

**LEHRSTUHL FÜR ELEKTRISCHE ENERGIEVERSORGUNG**

**UNIVERSITÄT DORTMUND**

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



**JAHRESBERICHT 1997**

Herausgegeben vom

LEHRSTUHL FÜR ELEKTRISCHE ENERGIEVERSORGUNG  
UNIVERSITÄT DORTMUND  
UNIV. PROF. DR.-ING. E. HANDSCHIN

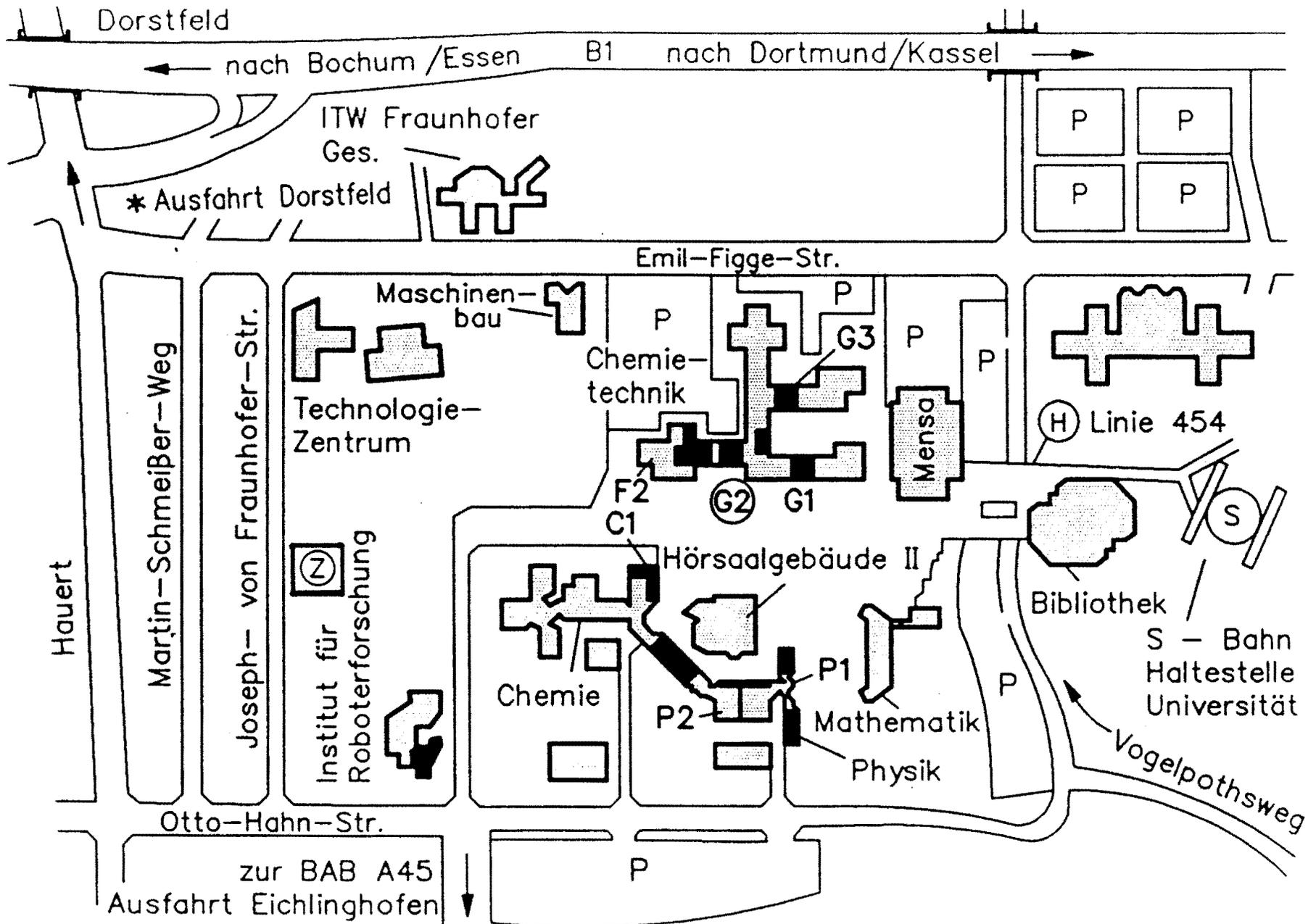
44221 Dortmund

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: Dr.-Ing. Ch. Rehtanz, N. Schnurr



Ⓩ ZEDO

ⓐ LS für Elektrische Energieversorgung

## **Vorwort**

Die nachhaltigen Veränderungen auf dem Gebiet der Energiewirtschaft erfordern auch von der Hochschulforschung, den damit verbundenen Paradigmenwechsel nachzuvollziehen. Dabei entstehen neue Fragestellungen, die eine noch intensivere Beachtung der interdisziplinären Zusammenarbeit erfordern. Auch die Arbeiten an unserem Lehrstuhl sind im Berichtsjahr dadurch erheblich geprägt worden. Dabei erfüllt das Internet nicht nur beim raschen Austausch wissenschaftlicher Informationen eine wichtige Rolle; darüber hinaus bietet es auch enorme Vorteile für die wissenschaftliche Zusammenarbeit. Dies konnte erfolgreich in der ersten Projektphase des von der EU geförderten ALFA-Programms erprobt werden. Mit unseren Partner-Instituten, den Universitäten in Santiago, Buenos Aires, Santa Caterina, London und Valencia, ist ein Vorschlag für die Durchführung eines internationalen Aufbaustudiums auf dem Gebiet der Deregulierung und Liberalisierung des Energiemarktes erarbeitet worden, dessen Realisierung mit großen Erwartungen gesehen wird. Auf die enge Verzahnung zwischen Energie- und Informationstechnik ist schon früher hingewiesen worden. Dies ist auch bei der diesjährigen Verleihung der Ehrendoktorwürde an Herrn Prof. Dr. Kohonen zum Ausdruck gebracht worden. Das enorme Potential der künstlichen neuronalen Netze ist sicher noch nicht ausgeschöpft. Die bisher erzielten Ergebnisse machen jedoch deutlich, daß auch für energietechnische Probleme neue, leistungsfähige Lösungen erarbeitet werden können. In starkem Maße ist die Interdisziplinarität schließlich auch auf dem Gebiet der Brennstoffzellen erforderlich. Die Forschungsarbeiten konnten planmäßig durchgeführt werden, wobei sowohl die Modellierung als auch die Integration dieser Systeme im Niederspannungsnetz zu zahlreichen, interessanten Problemstellungen führt. Große Anstrengungen müssen unternommen werden, damit trotz der herrschenden Finanz- und Personalknappheit der zeitliche Anschluß an die nationale und internationale Entwicklung nicht verpaßt wird. Der vorliegende Jahresbericht versucht eine - hoffentlich - positive Antwort zu geben.

