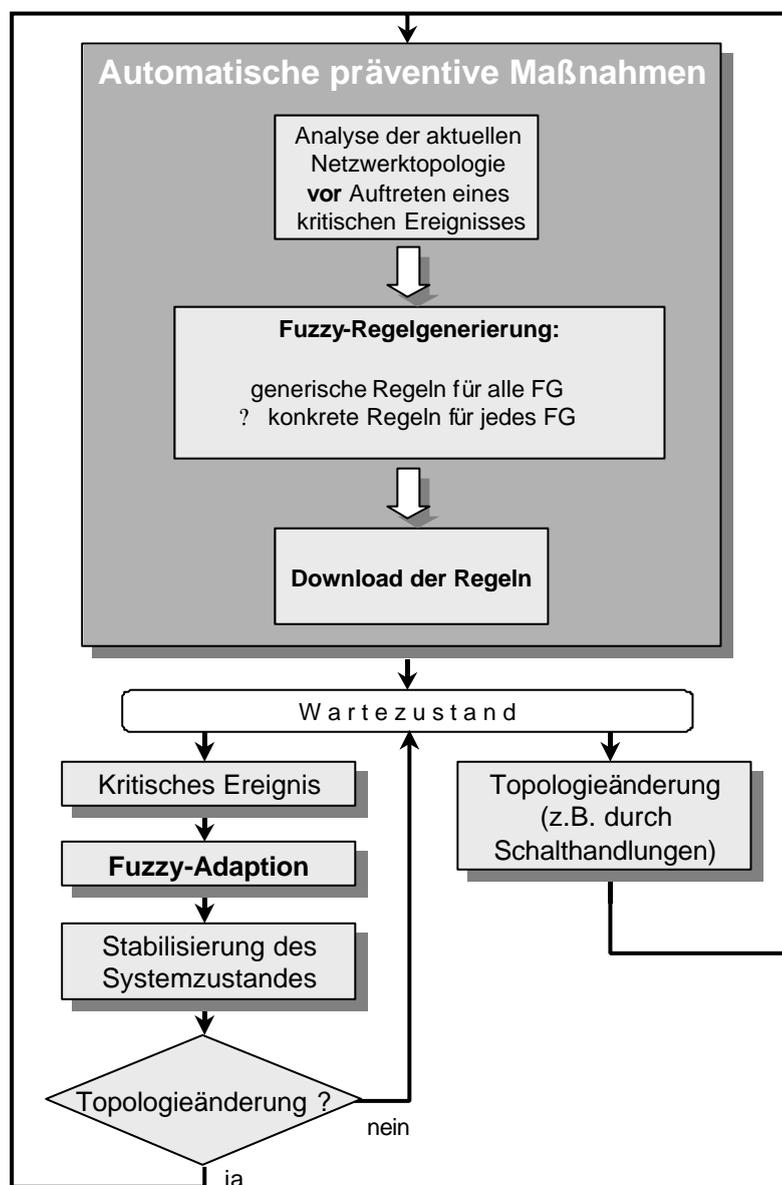
Das Konzept der autonomen Systeme wird verwendet, um diese erforderlichen koordinierenden Maßnahmen der Betriebsmittelregelungen für FACTS-Geräte automatisiert ablaufen zu lassen. Bestehende leittechnische Komponenten werden dazu um dezentral angeordnete intelligente Funktionen erweitert, die die oben beschriebenen Aufgaben automatisch umsetzen.

**Tabelle 4.3:** Handlungsanweisungen in Form generischer Regeln für FACTS-Geräte (FG)

	WENN	DANN
1	Ausfall eines querkompensierenden FG	Berechne neue Sollwerte für leistungsflußregelnde FG
2	Regelungsaufgabe überbestimmt	Deaktiviere Arbeitspunkt-Regelungen
3	Ausfall eines leistungsflußgeregelten Leitungszuges	Berechne neue Sollwerte für leistungsflußregelnde FG
4	Auftritt einer großen Störung (z.B. Kurzschluß) im Einflußbereich eines FG	Führe zeitliche Trennung der Regeleingriffe durch
5	Ausfall eines Übertragungselementes in einer Netzmasche, die ein leistungsflußregelndes FG enthält	Berechne neue Sollwerte für leistungsflußregelnde FG
6	Anstieg der Verbraucher-Lasten und Gefahr einer Betriebsmittelüberlastung	Berechne neue Sollwerte für leistungsflußregelnde FG
7	Veränderung des Betriebszustandes	Adaptiere Reglerparameter

Aus den o. g. Teilaufgaben läßt sich eine Zusammenstellung sogenannter generischer Regeln ableiten, die als globale und abstrakte Handlungsanweisungen ohne konkreten Bezug zu bestimmten Betriebsmitteln aufgefaßt werden können. Generisches Wissen kann durch Aussagen formuliert werden, deren Bedingungen statt örtlich fest definierter Meßwerte allgemeingültig typische kritische „Muster“ von Daten beschreiben. Diese Regeln sind in Tabelle 4.3 zusammengestellt. Unter Kenntnis dieser allgemeinen generischen Regeln muß ein autonomes Regelungssystem nun speziell für ein Energieübertragungssystem mit integrierten FACTS-Geräten eine automatische Generierung von Ereignis-Reaktions-Mustern auf der Stationsleitebene durchführen. Damit ist eine Erzeugung von direkt für die FACTS-Geräte zutreffenden ereignisorientierten Handlungsanweisungen

gemeint, die an zu bestimmende FACTS-Geräte weitergegeben werden und dort mit einem Inferenzmechanismus zur Ausführung gelangen können. Diese automatische Regelgenerierung geschieht nun in Abhängigkeit der vorgegebenen Netztopologie und Einbauorte der FACTS-Geräte und liefert aus den bekannten generischen Regeln eine vollständige konkrete Regelbasis für Fuzzy-Module, die adaptiv in die lokalen Betriebsmittelregelungen eingreifen. Dazu müssen im wesentlichen die bekannten generischen Regeln sowohl für ihre Prämissen als auch für ihre Konklusionen betriebsmittelbezogen indiziert werden. Nachdem die Übermittlung der notwendigen Eingangsinformationen zur Auswertung der Regeln an dezentraler Stelle sichergestellt ist, können sie schließlich als Regelbasen in Fuzzy-Modulen abgelegt und angewendet werden.



**Bild 4.15:** Ablauf der ereignisorientierten Anpassung an neue Betriebszustände

Bild 4.15 zeigt die Einbindung der automatischen Fuzzy-Regelgenerierung in den schematischen Ablauf der ereignisorientierten Anpassung der FACTS-Regelungen. Da im gestörten Betriebszustand aufgrund der kurzen Antwortzeiten der FACTS-Geräte die korrigierenden Eingriffe durch Anwendung der Handlungsregeln ebenfalls schnell ablaufen müssen, muß die topologieabhängige Generierung der Regeln vor dem Eintritt möglicher Störungen (kritischer Ereignisse) geschehen und im Falle einer gewollten Topologieänderung aktualisiert werden (Prävention). Da durch das Auftreten eines kritischen Ereignisses, z. B. eines permanenten Ausfalls eines Betriebsmittels, eine Änderung der aktuellen Netztopologie hervorgerufen werden kann, müssen in diesem Falle nach erfolgter Adaption und Stabilisierung des Systemzustandes für eventuelle in der Zukunft auftretende Ereignisse die Regelbasen aktualisiert werden.

C. Becker

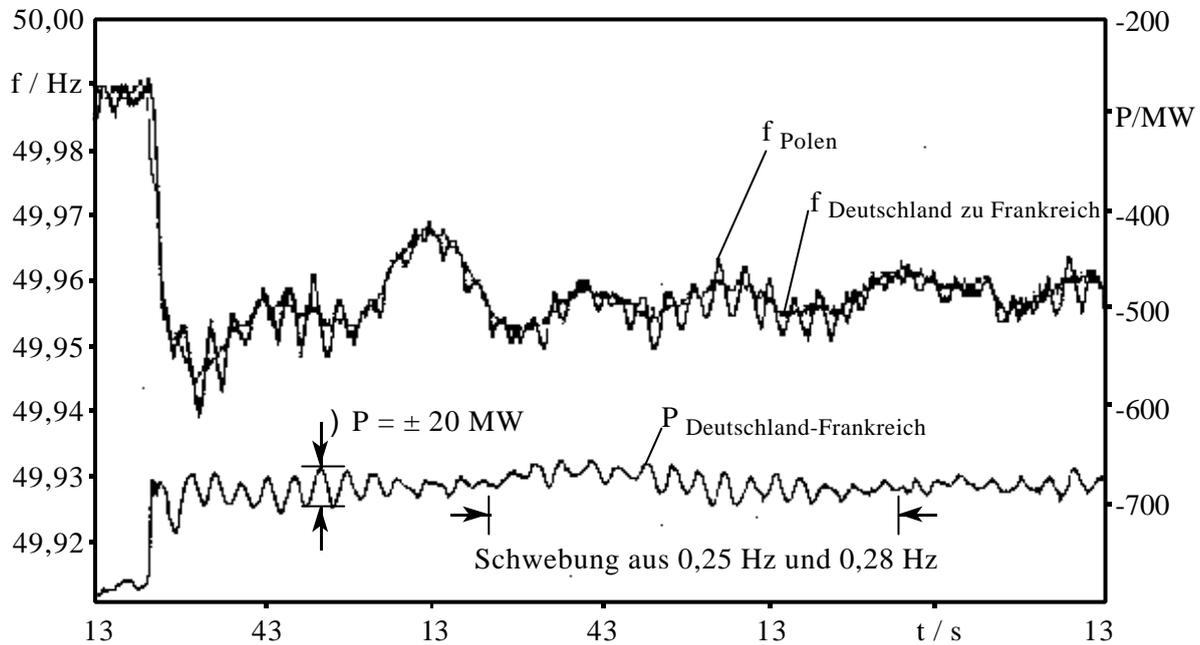
Dieses Forschungsprojekt wird durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert.