E. Handschin

# Inhaltsverzeichnis

1	Personal .....	1
2	Kooperation mit anderen Forschungseinrichtungen .....	2
3	Lehrbetrieb .....	5
3.1	Vorlesungen .....	5
3.2	Seminare .....	6
3.3	Praktika .....	6
3.4	Projektgruppen .....	7
3.5	Exkursionen .....	9
4	Forschungs- und Entwicklungsarbeiten .....	10
4.1	Softwareentwicklung für die Betriebsführung und Planung elektrischer Energieversorgungssysteme .....	10
4.1.1	Bewertung von Durchleitungen in elektrischen Energie- versorgungssystemen .....	10
4.1.2	Gekoppelte Wirk- und Blindleistungsoptimierung unter Berücksichtigung innovativer Lastflußsteuerung .....	15
4.1.3	Eigenschaften der Fehlerdiagnose mit einem Expertensystem und mit neuronalen Netzen .....	20
4.1.4	Blockorientierte Simulationsumgebung für dynamische Netz- berechnungen von FACTS .....	23
4.2	Modellierung und Simulation statischer und dynamischer Vorgänge in elektrischen Energieversorgungssystemen .....	27
4.2.1	Lastmodellierung in Mittelspannungsnetzen .....	27
4.2.2	Koordinierte Regelung für FACTS-Geräte zur Leistungsfluß- steuerung als prozeßnahe Komponente autonomer Regelungs- systeme .....	30

4.2.3	Systemische Integration eines multifunktionalen SMES in die Netzregelung .....	36
4.2.4	Spannungsstabilitätsindikatoren mittels künstlicher neuronaler Netze nach Kohonen .....	40
4.3	Schutz- und Leittechnik .....	43
4.3.1	Netzanbindung von SOFC-Brennstoffzellenanlagen im Niederspannungsnetz .....	43
4.3.2	Meßsystem zur Beurteilung der Auswirkungen nichtlinearer Verbraucher und Eigenerzeugungsanlagen im Nieder- spannungsnetz .....	45
4.3.3	Modellierung der Schaltbewegung von Leistungsschaltern .....	47
4.3.4	Neuronale Netze in der Schutztechnik .....	50
4.3.5	Intelligente Stationsbetriebsführung .....	53
5	Vorträge .....	57
5.1	Beiträge für das Kolloquium .....	57
5.2	Vorträge von Lehrstuhlmitarbeitern .....	57
6	Veröffentlichungen .....	60
6.1	Veröffentlichungen .....	60
6.2	Forschungsberichte .....	65
6.3	Diplomarbeiten .....	65
6.4	Studienarbeiten .....	66
6.5	Programmbeschreibungen .....	67
7	Promotionen .....	68

# 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: F. Howell, Washington State University, USA  
Dr.-Ing. Y. Wang, Tsinghua University, Beijing , China  
Dipl.-Ing. R. Palma Behnke, Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile

Wiss. Mitarbeiter: Dipl.-Ing. D. König  
Dipl.-Ing. Ch. Becker      Dr.-Ing. U. Neumann  
Dr.-Ing. A. Gaul      Dipl.-Ing. T. Nikodem  
Dipl.-Ing. A. Koel      Dr.-Ing. Ch. Rehtanz  
Dipl.-Ing. D. Kuhlmann      Dipl.-Ing. J. Teupen  
Dipl.-Ing- C. Lehmköster      Dr.-Ing. D. Westermann  
Dipl.-Ing. L. Neuhaus      Dipl.-Ing. Th. Wiesner

Technische Mitarbeiter: Frau H. Giersberg      Dipl.-Ing. W. Horenkamp  
Frau R. Meier      Herr K.-D. Tesch

Studentische Hilfskräfte: J. Brosda      A. Luig      M. Schubert  
J. Dienststuhl      P. Michau      S. Tesch  
B. Fresen      L. Müller      D. Ujcic  
M. Gravermann      T. Nork      F. Uphaus  
V.-P. Grunert      M. Schmale      P. Vogel  
J.-M. Hindemitt      N. Schnurr      M. Zmieszkol  
T. Iborg

## **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 Expertensysteme Dortmund e.V. ZEDO  
Joseph-von-Fraunhofer-Str. 20  
44227 Dortmund*

Es ist eine satzungsgemäße Aufgabe des ZEDO (Zentrum für Expertensysteme 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 08.02.-11.02.1997 als akademischen Gast am Lehrstuhl begrüßen.

*Universidad Politécnica de Valencia  
Prof. Dr.-Ing. C. Alvarez  
Camino de Vera Nº 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 Studenten und Doktoranden.

Im Rahmen dieses Projektes wurde ein Austauschprogramm für Doktoranden der Fakultät Elektrotechnik mit Schwerpunkt Energietechnik vorbereitet. Diese Aktivitäten sind eng gekoppelt mit der Planung gemeinsamer Forschungsaktivitäten zu der Thematik der Umstrukturierung von Energieversorgungssystemen zur Förderung des Wettbewerbs.

Im Hinblick auf diese Thematik betreibt der Lehrstuhl für Elektrische Energieversorgung der Universität Dortmund eine Datenbank zur Planung wettbewerbsorientierter Energieversorgungssysteme im Internet, die ständig aktualisiert und erweitert wird. Sie ist unter der Adresse <http://evpara.e-technik.uni-dortmund.de> zu finden.

*Technische Universität Wrocław TUW  
Elektrotechnische Fakultät  
Wybrzeże Wyspińskiego 27  
50-370 Wrocław, Polen*

*Instytut Automatyki Systemów  
Energetycznych IASE  
ul. Wystawowa 1  
51-618 Wrocław, 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 waren die Herren Dr.-Ing. B. Witek und Dr.-Ing. A. Halinka als akademische Gäste in Dortmund.

## **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.

#### **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) Prof. Dr.-Ing. E. Handschin/ Dipl.-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

### **Innovative Energieversorgung (WS) Prof. Dr.-Ing. E. Handschin/ Dipl.-Ing. C. Rehtanz**

Dieses Seminar wurde interdisziplinär mit dem Lehrstuhl für Energieprozeßtechnik der Chemietechnik von Prof. Dr.-Ing. K. Strauß und dem Fachgebiet Fluidenergiemaschinen des Maschinenbaus von Prof. Dr.-Ing. K. Kauder 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:

**Projektierung einer Windkraftanlage im Universitäts-Umland:** Innerhalb dieses interdisziplinären Projektes ist die Ergänzung der Elektrizitätserzeugung der Universität Dortmund durch eine Windkraftanlage (WKA) zu untersuchen. Auf der Basis einer Analyse der zur Verfügung stehenden Flächen im Hinblick auf geographische und baurechtliche Gegebenheiten ist für WKA die Auslegung, der Anschluß und die Einbindung in das

Gesamtsystem zu projektieren. Neben der Primärenergieeinsparung sind Kostenaspekte zu untersuchen. Diese Projektgruppe wird in Zusammenarbeit mit den Fakultäten Maschinenbau und Raumplanung durchgeführt.

**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 Energie-sparkonzept 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.

**Datenerfassung und Visualisierung für eine Photovoltaikanlage:** Die Universität Dortmund beabsichtigt eine Photovoltaikanlage auf dem Gebäude der Betriebstechnischen Zentrale zu

errichten. Für die Erfassung und Visualisierung der Meßdaten ist ein Prozeßbild auf Basis des Programmpaketes WinLab-PRO® zu erstellen. Die Erfassung und Darstellung bzw. Speicherung der Meßdaten wird dezentral an unterschiedlichen Standorten durchgeführt, so ist z.B. die Visualisierung im Eingangsbereich der BTZ und die Meßdatenspeicherung am Lehrstuhl durchzuführen. Ein weiterer Gesichtspunkt bei der Anlagenkonzeption ist die Anbindung an das Internet, wobei die Aktualisierung der Meßdaten z.B. alle 15 Minuten vorgenommen werden soll.

**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 zwei eintägige Exkursionen am 9. April 1997 zur Hauptschaltleitung Brauweiler der RWE Energie AG und am 26. Juni 1997 in Zusammenarbeit mit dem IEEE-PES German Chapter zum Pumpspeicherkraftwerk Waldeck am Edersee der PESAG Aktiengesellschaft Paderborn durchgeführt.

## **4 Forschungs- und Entwicklungsarbeiten**

### **4.1 Softwareentwicklung für die Betriebsführung und Planung elektrischer Energieversorgungssysteme**

#### **4.1.1 Bewertung von Durchleitungen in elektrischen Energieversorgungssystemen**

Die EU-Binnenmarktrichtlinie Elektrizität spezifiziert Rahmenbedingungen für eine schrittweise Marktöffnung der Elektrizitätsversorgungssektoren der Mitgliedsstaaten beginnend im Februar 1999. Basierend auf diesen Vorgaben hat die Bundesregierung im März 1997 einen Entwurf für ein neues Energiewirtschaftsgesetz vorgelegt, das die Liberalisierung des deutschen Elektrizitätsversorgungssektors vorsieht. Von den beiden in der EU-Richtlinie definierten Modellen zur Netzöffnung, das Modell des Alleinabnehmers (Single Buyer) und das des verhandelten Netzzugangs (Negotiated Third Party Access, NTPA), wird in dem Gesetzentwurf der Bundesregierung ein Ordnungsrahmen nach dem Modell des NTPA vorgesehen. Kommunale Verteilerunternehmen werden voraussichtlich für eine Übergangsfrist auch als Alleinabnehmer anerkannt werden können.

Das NTPA-Modell öffnet die derzeitigen Gebietsmonopole für den Wettbewerb in den Bereichen Elektrizitätserzeugung und Endkundenbelieferung. Elektrizitätserzeuger und zugelassene Kunden schließen zeitlich begrenzte Elektrizitätslieferverträge auf der Grundlage freiwilliger kommerzieller Vereinbarungen ab. Nach Abschluß eines solchen Vertrages treten der Erzeuger, der Kunde oder beide gemeinsam an den Netzbetreiber heran, um mit diesem eine Durchleitung der vertraglich vereinbarten Energie zu verhandeln. Der in dem Vertrag zwischen Erzeuger und Kunden vereinbarte Preis für die Energiemenge bleibt dem Netzbetreiber unbekannt. Der Begriff Durchleitung ist hierbei definiert als Einspeisung elektrischer Energie in definierte Einspeisepunkte des Netzsystems und die damit verbundene zeitgleiche Entnahme der elektrischen Energie an räumlich entfernt liegenden Entnahmepunkten des Netzsystems. Für die im Rahmen der Durchleitung bereitgestellte Übertragungskapazität erhält der Netzbetreiber ein Durchleitungsentgelt. Zusätzlich zum Durchleitungsentgelt oder im Rahmen des Durchleitungsentgeltes sind die vom Netzbetreiber zu übernehmenden Netzdienstleistungen zu verhandeln.