#### **4.2.4 Systemimmanente Schwingungen ausgedehnter Energieübertragungssysteme**

In ausgedehnten Verbundsystemen treten Schwingungsphänomene auf, die bei Simulationsrechnungen zu Planungszwecken nicht festgestellt wurden. Ein Beispiel hierzu ist die Anbindung des CENTREL-Netzes an den UCPTE-Netzverbund. Bei Störungen oder Schaltmaßnahmen in Netzteilbereichen des UCPTE-Netzes traten bislang Schwingungen allein des betreffenden Netzbezirkes gegenüber dem übrigen Gesamtnetz auf, die gedämpft und unkritisch waren. Durch die Erweiterung hat sich die Schwingungscharakteristik dahingehend gewandelt, daß Netzteilbereiche gegeneinander bei geringer Dämpfung schwingen können. Ein, im gegenwärtigen System dominanter, Schwingungszustand erfolgt zwischen Spanien und Polen mit Leistungspendelungen durch den deutschen Netzbezirk. Bild 4.16 stellt die Messung einer solchen Schwingung nach einem Kraftwerksausfall in Frankreich anhand der Frequenzen in Polen und an der deutsch-französischen Grenze zusammen mit der Austauschleistung zwischen Deutschland und Frankreich dar.

In der Literatur sind dynamische Simulationen anhand der gezeigten und weiterer Messungen ausgewählter großer Störungen durch Betriebsmittel- oder Kraftwerksausfälle nach Ereigniseintritt vorgestellt. Durch eine Parameteranpassung der Modelle sind die Schwingungen mit Übereinstimmung zur Realität modelliert worden. Die Nachbildung der Ereignisse im Modellsystem und der Realität ist somit möglich, wobei jedoch der

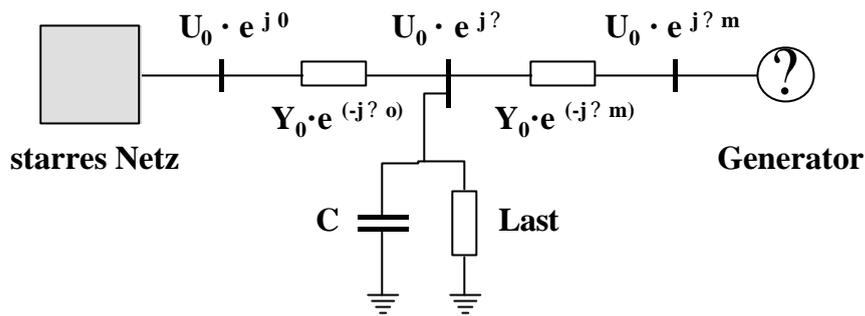
Zusammenhang zwischen Modellsystem und realem System verlorengeht. Die Parameter von Modellsystem und Realität stimmen nicht mehr überein und das Modell gilt nur für den einen nachgebildeten Fall.



**Bild 4.16:** Aufzeichnung von Frequenz und Austauschleistung für einen 1300-MW-Kraftwerksausfall in Frankreich am 23.01.1997

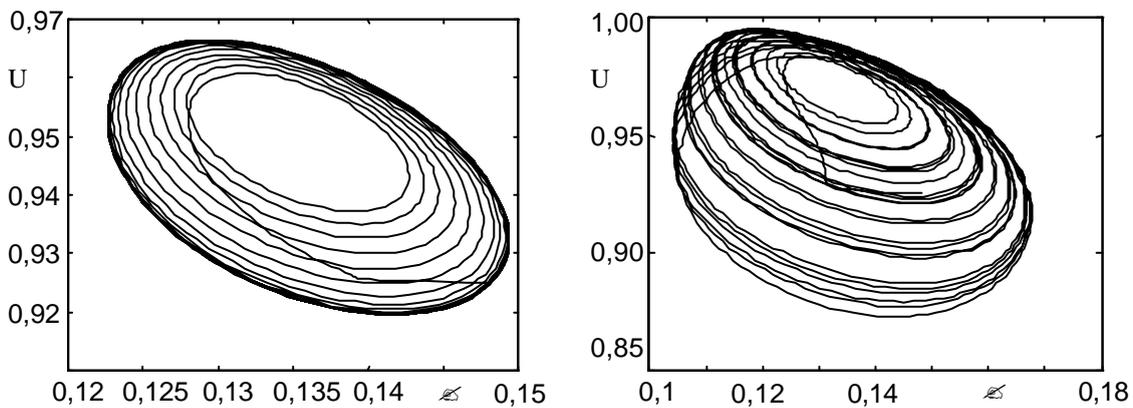
Zu Planungszwecken wird ein Modellsystem direkt aus dem realen System erstellt. Hierbei werden die gezeigten Schwingungserscheinungen nicht nachgebildet, so daß Planungsrechnungen in diesem Bereich bislang wenig aussagekräftig sind. Schwingungen werden meist aufgrund der Reglerparametrierungen und nicht als systemimmanent im Sinne einer festen Systemeigenschaft untersucht. Dieses führte zum Beispiel im UCPT-System dazu, daß nach Abhilfemaßnahmen im Bereich der Reglercharakteristik gesucht wurde, die jedoch nicht zum gewünschten Erfolg führten.

Ziel dieser Forschungsarbeit ist, eine weitergehende Analyse der Schwingungsproblematik im Bereich systemimmanenter Schwingungen durchzuführen. Anhand der mathematischen Beschreibung mittels der Bifurkationstheorie sind diese systemimmanenten Schwingungen getrennt von Schwingungen aufgrund unzureichender Regelungsanpassung zu analysieren. Anhand der Bifurkationstheorie können Beispiele systemimmanenter Schwingungen von Modellsystemen herausgearbeitet und deren Last- bzw. Parameterempfindlichkeit verdeutlicht werden. Ein einfaches Energieversorgungssystem gemäß Bild 4.17 dient als Ausgangsbasis zur Darstellung systemimmanenter Schwingungen, die außerhalb der Problematik von Schwingungen durch fehlparametrierte Regler liegen.



**Bild 4.17:** Beispielsystem zur Darstellung systemimmanenter Schwingungen

Neben einem starren Netz wird eine weitere Einspeisung mittels der Schwingungsgleichung eines Ersatzgenerators modelliert. Unter Verwendung eines speziellen Lastmodells aus zusammengefaßten Induktionsmotoren und einer Parallelimpedanz ergibt sich das systembeschreibende Gleichungssystem. Wird mit dieser Systembeschreibung eine dynamische Simulation durchgeführt, so ergeben sich bei der Einstellung bestimmter eng umgrenzter Parametersätze für Grundlasten, Zeitkonstanten und Verstärkungsfaktoren des Lastmodells Schwingungszustände gemäß Bild 4.18. Dargestellt sind Beispiele einer harmonischen Kreistrajektorie und einer chaotischen Trajektorie innerhalb eines Attraktionsgebietes im Zustandsraum.



**Bild 4.18:** Harmonischer und chaotischer Grenzyklus als Kreistrajektorie zwischen Spannungsbetrag und -winkel

Die mathematische Beschreibung und Analyse solcher Schwingungsphänomene kann mittels der Bifurkationstheorie erfolgen. Wird aus dem beschreibenden Differentialgleichungssystem die zugehörige Jakobimatrix  $J_{\text{sys}}$  gebildet, so ist ein Bifurkationstypus gegeben, wenn die Realteile eines konjugiert komplexen Eigenwertpaares  $\lambda_{1,2}$  von  $J_{\text{sys}}$  zu

Null werden, während alle anderen Eigenwerte  $\lambda_{3..n}$  ihre negativen Realteile beibehalten. Diese sogenannte Hopf-Bifurkation kann bei Variation einzelner Systemparameter aus einem stabilen Zustand heraus auftreten. Dieses hat zur Folge, daß sich Oszillationen der Zustandsgrößen, sogenannte Grenzzyklen, wie gezeigt im System einstellen.