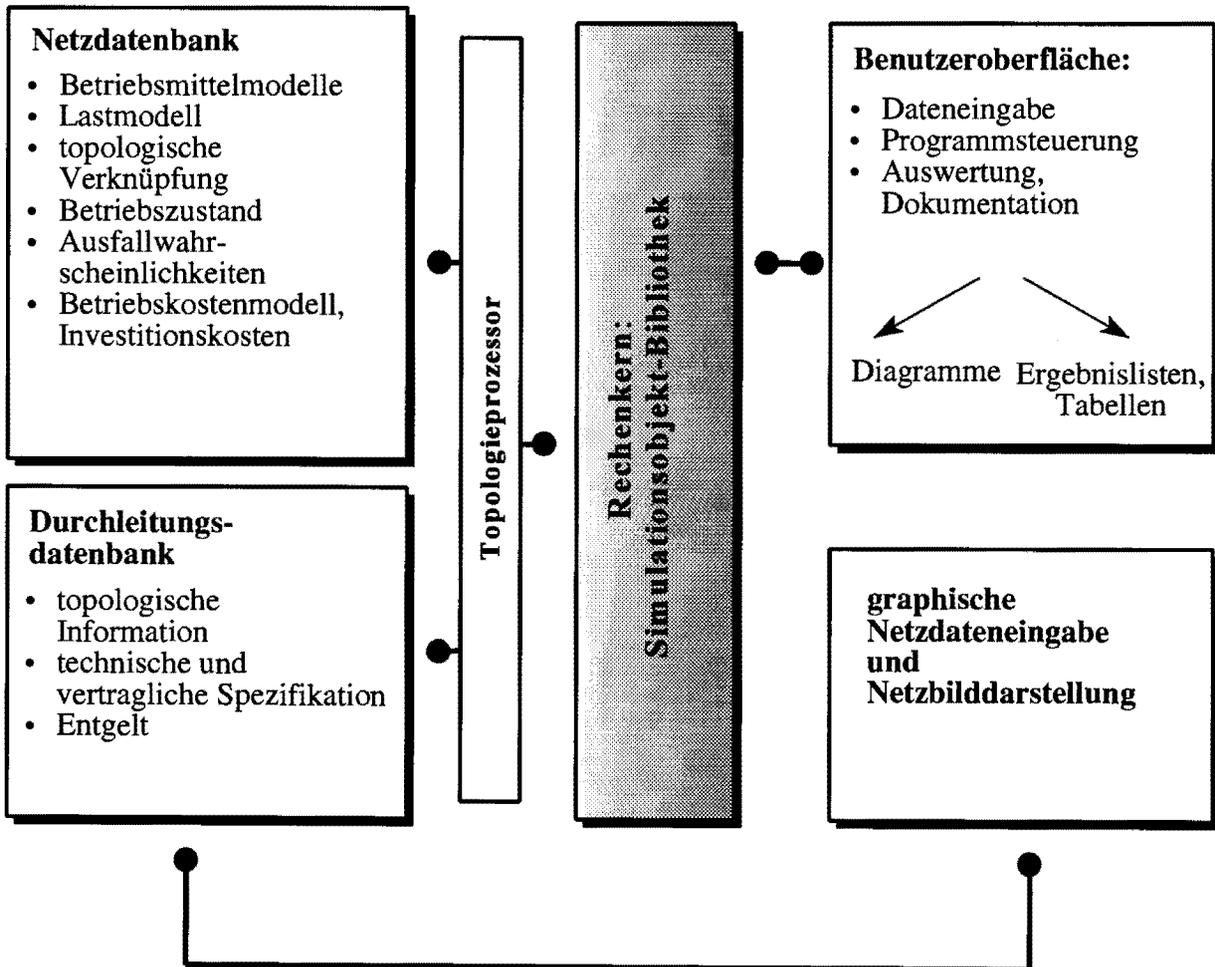
Das vereinbarte Durchleitungsentgelt ist in dem NTPA-Modell für alle Beteiligten von zentraler Bedeutung. Im Hinblick auf den Netzbetreiber gestaltet sich die Planung und der Betrieb des Netzes in Abhängigkeit der bilateralen Verträge, da ein Liefervertrag für einen Erzeuger eine Einspeisegarantie bedeutet. Seitens des Erzeugers ist das zu entrichtende Durchleitungsentgelt mitbestimmend für das Preisangebot an den Kunden. Um einen Mißbrauch des natürlichen Monopols durch den Netzbetreiber zu verhindern, ist das Entgelt kartellrechtlich zu überwachen. Hierzu wird in der Regel ein Modell zur Ermittlung von Durchleitungsentgelten zugrundegelegt. Für die deutsche Elektrizitätsversorgung ist hier die sogenannte Verbändevereinbarung vorgesehen.

Für die Planung und den Betrieb von Energieversorgungssystemen ergeben sich im Hinblick auf Durchleitungen die in Tabelle 4.1.1 dargestellten Aufgabenstellungen.

**Tabelle 4.1.1:** Aufgabenstellungen

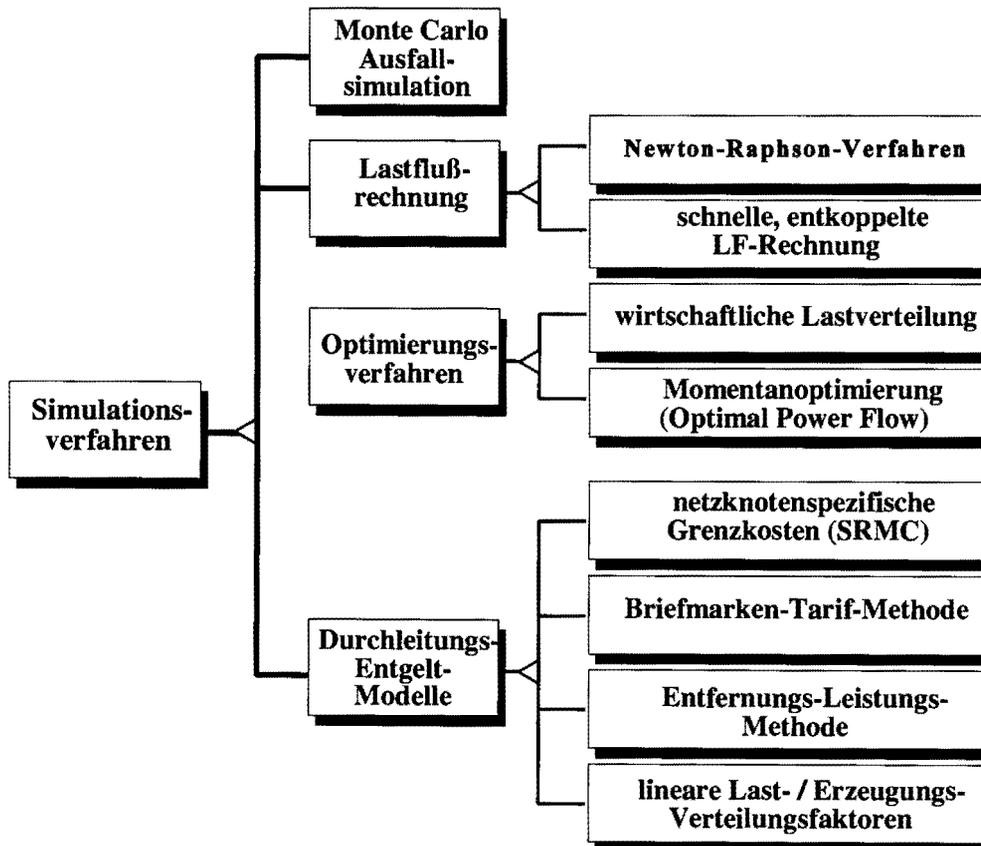
Aufgabe	Netz- betreiber	Erzeuger	Regulierung Überwachung	Forschung, Entwicklung
Überprüfung der Durchführbarkeit in Bezug auf physikalisch-technische Netzrestriktionen	•	•	•	
Berücksichtigung in Netzplanung	•			•
Berücksichtigung in Netzbetriebsführung	•			•
Studien zur Entgeltermittlung für Kostenrechnung und Unternehmensstrategie	•	•		
Bewertung strittiger Einzelfälle in ggf. erforderlichen Schlichtungsverfahren	•	•	•	
Bewertung des Modells zur Entgeltermittlung	•	•	•	•