Im Falle praktisch auftretender Oszillationen ändert sich die Art des Gleichgewichtszustandes von stabil zu quasi-stabil, so daß die Kreisbahn erreicht werden kann. Dieser Vorgang wird als superkritisch bezeichnet. Bereits geringe Parameteränderungen sind als auslösende Ereignisse ausreichend. Bleibt der Gleichgewichtszustand jedoch stabil und wird von einer instabilen Kreistrajektorie umgeben, so wird diese Art der Hopf-Bifurkation als subkritisch bezeichnet. Es besteht hier die Gefahr, daß bei Auslenkungen aufgrund einer Systemstörung, die in den Bereich außerhalb der instabilen Kreistrajektorie führen, das System kollabiert.

Das Ziel bei der Untersuchung derartiger Schwingungszustände besteht darin, herauszufinden, ob diese innerhalb erreichbarer Gebiete im Parameterraum auftreten können. Bisherige dynamische Simulationen gehen bei diesen Schwingungen von Fehlparametrierungen der Modelle bzw. der Regler aus und lassen derartige Zustände unberücksichtigt. Die obigen Beispiele der Messung und Simulation zeigen jedoch, daß diese Schwingungen mögliche quasi-stabile Zustände des Systems sind. Zur Analyse dieser Zustände ist zu berücksichtigen, daß nach dem Auftreten einer Hopf-Bifurkation ein geändertes Phasenportrait des Systems vorliegt. Eine instabile Lösung des Gleichungssystems wird von einer zyklischen Trajektorie umgeben. Aufgrund dieser Tatsache ist eine Linearisierung des Systems und damit eine Eigenwertbetrachtung nicht mehr in einfachem Sinne möglich. Hier muß mit Verfahren der Bifurkationstheorie die Stabilität der Schwingungstrajektorie bestimmt werden.

Innerhalb dieses Forschungsvorhabens erfolgt zunächst die mathematische Aufarbeitung der Schwingungsproblematik anhand der Bifurkationstheorie. Anschließend werden die Analyseverfahren der Bifurkationstheorie in eine dynamische Simulationsumgebung implementiert. Danach erfolgt die Nachbildung und Analyse realer, zu erweiternder Energieübertragungssysteme anhand derer geeignete Modelle zur Nachbildung von System-schwingungen entwickelt werden. Abschließend ist somit eine Systembeschreibung und -analyse unter Berücksichtigung systemimmanenter Schwingungen möglich.

A. Sarasua, C. Rehtanz

Der wissenschaftliche Aufenthalt von Herrn Sarasua wird vom Deutschen Akademischen Austauschdienst (DAAD) gefördert.

## **4.3 Schutz- und Leittechnik**

### **4.3.1 Wirtschaftliches Batteriemangement für den Spitzenlastausgleich**

Dieses Forschungsvorhaben setzt sich mit dem Einsatz von Batterieanlagen im Leistungsbereich von bis zu 5 MW bei Einsatzzeiten von bis zu 2 h in elektrischen Energieversorgungsnetzen auseinander. Der Schwerpunkt der Arbeit lag auf der Entwicklung von Strategien zur wirtschaftlichen Auslegung, Einsatzplanung und zum Management von Batteriesystemen zur Reduktion von Leistungsbezugsspitzen.

Im Rahmen der dreijährigen Forschungsarbeit sind im ersten Projektjahr rechnergestützte Planungsmethoden entwickelt worden, die zur Ermittlung des wirtschaftlichen Absenkpentials des Leistungsbezugs durch Batterieanlagen und somit zur Auslegung derartiger Systeme führen. Die erzielten Ergebnisse werden anhand einer Herausarbeitung des Spannungsfeldes aus Investitionskosten für Batterieanlagen einerseits und aus Stromkostensparnissen andererseits aufgezeigt. Es zeigt sich, daß die wirtschaftliche Attraktivität dieses Einsatzkonzeptes allein zur Reduktion von Leistungsbezugsspitzen aufgrund der Investitionsrisiken zu Beginn der Realisierung als eher mäßig zu beurteilen ist. Durch die Integration weiterer Funktionen in den Betrieb der Batterieanlage läßt sich dieses wirtschaftliche Einsatzpotential signifikant erhöhen.

Den ersten Ergebnissen Rechnung tragend sind im zweiten Projektjahr in das leittechnische Speicherkonzept neben der Leistungsbezugsreduktion Funktionen zur unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV) sowie zur Kompensation von Netzurückwirkungen (NR) durch eine dem Leitsystem unterlagerte Echtzeitregelung des Netzstromrichters integriert worden. Während das Konzept des modular aufgebauten Prozeßleitsystems für das Management der Batterieanlage zur Leistungsbezugsreduktion um eine Komponente für den USV-Betrieb der Anlage leicht zu erweitern ist, bringt die Einbeziehung der NR-Kompensation sehr hohe Anforderungen an die Verarbeitungsgeschwindigkeit der Regelgrößen mit sich. Entsprechend bildet diese, dem Prozeßleitsystem unterlagerte Komponente mit dem Umkehrstromrichter die aktive Netzfiltereinheit (ANE) des Energiespeichers.

Aufbauend auf dem im zweiten Projektjahr konzeptionell entwickelten Prozeßleitsystem ist im dritten Projektjahr die Realisierung der leittechnischen Komponenten erfolgt, wobei die simulatorisch getestete aktive Netzfiltereinheit mit in das Managementkonzept integriert worden ist. Parallel zu diesen Arbeiten wurde von der EUS GmbH, Gelsenkirchen, die mit dem Lehrstuhl im Rahmen eines Kooperationsvertrages einen Technologietransfer unterhält, eine 1,2MW/1,2MWh Bleibatterieanlage am Standort Herne zur Reduktion von

Leistungsbezugsspitzen errichtet. Dabei ist die in diesem Forschungsvorhaben realisierte Prozeßleittechnik im Anlagenmanagement implementiert und im ersten Betriebsjahr der Batterieanlage validiert worden. Zur Umsetzung dieser Forschungsergebnisse sowie zum Nachweis des Praxisbezugs und der Anwendbarkeit ist die erforderliche Automatisierungs- und Rechnertechnik inkl. der Entwicklungsumgebung konzeptionell erarbeitet und realisiert worden.

Markus Schröder, Jörg Teupen

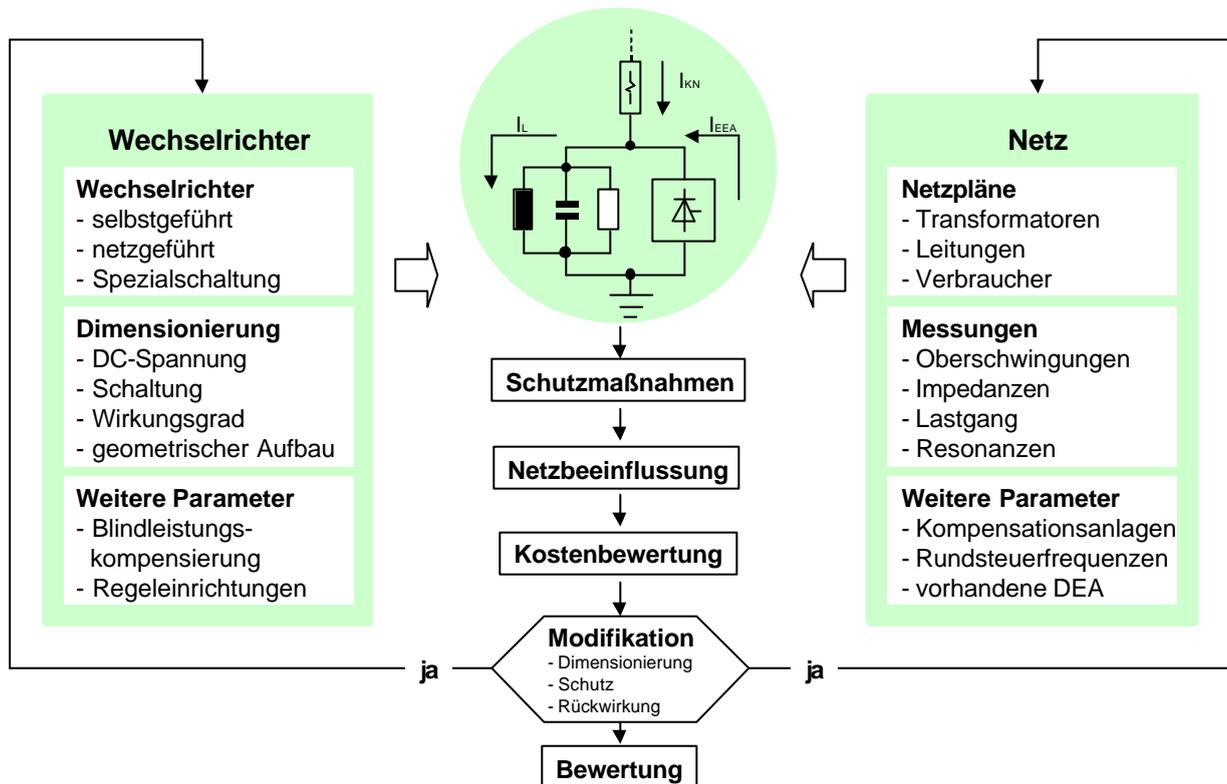
Diese Projekt wurde durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert und in enger Zusammenarbeit mit der EUS GmbH, Gelsenkirchen durchgeführt.