Am LS-EV wird als Lösungsansatz für die dargestellte Problematik ein Simulationsprogramm zur Bewertung von Durchleitungen entwickelt. Die Simulationsrechnungen werden hierbei auf einer jährlichen Zeitbasis durchgeführt. In Bild 4.1.1 ist die Struktur des entwickelten Programmpaketes dargestellt. Es besteht aus den Komponenten Netzdatenbank, Durchleitungsdatenbank, dem Rechenkern mit Simulationsobjekten, einem graphischen Netzdateneditor und der Benutzeroberfläche. Netzdatenbank, Durchleitungsdatenbank sowie die Simulationsverfahren sind in objektorientierter Programmierung in der Programmiersprache C/C++ realisiert. Das objektorientierte Netzdatenmodell enthält die Information zur technischen und kostenmäßigen Spezifikation der Betriebsmittel, das Lastmodell sowie die durch die Simulationsobjekte berechneten Betriebsmittelzustände.



**Bild 4.1.1:** Programmstruktur

Als Simulationsverfahren sind die Lastflußrechnung sowie die Optimierungsverfahren Momentanoptimierung und wirtschaftliche Lastverteilung realisiert. Mit diesen Verfahren wird der Netzbetriebszustand für einen Zeitpunkt mit definierten Systemeingangsgrößen bestimmt. Für statistische Bewertungen, die zufallsbedingte Ausfälle von Betriebsmitteln berücksichtigen, ist eine Ausfallsimulation basierend auf der Monte Carlo Methode implementiert. Neben diesen Standardverfahren sind verschiedene Modelle zur Berechnung von Durchleitungsentgelten realisiert. Durchleitungsentgeltmodelle sind Verfahren, welche die für den Elektrizitätstransport erforderlichen Kosten bestimmen und diese auf die Kostenträger "Durchleitungen" verteilen. Alle Simulationsverfahren sind als Simulationsobjekte implementiert. In Bild 4.1.2 ist ein Überblick über die hierarchische Struktur der Simulationsobjekte dargestellt. Die objektorientierte Programmierung bietet den Vorteil, daß der Realisierungsaufwand für die Implementierung weiterer Entgeltmodelle und die Modifikation der existierenden Modelle wesentlich verringert wird.



**Bild 4.1.2:** Simulationsobjekte

Für eine Simulation und Bewertung über den Zeitraum eines Jahres stehen optional zwei Lastmodelle zur Verfügung. Zum einen können die einzelnen Systemlasten durch geordnete Jahresbelastungskurven modelliert werden. Hierzu sind in der Netzdatenbank die Parameter minimale und maximale Wirklast und der Belastungsfaktor vorzugeben, aus denen eine analytische Darstellung der Dauerlinie folgt. Beim zweiten Lastmodell werden die einzelnen Lastverläufe in einem definierten Zeitraster für definierte Standardtage eines Jahres (Werktag, Samstag, Sonntag der einzelnen Jahreszeiten) vorgegeben. Dieses Modell berücksichtigt dementsprechend die Gleichzeitigkeit individueller Lastzustände und ermöglicht die Bestimmung freier Übertragungskapazitäten in definierten Zeitfenstern. Die Simulationsrechnungen werden für die einzelnen zeitlichen Lastzustände des Jahres durchgeführt. Die Ergebnisse liegen für die individuellen Zustände und als Jahressummen- und Jahresmittelwerte vor. Zum Vergleich der Einnahmen durch Durchleitungsentgelte mit dem auf das betrachtete Jahr bezogenen Investitionskostenanteil von Betriebsmitteln wird die Annuitätenmethode zugrunde gelegt. Als Eingangsdaten sind hierzu die Investitionskosten, das Investitionsjahr, der Kalkulationszins und die erwartete Lebensdauer des Betriebsmittels in der Netzdatenbank vorzugeben.

Der Schwerpunkt der zukünftigen Arbeiten liegt in der Formulierung und Implementierung von Modellen zur kostenmäßigen Bewertung von Netzdienstleistungen. Bei den im Rahmen von Durchleitungen in Anspruch zu nehmenden Netzdienstleistungen ist zu unterscheiden, ob diese ausschließlich durch Netzbetreiber bereitgestellt werden müssen, oder ob sich für einzelne Leistungen ein Angebotsmarkt entwickeln kann.

T. Nikodem, R. Palma

EV 9702, EV 9718, EV 9739

#### **4.1.2 Gekoppelte Wirk- und Blindleistungsoptimierung unter Berücksichtigung innovativer Lastflußsteuerung**

Technische und wirtschaftliche Veränderungen führen derzeit weltweit zu einer Umstrukturierung der elektrischen Energieversorgung. Diese Änderungen resultieren aus

- der politisch angestrebten Öffnung der Energieversorgung zur Schaffung eines wettbewerbsorientierten Marktes,
- der Verfügbarkeit thyristorgesteuerter Betriebsmittel, die eine anpassungsfähige Leistungsflußregelung und eine Erhöhung der übertragbaren Leistung in vorhandenen Netzen zur Folge haben,
- der Ausweitung der Energieübertragungssysteme (EÜS) durch Kopplung vormals isoliert betriebener Hoch- und Höchstspannungsnetze.

Die Umgestaltung der gegenwärtigen Strukturen stellt die Energieversorgungsunternehmen (EVU) vor neue Herausforderungen, um eine Anpassung an die zukünftigen Rahmenbedingungen vorzunehmen. Zur Gewährleistung einer auch in der Zukunft zuverlässigen, sicheren, ökonomischen und ökologischen Energieversorgung sind neue Planungs- und Betriebsmethoden zu entwickeln.