#### **4.3.2 Integration von innovativen und regenerativen Eigenerzeugungsanlagen in das elektrische Niederspannungsnetz**

Der Anschluß von dezentralen Energieumwandlungsanlagen an das öffentliche Niederspannungsnetz wird in den technischen Anschlußbedingungen (TAB) der Energieversorgungsunternehmen geregelt, die sich an den von den VDEW herausgegebenen „Richtlinien für den Parallelbetrieb von Eigenerzeugungsanlagen mit dem Niederspannungsnetz des Elektrizitätsversorgungsunternehmen EVU“ orientieren. Dabei wird der Anschluß in Abhängigkeit von den gegebenen Netzverhältnissen, der Leistung, der Betriebsweise sowie dem Interesse des Betreibers vom EVU festgelegt. Zur Beurteilung der Anschlußmöglichkeit mehrerer Eigenerzeugungsanlagen (EEA) an einer Ortsnetzstation ist diese Richtlinie nicht ausreichend. In Bezug auf Netzurückwirkungen werden zum Beispiel Oberschwingungen nur bis zur 50. Ordnung betrachtet. Der Einsatz neuer Wechselrichter, welche mit Taktfrequenzen oberhalb von 5 kHz arbeiten, verursacht allerdings hochfrequente Einkopplungen, welche durch Superposition mehrerer Anlagen zu Störungen des Netzbetriebes führen können. Außerdem sind die heute eingesetzten Freischalteinrichtungen bei Anschluß mehreren EEA in einem Netzbezirk aufgrund des angewandten Meßprinzips nicht geeignet. Ziel dieses Projektes ist es deshalb, die bestehende Normung hinsichtlich der Integration von mehreren EEA aufgrund der oben genannten Nebenbedingungen zu erweitern.

Um die Auswirkungen auf das Niederspannungsnetz durch die Integration von wechselrichtergetriebenen Eigenerzeugungsanlagen beurteilen zu können, sind sowohl leistungs-

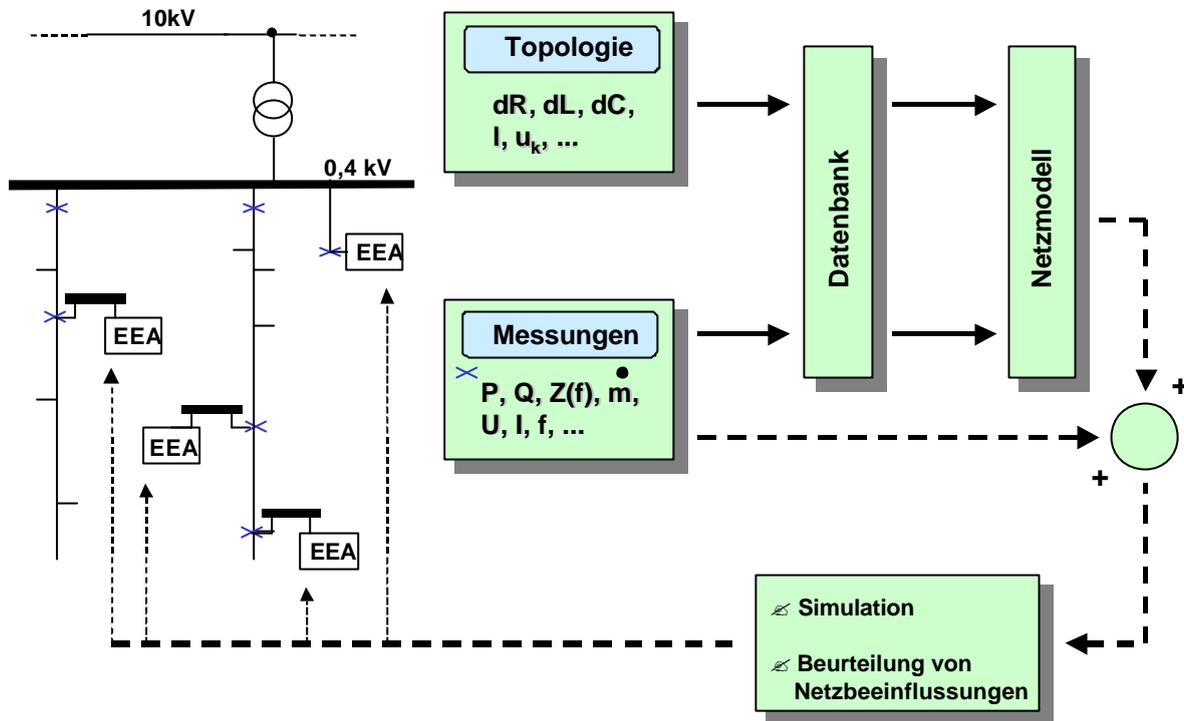
elektronische wie auch energietechnische Aspekte zu betrachten (Bild 4.19). Die dabei gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich spezieller Problemstellungen haben durch die Kopplung, EEA am Verknüpfungspunkt, direkten Einfluß auf den Fortgang der Entwicklung. Da somit die in der Praxis gesammelten Erfahrungen direkt die Entwicklung geeigneter Netzeinspeisungen und Schutztechniken erlaubt, können technologische und netzbedingte Grenzwerte anhand von Meßdaten aufgezeigt, ausgewertet und umgesetzt werden. Als Anschlußbedingungen definiert, könnten diese in Normen und Richtlinien zum Anschluß aktueller EEA-Technologie aufgenommen werden.



**Bild 4.19:** Energietechnische und leistungselektronische Arbeitpunkte

Zur Zeit werden deshalb Messungen in typischen Ortsnetzen und bei repräsentativen Verbrauchergruppen durchgeführt. Zusätzlich zu den Wirk- und Blindleistungen werden dabei Netzurückwirkungen wie Oberschwingungen, Flicker und Netzunsymmetrien gemessen. Weiterhin wird die spektrale Netzimpedanz bis zu einer Frequenz von 20 kHz an ausgesuchten Netzknoten erfaßt, da sie die Bewertung der Ausbreitung von Netzeinflussungen im Niederspannungsnetz ermöglicht. Diese Meßdaten werden durch die aus den Kabelplänen der EVU entnommenen Topologiedaten ergänzt und in einer relationalen Datenbank gespeichert. Parallel zu den elektrischen Messungen werden Wärmebedarfsmessungen (z.B.: Gasmengenmessungen) im Hinblick auf wärmegeführte EEA

durchgeführt und archiviert. Hieraus läßt sich dann über die Wirkungsgrade bzw. Kennlinien derartiger EEA die erzeugbare elektrische und thermische Energie abschätzen.



**Bild 4.20:** Ausgewählte Meßpunkte

Aufbauend auf dieser Netzdatenbank ist dann ein Modell zu erstellen, welches die zukünftige Niederspannungsnetzsituation mit einer Vielzahl von EEA beschreibt (Bild 4.20). Im folgenden sollen Netzsimulationen ausgeführt und durch Netzversuche im realen Niederspannungsnetz mit verschiedenen Wechselrichtersystemen und unterschiedlichen Verknüpfungspunkten verifiziert werden. Außerdem sind auf Basis der ermittelten elektrischen und thermischen Energiemengen Wirtschaftlichkeitsrechnungen für unterschiedliche dezentrale Energieversorgungssituationen im Niederspannungsnetz durchführbar, was insbesondere vor dem Hintergrund des deregulierten Marktes von Interesse ist.

W. Horenkamp, Th. Wiesner

EV 9812, EV 9845

Dieses Forschungsvorhaben wird vom Ministerium für Schule, Weiterbildung, Wissenschaft und Forschung (MSWWF) des Landes Nordrhein-Westfalen gefördert und in enger Kooperation mit dem Lehrstuhl für Elektrische Maschinen, Antriebe und Leistungselektronik (MAL) der Universität Dortmund durchgeführt.

### 4.3.3 Spektrales Leistungsmeßsystem für elektrische Energieversorgungsnetze

Vor dem Hintergrund der Liberalisierung des Energiemarktes ist für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit von elektrischen Anlagen im Verteilungsnetz u.a. die Kenntnis von typischen Verbraucherkurven (TVK) notwendig. Bislang wurden in den meisten Fällen die Stromeffektivwerte betrachtet, und daraus anhand spezieller Modellierungsverfahren die TVK berechnet. Zukünftig enthalten die Kosten für den Betrieb elektrischer Anlagen anteilig auch den Aufwand für Einrichtungen zur Kompensation von Oberschwingungsleistung im Netz. Die Erfassung und Analyse der spektralen Wirk- und Blindleistungsflüsse ist somit eine weitere wichtige Voraussetzung für eine nach dem Verursacherprinzip geregelte Kostenverteilung. Zur Erfassung und Bewertung der spektralen Leistungsgrößen ist ein Mehrkanal-Meßsystem mit den in Tabelle 4.4 aufgeführten Spezifikationen verwirklicht worden. Dabei wurde besonderer Wert auf eine zweckmäßige Speicherung der Meßdaten sowie einer ausreichenden Bandbreite für das zu betrachtende Frequenzspektrum gelegt.

**Tabelle 4.4:** Meßgrößenübersicht

<b>Meßgrößen</b>	<b>Bemerkungen</b>
$U_{\text{eff}}$	<b>2048 Werte pro Mittelung Speicherung min / max / mittel</b>
$I_{\text{eff}}$	<b>2048 Werte pro Mittelung Speicherung min / max / mittel</b>
$S$	<b>aus <math>U_{\text{eff}}</math> und <math>I_{\text{eff}}</math> Speicherung min / max / mittel</b>
$P$	<b>2048 Werte pro Mittelung Speicherung min / max / mittel</b>
$P_{\text{spektral}}$	<b>Auflösung bis 99. Oberschwingung Speicherung min / max / mittel / spektral</b>
$Q$	<b>aus <math>P</math> und <math>S</math> Speicherung min / max / mittel</b>
$Q_1$	<b>2048 Werte pro Mittelung Speicherung min / max / mittel</b>
$Q_D$	<b>Aus <math>P</math>, <math>S</math> und <math>Q_1</math> Speicherung min / max / mittel</b>
?	<b>aus <math>P</math> und <math>S</math> Speicherung min / max / mittel</b>
<b>Zeitintervall</b>	<b>Kleinster Meßzyklus 1s für alle Intervalle</b>

Ausgehend von der Definition der elektrischen Leistung wird nachfolgend eine Betrachtung mit Oberschwingungsbehafteten Netzgrößen durchgeführt. In den elektrischen Netzen berechnen sich die Effektivwerte von Spannung und Strom nach (4.2) und (4.3). Dabei ist  $I_d$  der Verzerrungsstrom.

$$U_{\text{eff}} = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} U_k^2} \quad (4.2)$$

$$I_{\text{eff}} = \sqrt{I_1^2 + I_d^2} \quad \text{mit} \quad I_d = \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_k^2} \quad (4.3)$$

Die Wirkleistung  $P$  wird in einzelne Frequenzordnungen zerlegt (4.4).

$$P = \sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \cos \varphi_k \quad (4.4)$$

Bei der Blindleistung fällt diese Unterscheidung nicht so detailliert aus. Hier sind vielmehr nur drei Blindleistungen zu betrachten, nämlich die Grundschwingungs-Verschiebungs-Blindleistung  $Q_1$  (4.5), die Verzerrungs-Blindleistung  $Q_d$  (4.6) und die Gesamt-Blindleistung  $Q_{\text{tot}}$  (4.7).

$$Q_1 = U_1 I_1 \sin \varphi_1 \quad (4.5)$$

$$Q_d = U_{\text{eff}} I_d \quad (4.6)$$

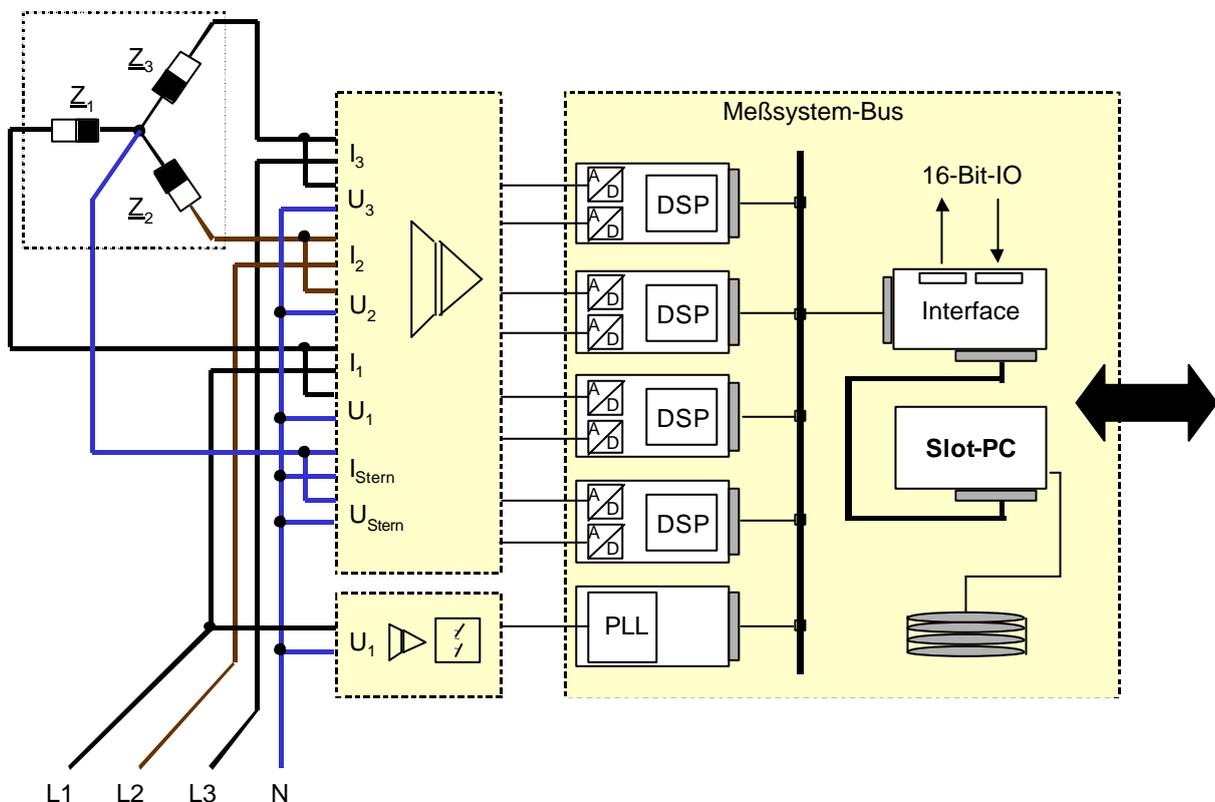
$$Q_{\text{tot}} = \sqrt{Q_1^2 + Q_d^2} \quad (4.7)$$

Die Scheinleistung  $S$  setzt sich demnach aus drei Leistungskomponenten zusammen (4.8), welche unterschiedliche Betrachtungen im Frequenzbereich ermöglichen.

$$S = \sqrt{P^2 + Q_1^2 + Q_d^2} \quad (4.8)$$

Die Definition des Leistungsfaktors  $\cos \varphi$  behält auch weiterhin ihre Gültigkeit. Die einzelnen Faktoren  $\cos \varphi_k$  werden in Zukunft mit dem Begriff Verschiebungsfaktor bezeichnet. Angaben über den Grundschwingungs-Verschiebungsfaktor sind dann mit  $\cos \varphi_1$  zu machen. Die oben genannten Gleichungen bilden die Basis für die Berechnung der spektralen Leistungsarten.

Ausgehend von den Forderungen lt. Tabelle 4.4, vor allem im Bezug auf die notwendige Auflösung im Spektralbereich, wurde das Meßsystem mit digitalen Signalprozessoren (DSP) in Verbindung mit einem PC als Host-Rechner aufgebaut. Die hohe Ausführungsgeschwindigkeit verbunden mit einer modifizierten Harvard-Architektur und einem speziellen Rechenwerk, mit welchem Integralberechnungen im Systemtakt durchführbar sind, machen die DSP für diese Aufgabe interessant. Die Arbeitsteilung der beiden Komponenten DSP und PC gestaltet sich derart, daß der DSP die komplette Meßdatenerfassung und -verarbeitung übernimmt und die Ergebnisse dem PC über eine spezielle Schnittstelle zur Verfügung stellt (Bild 4.21).



**Bild 4.21:** Blockschaltbild des spektralen Leistungsmeßsystems

Die obere Signalfrequenz des Meßsystems beträgt 5 kHz. Oberschwingungen und hochfrequente Störungen lassen sich bis zu einer Ordnung von  $n=100$  erfassen. In Verbindung mit einem Mittlungsintervall von 1s ist somit eine detaillierte Bewertungen von spektralen Leistungsverläufen elektrischer Verbraucher möglich.

W. Horenkamp, Th. Wiesner

EV 9811

Dieses Projekt wurde von der EUS GmbH, Gelsenkirchen, gefördert.