Grundlegend für die Ermöglichung einer Durchleitung elektrischer Energie durch bestehende EÜS in unterschiedlichen Eigentumsverhältnissen ist die Schaffung politischer Voraussetzungen, deren Realisierung derzeit in der Politik diskutiert wird. Ferner ist eine Anpassung der bestehenden Betriebsführung, sowie eine Berücksichtigung der technischen Randbedingungen der EÜS notwendig, da die Hoch- und Höchstspannungsnetze durch Zubaumaßnahmen nur langfristig zu verändern sind. Eine Möglichkeit zur kurzfristigen Veränderung der Übertragungseigenschaften des EÜS bieten die innovativen Betriebsmittel (IB), mit deren Eigenschaften eine aktive Lastflußsteuerung vorgenommen werden kann. Durch ihre Fähigkeit, sowohl längs- und querregele als auch kompensierende Steuerungsmöglichkeiten bereitzustellen, führen die IB zu den schnell anpassungsfähigen EÜS, die oftmals durch den Begriff der FACTS (Flexible AC Transmission Systems) charakterisiert werden. Die Berücksichtigung der Steuerungsmöglichkeiten von IB in der Zustandsoptimierung wird in naher Zukunft an

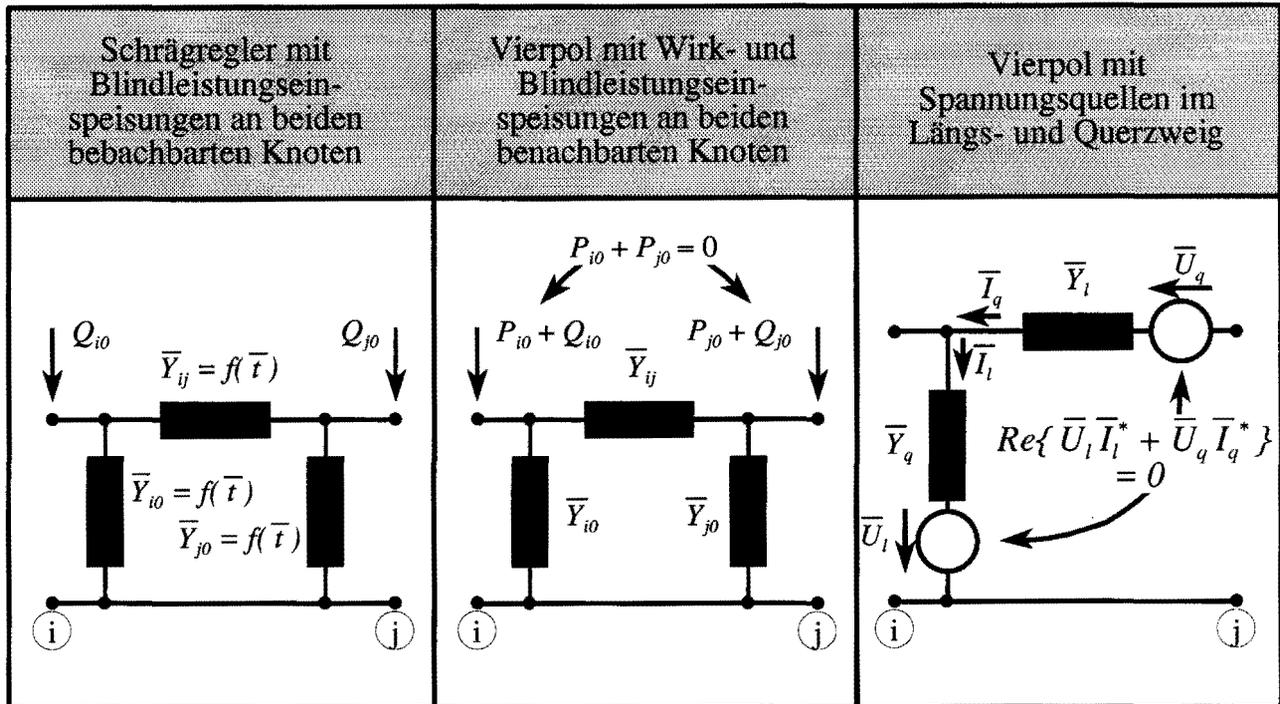
Bedeutung gewinnen, um eine Maximierung des Gewinnes, der bei der Bereitstellung von Übertragungskapazitäten erzielt werden kann, zu erreichen.

Die derzeit durchgeführte zweigeteilte Zustandsoptimierung in der Prozeßleittechnik, bestehend aus der wirtschaftlichen Lastaufteilung und der Spannungs-Blindleistungsoptimierung (UQ-Optimierung), ist jedoch nur gültig, wenn die folgenden Voraussetzungen erfüllt sind:

- hohes und ausgeglichenes Verhältnis des Induktivitäts- zum Widerstandsbelag des Netzes ( $X/R$ -Verhältnis),
- keine Übertragungsengpässe nach der wirtschaftlichen Lastaufteilung.

Diese Bedingungen treffen derzeit noch für das engvermaschte, westeuropäische Hoch- und Höchstspannungsnetz zu. In naher Zukunft ergeben sich jedoch Einschränkungen in der Voraussetzung einer geringen Netzbelastung durch die o.g. politisch angestrebte Öffnung des Energiemarktes. Diese wird zu einer nennenswerten Belastung des Transportnetzes durch eine vermehrte Übertragung elektrischer Energie über weite Strecken führen. Die zusätzliche zum Teil bereits vollzogene Öffnung des europäischen Verbundnetzes UCPTE nach Osten hat ferner die Ausdehnung der Übertragungsleitungen und einen weiteren Energietransport aus oder in diese Gebiete zur Folge. Auch in dem bestehenden Verbundnetz wird es aufgrund eines weiteren Lastanstieges und den zunehmenden politischen Restriktionen beim Zubau von Übertragungsleitungen zu einer erhöhten Ausnutzung der Übertragungskapazitäten kommen. Neben den politisch bedingten Veränderungen führen auch technische Weiterentwicklungen zu einem  $X/R$ -Verhältnis, das den Anforderungen an einen hohen und ausgeglichenen Wert nicht genügt. So wirkt sich der wachsende Anteil der Verkabelung von Hochspannungsnetzen negativ auf den geforderten, hohen Wert des Quotienten  $X/R$  aus. Dieses Verhältnis wird ferner durch den Einsatz leistungsflußregelnder Betriebsmittel beeinflusst, deren Anteil durch die Verfügbarkeit von IB in Zukunft steigen wird.