## 5 Vorträge

### 5.1 Beiträge für das Kolloquium

- 10.03.1998 D. Kuhlmann, Universität Dortmund  
„Fehlerdiagnose in elektrischen Energieübertragungssystemen mit betriebsmittelbezogenen neuronalen Netzen“, Vortrag im Rahmen des Kolloquiums der Fakultät für Elektrotechnik
- 28.04.1998 Prof. Dr.-Ing. E. Handschin, Universität Dortmund  
„Trends am internationalen Energiemarkt“, Vortrag im Rahmen der interdisziplinären Ringvorlesung “Energieforschung an der Universität Dortmund”
- 25.05.1998 Prof. Dr.-Ing. Carlos Alvarez , Universidad Politecnica de Valencia, Spanien  
„Energy Supply in Spain“, Vortrag im Rahmen eines Gastaufenthaltes, gefördert durch den DAAD
- 28.05.1998 Dr. Michael Geyer, Plataforma Solar de Almeria (PSA), Spanien  
„Solarthermische Kraftwerke – eine Option für privat finanzierte Kraftwerksprojekte in Entwicklungsländern“, Vortrag im Rahmen des Kolloquiums der Fakultät für Elektrotechnik
- 12.06.1998 V. Bühner, ZEDO e.V.  
„Beratungssysteme zur Fehlerdiagnose und Konsistenzanalyse für Netzleitsysteme im Bergbau“, Vortrag im Rahmen des Kolloquiums der Fakultät für Elektrotechnik
- 18.06.1998 Prof. Dr. Hugh Rudnik, Pontificia Universidad Catolica de Chile, Chile  
„The Electric Market Restructuring in South America“, öffentlicher Kolloquiumsvortrag im Rahmen des Dortmunder Gambrinus Fellowship
- 24.06.1998 A. Koel, Universität Dortmund  
„Innovative Stationsleittechnik mit verteilten Rechnersystemen“, Vortrag im Rahmen des Kolloquiums der Fakultät für Elektrotechnik
- 09.12.1998 Prof. Dr.-Ing. H. Alt, RWE Energie AG  
„Folgen aus dem neuen Energiewirtschaftsrecht“, Vortrag im Rahmen des Kolloquiums der Fakultät für Elektrotechnik

## 5.2 Vorträge von Lehrstuhlmitgliedern

- 27.02.1998 *E. Handschin*: “Object-Oriented Based methods and Techniques in Control Centres Applied to Open Acces Schemes”, Kolloquium an der Universidad Politecnica de Valencia, Spanien
- 13.03.1998 *J. Teupen*: “Modellierung von elektrischen Lasten im Mittelspannungsnetz” Vortrag im Rahmen des Kolloquiums “Schaffung geeigneter Werkzeuge zur besseren Ausschöpfung vorhandener Ressourcen im Mittelspannungsnetz im Hinblick auf den zukünftigen Stromhandel” bei der Bezirksdirektion Arnberg der VEW Energie AG
07. 05.1998 *C. Rehtanz*: “Zustandsvisualisierung elektrischer Energieübertragungssysteme mit selbstorganisierenden Merkmalskarten”, ZEDO-Workshop für Industrievertreter - Visualisierung und Diagnose komplexer technischer Prozesse, Dortmund
- 26.06.1998 *E. Handschin*: “Innovative Betriebsmittel in der elektrischen Energieversorgung”, Vortrag auf dem EGU-Seminar, Prag
- 02.07.1998 *E. Handschin*: “Technische und wirtschaftliche Aspekte für den Einsatz von Speichern in der elektrischen Energieversorgung”, VDE-Vortrag an der TU München
16. 07.1998 *C. Rehtanz, C. Becker*: “Current Activities of the ZEDO and the Institute of Electric Energy Systems at the University of Dortmund”, Seoul National University, Seoul, Korea
23. 07.1998 *C. Becker*: “Coordinated Dezentralized Control of FACTS-Devices Applying Autonomous Systems”, Vortrag im Rahmen der International Conference on Electrical Engineering, ICEE’98 in Kyongju, Korea
- 28.08.1998 *C. Rehtanz*: “Autonomous Systems for Intelligent Coordinated Control of FACTS-Devices”, Bulk Power System Dynamics and Control IV - Restructuring, Santorini, Griechenland

- 09.09.1998 *C. Rehtanz*: “Application of the Self-Organizing Map in Electric Power Systems”, 6th European Congress on Intelligent Techniques and Soft Computing, EUFIT '98, Aachen, Deutschland
- 23.09.1998 *R. Palma*: “Object-Oriented Simulation Software for Transmission System Management in Open access Schemes”, EPSOM'98, International Conference on Electrical Power Systems Operation and Management, Zürich, 23-25 de September 1998.
- 28.10.1998 *R. Palma*: “The Deregulation Process of the Chilean Power Industry” Vortrag im Rahmen des EES-UETP Course on Electricity Markets- Fundamentals and International Experiences in Porto, Portugal
- 28.10.1998 *R. Palma*: “Transmission Open Access in Latin America”, Vortrag im Rahmen des EES-UETP Course on Electricity Markets- Fundamentals and International Experiences in Porto, Portugal
- 29.10.1998 *E. Handschin*: “Europäische Forschungstrends in der elektrischen Energieverteilung”, BFE Fachtagung, ETH-Zürich
- 05.11.1998 *C. Rehtanz*: “Koordinierte Regelung von FACTS-Geräten unter Verwendung lokaler und globaler Zustandsinformationen”, 8. Workshop Fuzzy Control, Dortmund
- 20.11.1998 *C. Rehtanz*: “Computational Intelligence in der elektrischen Energieversorgung”, Wissenschaftliches Kolloquium anlässlich der Absolventenverabschiedung der Fakultät für Elektrotechnik.

## **6 Veröffentlichungen**

### **6.1 Veröffentlichungen**

*Handschin, E.; Heine, M.; König, D.; Nikodem, T.; Seibt, T.; Palma, R.:* "Object-oriented software engineering for transmission planning in open access schemes", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, No 1, Feb.1998, pp. 94-100.

The object-oriented approach has gained wide spread importance and acceptance in software development due to the advantages it offers concerning flexibility, expandability, maintainability, an data integrity. For the purpose of determining a dynamic planning of transmission system in a deregulated open access environment, an object-oriented market simulation model of power systems is proposed. Traditional power system analysis applications are realised with object-oriented programming methods. The presented concept makes use of these object-oriented applications, and its applicability to a real system is shown with the Chilean business structure.

*Handschin, E.; Gaul, A.J.; Hoffmann, W.; Lehmköster, C.:* "Establishing a Rule Base for a Hybrid ES/XPS Approach to Load Management", IEEE Transaction s on Power Systems, Vol. 13, No 1, Feb 1998, pp. 86-93

Electrical energy has to be generated during the time it is needed. This is in contrast to economic efficiency in power generation since the best operating point for a power plant is a constant power generation at its best economical rating. The presented approach shows a way the schedule loads that do some energy storage to consume electrical power when it is available at lower generation costs. An evolutionary algorithm is evaluated, which computes the optimal operation times of the mentioned loads. Since the evolutionary strategies (ES) themselves do not consider special cases, a knowledge base is integrated into the algorithm. The resulting approach allows a more efficient application of telecontrol system for load management.

*Handschin, E.; Gaul, A.J.; Hoffmann, W.; Lehmköster, C.:* "Optimal Management of Electrical Loads Using Knowledge Aware Evolutionary Strategies", Engineering Intelligent Systems, Vol. 6, No. 2, June 1998

Electrical energy might not be stored efficiently. It has to be generated whenever it is needed. This is in contrast to economic efficiency in power generation since the best operating point for a power plant is a constant power generation at its best economical

rating. This paper presents an approach to schedule loads which do some storage of thermal or kinetic energy by use of an evolutionary strategy. The idea is to optimize the economic efficiency of power generation by scheduling appropriate parts of those loads in a way that they do consume energy when it is available at lower costs of generation and distribution. Since the evolutionary strategies themselves do not consider special cases, where the direction to search next in the search space is obvious a knowledge base is integrated into the evolutionary strategy. The resulting approach allows a more efficient application of ripple control or wireless techniques based telecontrol system for load management already installed in numerous utilities.

*Becker, C.; Handschin, E. ; Rehtanz, C.: "Coordinated Decentralized Control of FACTS-Services Applying Autonomous Systems", Proc. of International Conference on Electrical Engineering, ICEE '98, Kyongju, Korea, 21. - 25. Juli 1998*

A functional architecture of autonomous systems has been described with which an intelligent and coordinated control in FACTS can be realized. The architecture has first been treated generally and special features have been put in concrete terms with two examples. The coordination is shown first with ASC as a fast shunt compensation and second with a SMES as a parallel FACTS-device. The modular structure of autonomous systems is profitable with regard to an addition of supplementary features. An essential aspect in electric energy systems with embedded FACTS-devices is the requirement of decentral intelligent control techniques. This is realized by autonomous systems and enables the FACTS-devices to react on different occurrences at the same time. Both global and local information about the state of the system are processed in order to fulfill different control tasks simultaneously.

*Becker, C.; Rehtanz, C.: "Autonomous Systems for Intelligent Coordinated Control of FACTS-Devices", Proc. of Bulk Power System Dynamics and Control IV - Restructuring, Santorini, Griechenland, 24. - 28. August 1998*

The application of FACTS-devices demands a mutual coordination of their controllers and a coordination of them with the conventional control, instrumentation and protection system. Otherwise a secure operation and a high-quality electric power supply can not be ensured. This paper describes autonomous systems as a schematic approach to realize such an intelligent coordinated control. The theory of autonomous systems originates in computer science and presents a functional architecture of so-called autonomous components. It determines their functionalities dependent on a control level on which the components are placed. Two examples of coordinated control with autonomous systems are given. On the

one hand a coordination between the control of active power flow and primary speed control of power plants is examined. On the other hand the linking of a SMES control within the structure of the autonomous control system by a special controller which acts multifunctional for all time periods simultaneously in a coordinated way is presented.

*Handschin E., Nikodem T., Palma R.:* "An Internet Based Information System for Research Project Coordination", CIGRE workshop on Links Universities-CIGRE, 03., Cigre Session 1998, September 1998.

The Internet technology offers a platform for fast and easy information exchange worldwide. In the field of research collaboration the importance of this technology is growing. The paper gives an outline of the Internet technology and describes an Internet / World Wide Web based information system which has been implemented at the authors' department.

Using the existing Internet technology and available software tools, the system supports research collaboration, offers information services and can be maintained with appropriate effort.

*Rehtanz, C.; Kuhlmann, D.:* "Applications of the Self-Organizing Map in Electric Power Systems", Proc. of 6th European Congress on Intelligent Techniques and Soft Computing, EUFIT '98, Aachen, 07. - 10. September 1998

The information technology offers a lot of data which requires an intelligent processing to get a precisely view of the effects in electric power systems. In this paper Self-Organizing Maps (SOM) are developed for the indication and visualization of voltage stability of large electric power systems. The necessity of tools for indication and visualization is pointed out. On this basis the application of a SOM is worked out bypassing the disabilities of standard voltage stability indicators. In addition, the application of SOM can be used for the analysis of a power system and the development of stabilizing measures. All examples are calculated using a model of a real power transmission system.

*Handschin E.; Nikodem T.; Palma R.:* "Object-Oriented Simulation Software for Transmission System Management in Open access Schemes", EPSOM'98, International Conference on Electrical Power Systems Operation and Management, Zürich, 23-25 de September 1998.

Power transmission with open and third party access is the central aspect in deregulated electricity supply sectors with competition in the generation sector. Issues such as the

costing of transmission system usage and the pricing of ancillary services are extensively discussed and there are not yet clear cut answers that can be applied universally. One of the consequences arising from the development of electricity market places is the decentralization of decision processes. Whereas in supply structures with vertically integrated utilities the system operation function is well defined, in deregulated structures several actors have impact on power system operation and planning and market decisions have to be incorporated into system operation. Simulation software tools have to be adjusted to these structures. The object-oriented programming (OOP) approach has gained wide spread importance and acceptance in software development due to the advantages it offers concerning flexibility, expandability, maintainability, and data integrity. This paper links the object-oriented approach with the changing structural framework of electricity supply sectors with open transmission access. A simulation software is presented which contains an object-oriented representation of the power system, an object-oriented model of the market, and power system analysis applications (PSAA) such as load flow calculation, economic dispatch, and optimal power flow. It is shown that the object-oriented concept is well applicable to define the information flow between the individual market actors and simulate their market decisions based on the available information. The decisions made within the market are integrated into the power system objects and the analysis applications can be executed. The concepts and methods are illustrated with practical examples.

*Becker, C.; Handschin, E.; Rehtanz, C.: "Koordinierte Regelung von FACTS-Geräten unter Verwendung lokaler und globaler Zustandsinformationen", 8. Workshop Fuzzy Control, Dortmund, 5. - 6. November 1998*

Zur Ausnutzung moderner Informationstechnik in elektrischen Energieübertragungssystemen ist es einerseits unerlässlich, aus vielfältig zur Verfügung stehenden Daten verdichtete, globale Zustandsinformationen zu generieren. Andererseits müssen Informationen auf lokaler Ebene direkt in intelligenten Komponenten verarbeitet werden, um eine möglichst schnelle und automatische Handlungsweise zu ermöglichen. Die vorgestellte Struktur autonomer Systeme gewährleistet die Ausnutzung dieser lokalen und globalen Zustandsinformationen. Die Anwendung erfolgt im Bereich von schnell regelbaren leistungselektronischen Betriebsmitteln, sogenannten FACTS-Geräten (Flexible AC Transmission Systems), deren Nutzen erst bei schnellen Handlungsweisen voll ausgeschöpft werden kann.

*Rehtanz, C.:* "Systemic Use of Multifunctional SMES in Electric Power Systems", to be published in IEEE Transactions, 1998

The paper deals with various applications of Super-conducting Magnetic Energy Storages (SMES) in electric power systems. The most economical use of a SMES would be conducted by applying it simultaneously to a number of different tasks. A systemic analysis leads to all applications for which the SMES can be used and to all components which are affected by this use. The focus of the paper lies on the improvement of voltage stability. Additional emphasis has also been placed on the allocation of seconds reserve power, the damping of oscillations and the improvement of transient stability.

An overall fuzzy-logic based controller has been developed which considers the coordination of the various applications of the SMES. This enables the objectives of the SMES to be met simultaneously in all time scales. The concept for the improvement of voltage stability and the system controller are validated through simulation examples of a real voltage-critical power system.

## **6.2 Forschungsberichte**

*E. Handschin:* „Neue Speicher- und Leitsysteme zur gesicherten elektrischen Energieversorgung“, EV 9804

*Th. Wiesner:* „DSP-gestütztes 6-Kanal-Leistungsmeßsystem“, EV 9811

*V. Bühner:* „Expertensysteme für die Leittechnik von untertägigen elektrischen Energieversorgungsnetzen“, EV 9814

*E. Handschin:* „Abschätzung der Leistungsfähigkeit moderner Informationstechnik in der Schutz- und Leittechnik“, EV 9816

*G. Bretthauer, E. Handschin, U. Neumann, Th. Weber, W.H. Wellßow:* „New Approaches for Maintenance Management for Grid Facilities“, EV 9832

### 6.3 Diplomarbeiten

*C. Mensmann:* „Analyse kritischer Betriebszustände in Mittelspannungsnetzen“, EV 9801

*J. Knerr:* „Lichtleistung“, EV 9802

*F. Scheunemann:* „Bereitstellung von Reserveleistung zur Primär- und Sekundärregelung in liberalisierten Energieversorgungsstrukturen“, EV 9807

*C. Leder:* „Entwicklung eines Konzeptes zum Aufbau eines Netzleitsystems für ein kommunales Querverbundunternehmen“, EV 9808

*A. Luig:* „Entwicklung und Aufbau einer Impedanzmeßeinrichtung für den Frequenzbereich 10Hz bis 20 kHz“, EV 9812

*M. Düsenberg:* „Fernüberwachung und Steuerung von energietechnischen Anlagen via Internet“, EV 9815

*H. Hösch:* „Einsatz evolutionärer Strategien für die Blindleistungsoptimierung in Mittelspannungsnetzen“, EV 9818

*T. Hammerschmidt:* „Verbesserung des Reserveschutzes im Höchstspannungsnetz unter Ausnutzung der erweiterten Funktionalität digitaler Schutzgeräte“, EV 9824

*J. Brosda:* „Generation of Knowledge Bases for Coordinated Control of FACTS-Devices - Generierung von Wissensbasen für eine koordinierte Regelung von FACTS-Geräten“, EV 9834

*Th. Dietz:* „Entwicklung eines objektorientierten Modells zur Simulation eines deregulierten Energiemarktes“, EV 9842

*W. Feilhauer:* „Entwicklung von Trainingsszenarien für den Normal- und Störbetrieb in regionalen Netzen“, EV 9843

*C. Figura:* „Beurteilung der Flickerstörwirkung von elektronisch gesteuerten Durchlauf-erhitzern durch digitale Simulation“, EV 9845

*F. Uphaus:* „Gekoppelte Trennstellen- und Blindleistungsoptimierung in Mittelspannungsnetzen“, EV 9848

## 6.4 Studienarbeiten

*J. Brosda:* „Entwicklung von Regelstrategien für FACTS-Geräte zur Verbesserung des dynamischen Verhaltens von Energieübertragungssystemen“, EV 9805

*N. Ataei:* „Optimierung der Spannungsstabilität eines Energieübertragungssystems unter Verwendung der SQP“, EV 9806

*F. Uphaus:* „Einsatz evolutionärer Strategien für die Trennstellenoptimierung in Mittelspannungsnetzen“, EV 9817

*L. Wlecke:* „Studie über die Bewertung von Durchleitungen in einem Verteilungsnetz“, EV 9819

*P. Scherf:* „Zustandsraumbeobachter für aktive Netzfilter“, EV 9825

*N. Schnurr:* „Wirtschaftliche und regelungstechnische Windkraftanlagen- und Energiespeicherauslegung für das Energieversorgungssystem der Universität Dortmund“, EV 9835

*Th. Heinermann:* „Entwicklung eines Marktkonzeptes für die Netzdienstleistung Reserveleistung“, EV 9847

## 7 Promotionen

*Dietmar Kuhlmann:* „Fehlerdiagnose in elektrischen Energieübertragungssystemen mit betriebsmittelbezogenen neuronalen Netzen“

Referent: Prof. Dr.-Ing. E. Handschin

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. T. Lobos

Tag der mündlichen Prüfung: 26.05.1998

Eine automatisierte Auswertung der verfügbaren Schutz- und Schaltermeldungen in einer Netzleitwarte ist die Grundlage für eine schnelle Aufklärung und Beseitigung von Fehlern in elektrischen Energieübertragungssystemen (EÜS). In der Arbeit wird ein neues Verfahren vorgestellt, das zum einen die Eigenschaften der Methode der neuronalen Netze, wie hohe Verarbeitungsgeschwindigkeit, Robustheit und Adaptivität, für die Anwendung auf die Fehlerdiagnose ausnutzt. Zum anderen wird durch eine betriebsmittelbezogene Typisierung und eine an der Topologie des EÜS orientierten Verknüpfung von neuronalen Netzen (DS-ANN, device-specific artificial neural network) eine flexible Anpassung an unterschiedliche Netzzustände des EÜS gewährleistet. Die Integration in die Leittechnik zeigt, daß die Fehlerdiagnose mit DS-ANN eine online-fähige und zuverlässige Analyse von Störungssituationen auch im Fall von unvollständigen Meldungslisten oder Fehlerreaktionen des Schutzsystems ermöglicht.