Eine Nachbildung von IB für die stationären Betrachtungen im Rahmen der Zustandsoptimierung kann durch folgende Modelle erfolgen (Bild 4.1.3).

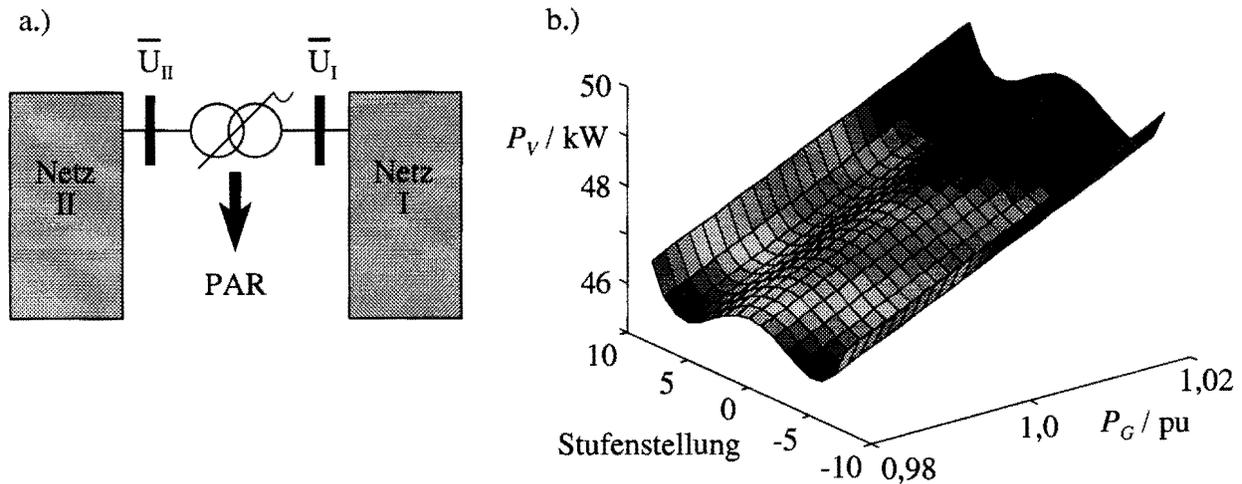


**Bild 4.1.3:** Modelle des UPFC in der stationären Netzberechnung

Die geschilderten Veränderungen machen die entkoppelte Betrachtung der Zustandsoptimierung hinfällig und erfordern eine gekoppelte Wirk- und Blindleistungsoptimierung (GWB), welche die erweiterten Steuerungsmöglichkeiten von IB berücksichtigt. Durch diese Ergänzungen wird die Zustandsoptimierung, die durch die Eigenschaften

- nichtlineare Zielfunktion
- nichtlineare Gleichheits- und Ungleichheitsbedingungen
- kontinuierliche und diskrete Zustandsvariablen

beschrieben wird, um die Nichtkonvexität des Optimierungsproblems erweitert. Diese Eigenschaft liegt dann vor, falls Betriebsmittel mit querregelnden Eigenschaften an der Energieübertragung beteiligt sind, was bereits bei der Kopplung von Netzbezirken über einen Phasenwinkelregler (PAR) deutlich wird (Bild 4.1.4 a). Bei der auf diese typische Verbund-situation angewandten GWB stehen als Variablen neben der Stufenstellung  $s$ , die das komplexe Übersetzungsverhältnis  $t$  beeinflusst, der Wirkleistungsfluß  $P_G$  über die Kuppelleitung für eine Optimierung zur Verfügung. Die Berechnung der Verlustleistung des Schrägreglers zeigt ein nicht-konvexes Verhalten dieser Funktion (Bild 4.1.4 b).



**Bild 4.1.4:** a) Modellsystem zur Veranschaulichung einer nicht-konvexen Zielfunktion  
 b) Übertragungsverluste  $P_V$  des PAR in Abhängigkeit der Stufenstellung  $s$  und des Wirkleistungsflusses  $P_G$  über das IB

Um den genannten Anforderungen Rechnung zu tragen, müssen höchste Anforderungen an das Optimierungsverfahren gestellt werden, um auch bei einer großen Anzahl nichtlinearer Nebenbedingungen zu einer zuverlässigen und gesicherten Lösung zu gelangen. Als Lösungsverfahren für ein Optimierungsproblem ohne Beteiligung von IB werden im allgemeinen die lineare oder quadratische Programmierung (LP, QP) oder der Newton-Raphson-Algorithmus (NRA) verwendet, die alle bei dem gegebenen konvexen Problem der UQ-Optimierung sicher das Optimum finden. Beim Einsatz von IB in der GWB liegt hingegen ein Optimierungsproblem vor, welches nicht mehr streng konvex ist und Nebenoptima aufweist.

Als Optimierungsverfahren umfangreicher konvexer Probleme hat sich die sequentielle quadratische Optimierung (SQP) als Instrument zur Lösung komplexer Aufgaben herausgestellt. Die SQP baut wie der NRA auf einer Optimierung der Zielfunktion auf, die gemäß einer Lagrange-Funktion formuliert wird. Eine Implementierung der Ungleichheitsnebenbedingungen ist im Gegensatz zum NRA unkritisch, da die schlechte Konditionierung der Systemmatrizen des NRA bei Integration der Ungleichheitsnebenbedingungen mit Hilfe von Bestrafungstermen entfällt. Die Formulierung einer Zielfunktion der GWB, deren Aufgabe die Minimierung der Erzeugungskosten im betrachteten EÜS ist, erfolgt mittels der aus der wirtschaftlichen Lastaufteilung bekannten Funktion:

$$F = \sum_{i=1}^{n_G} \left( \alpha_i P_{Gi}^2 + \beta_i P_{Gi} + \gamma_i \right) \stackrel{!}{=} \min \quad (4.1.1)$$