*Volker Bühner:* „Beratungssysteme zur Fehlerdiagnose und Konsistenzanalyse für Netzleitsysteme im Bergbau“

Referent: Prof. Dr.-Ing. E. Handschin

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. W. Winkler

Tag der mündlichen Prüfung: 23.09.1998

Die elektrische Energieversorgung unter Tage ist durch eine unvollständige, teils manuelle Übertragung von Prozeßdaten zu einer zentralen Leitwarte über Tage geprägt. Die Netztopologie unterliegt infolge des wandernden Kohlenabbaus einer ständigen Änderung. Dadurch besteht die Gefahr eines inkonsistenten Prozeßabbildes im Leitsystem und damit von Fehlinterpretationen der Prozeßinformationen. Darüber hinaus ergeben sich bei Störungen aufgrund des verzweigten und nur zeitaufwendig zugänglichen Netzes sowie der unvollständig verfügbaren Informationen lange Fehlerklärungszeiten. Vorgestellt werden vollständig in ein Leitsystem und dessen MMI integrierte Online-Beratungssysteme (BS). Ausgehend von den spezifischen Anforderungen durch den Einsatz für ein untertägliches Energieversorgungsnetz und unter Berücksichtigung der Problematik der Benutzerakzeptanz von Anwendungen der KI erfolgt die wissensbasierte Realisierung der BS. Die

BS erlauben das Auffinden von Inkonsistenzen und identifizieren in Störungssituationen potentielle Fehlerorte auf Basis der unvollständigen bzw. inkonsistenten Daten. Damit leisten sie einen wertvollen Beitrag zur Steigerung der Betriebssicherheit und Wirtschaftlichkeit der Kohlenförderung.

*Andreas Koel:* „Innovative Stationsleittechnik mit verteilten Rechnersystemen“

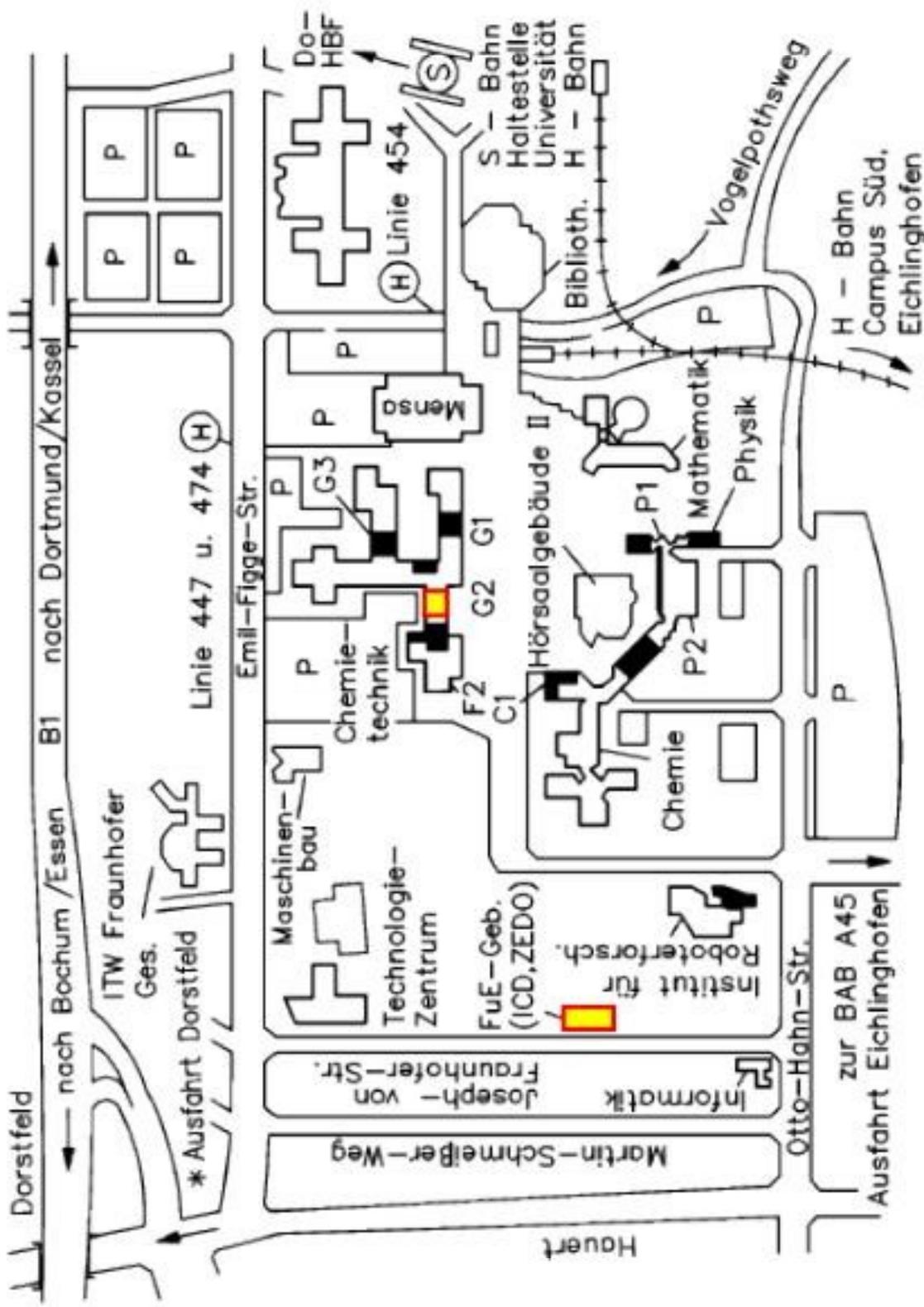
Referent: Prof. Dr.-Ing. E. Handschin

Korreferent: Prof. Dr. Z. Styczynski

Tag der mündlichen Prüfung: 23.09.1998

Der Paradigmenwechsel in der Energieversorgung, neue Betriebsführungskonzepte und Betriebsmittel verändern die zukünftigen Aufgaben der Leittechnik in elektrischen Energieversorgungsnetzen. Vor diesem Hintergrund entwirft diese Arbeit basierend auf moderne Verfahren und Techniken der Informationstechnik ein innovatives Konzept für eine Stationsleittechnik, das mit seinen verteilten Rechnersystemen und seinem flexiblen Kommunikationssystem sowohl einen realzeitfähigen Datenaustausch zwischen allen Stationen im Netz als auch die Einbindung der Stationen in ein unternehmensweites multimediales Informationssystem ermöglicht.

Ausgehend von dem in dieser Arbeit entwickelten objektorientierten Strukturmodell für die Stationsleittechnik, werden zunächst die Einsatzmöglichkeiten verfügbarer Kommunikationssysteme untersucht und verglichen. Diese Ergebnisse bilden die Grundlage für die Entwicklung des flexiblen Kommunikationssystems und des offenen Architekturmodells, die wiederum die Basis für die innovative Stationsleittechnik mit verteilten Rechnersystemen sind. Es schließt sich die Beschreibung eines verteilten Stationsdatenmanagementsystems an, mit dem ein effizientes Management und eine komfortable Handhabung der Prozeßinformationen sowie ein nahezu ortsunabhängiger Zugriff auf diese Informationen realisierbar ist. Ein weiterer Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf dem benutzergerechten Zugriff auf die umfangreichen jetzt verfügbaren Informationen. Hierzu werden Möglichkeiten zur Erweiterung des Stationsdatenmanagementsystem um multimediale Komponenten aufgezeigt, mit denen sich die unverzichtbare Forderung nach einem benutzerfreundlich Zugriff und einer benutzerfreundlichen Aufbereitung der Informationen erfüllen läßt. Die Arbeit schließt mit einer kurzen Bewertung des vorgeschlagenen Konzeptes unter der Einbeziehung wirtschaftlicher Aspekte.



**G2 LS für Elektrische Energieversorgung**  
 Parkplatz-Einfahrt 9/10