Im Gegensatz zu heute üblichen Implementierungen mittels der QP, bei der ein sukzessives Lösen von Optimierungsaufgabe und Lastflußrechnung in jeder Iteration erfolgt, bietet die SQP die Möglichkeit einer direkten Integration der Lastflußgleichungen. Diese können zu einer Gleichheitsnebenbedingung

$$g(x) = 0 \quad (4.1.2)$$

zusammengefaßt werden, wobei  $x$  den Zustandsvektor darstellt. Durch Formulierung der Zielfunktion und der Gleichheits-Nebenbedingung als Lagrange-Funktion und anschließender Entwicklung als Taylor-Reihe kann die folgende, in jeder Iteration zu lösende Optimierungsaufgabe aufgestellt werden, in die ferner Ungleichheits-Nebenbedingungen einfließen können:

$$\begin{aligned} \text{Minimiere:} \quad & \frac{1}{2} \Delta x^T H \Delta x + \nabla F^T \Delta x + F \\ \text{mit:} \quad & J^T \Delta x + g(x) = 0 \end{aligned} \quad (4.1.3)$$

Die zu minimierende Funktion der QP setzt sich aus einer quadratischen Zielfunktion und den partiellen Ableitungen zweiter Ordnung zusammen, die alle analytisch berechnet werden können. Durch die Einbeziehung von Informationen aus der zweiten Ableitung kann so ein Konvergenzverhalten zweiter Ordnung erzielt werden. Die Beschreibung als quadratische Optimierungsaufgabe erlaubt zudem eine Anwendung existierender, weit verbreiteter Programmpakete zur QP, deren zuverlässige und schnelle Konvergenz genutzt werden kann, um zu einer gesicherten Lösung zu gelangen.

Neben der Implementierung der GWB in ein am Lehrstuhl entwickeltes, objekt-orientiert aufgebautes Programmpaket zur Lastflußberechnung, stehen in der momentanen Arbeitsphase Tests der verschiedenen Modelle der IB im Vordergrund, um Rückschlüsse auf die unterschiedlichen Konvergenzeigenschaften dieser Modelle vornehmen zu können.

C. Lehmköster

### 4.1.3 Eigenschaften der Fehlerdiagnose mit einem Expertensystem und mit neuronalen Netzen

In den vergangenen Jahren sind in Zusammenarbeit mit dem Zentrum für Expertensysteme Dortmund (ZEDO) ein wissensbasiertes System (XPS) und ein auf betriebsmittelbezogenen künstlichen neuronalen Netzen (device-specific artificial neural network, DS-ANN) beruhendes Verfahren zur Online-Fehlerdiagnose in elektrischen Energieübertragungssystemen (EÜS) entwickelt worden. Beide Systeme haben die Zielsetzung, den Netzleitenden bei Fehlersituationen im EÜS von der Analyse der zum Teil umfangreichen und eventuell auch fehlerhaften bzw. unvollständigen Informationen des Schutzsystems zu entlasten, damit er seine volle Aufmerksamkeit auf die Auswahl geeigneter Maßnahmen zur Störungsbehebung richten kann. Durch eine schnelle und fehlerfreie Auswertung der verfügbaren Informationen kann eine schnelle Wiederversorgung der Verbraucher erzielt werden und die wirtschaftlichen Auswirkungen eines Versorgungsausfalles können minimiert werden.

Neben den Anforderungen an ein Verfahren zur Fehlerdiagnose, die aus Sicht der Netzbetriebsführung formuliert werden können, und den technischen Randbedingungen, die sich aus der vorhandenen Infrastruktur im Bereich der Schutz- und Leittechnik ergeben, sind auch die Zielsetzungen des Herstellers von Netzleitsystemen und des Anwenders bei der Entwicklung neuer Verfahren zu beachten, um eine praxisgerechte Lösung zu entwickeln. Die Liste der Anforderungen an ein System zur Fehlerdiagnose läßt sich unterteilen in grundsätzliche Anforderungen und Akzeptanzkriterien (Tabelle 4.1.2).

**Tabelle 4.1.2:** Anforderungen an ein System zur Fehlerdiagnose

Grundsätzliche Anforderungen	Akzeptanzkriterien
<ul style="list-style-type: none"><li>● Robustheit gegenüber:<ul style="list-style-type: none"><li>• Eingeschränktem Informationsangebot</li><li>• Schutzgeräte- oder Schalterversagern</li><li>• Übertragungsfehlern</li></ul></li><li>● Übertragbarkeit auf:<ul style="list-style-type: none"><li>• Verschiedene Schutzsysteme</li><li>• Unterschiedliche EÜS-Topologien</li></ul></li><li>● Unterscheidung zwischen Einfach- und Mehrfachfehlern</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>● Antwortzeit</li><li>● Zuverlässigkeit der Diagnosen</li><li>● EMS-Integration</li><li>● Systempflege</li></ul>

Nachfolgend werden die charakteristischen Eigenschaften der beiden Systeme zur Fehlerdiagnose gegenübergestellt und in Zusammenhang mit den o.g. Anforderungen auszugswise bewertet. Eine genauere Beschreibung der eingesetzten Verfahren und ihrer charakteristischen Eigenschaften kann den zurückliegenden Jahresberichten und Veröffentlichungen entnommen werden.

Während das Expertensystem zur Fehlerdiagnose (XPS) für die spezielle Situation eines untertägigen EÜS konzipiert worden ist, liegt das Einsatzgebiet der DS-ANN im Bereich der Hoch- und Höchstspannungsnetze. Dennoch sind die generellen Aussagen (vgl. Tabelle 4.1.3) über die beiden Systeme zur Fehlerdiagnose auch bei deren Einsatz für andere EÜS übertragbar.

**Tabelle 4.1.3:** Zusammenfassung der Eigenschaften beider Verfahren zur Fehlerdiagnose

	XPS	DS-ANN
Erwerb des Anwendungswissens	(X)	X
Systempflege	XX	X
Zuverlässigkeit der Diagnosen	X	X
Robustheit	(X)	X
Unterscheidung Einfach-/Mehrfachfehler	(X)	X(X)
Anpassung an Topologieänderungen	XX	XX
Antwortzeit	X	XX
Integrationsfähigkeit	X	X
Übertragbarkeit	XX	XX

- (X) erfüllt Anforderungen (mit Einschränkungen)
- X erfüllt Anforderungen
- XX besondere Eigenschaft des Verfahrens

XPS und DS-ANN unterscheiden sich grundsätzlich in dem Erwerb und der Repräsentation des Anwendungswissens. XPS verwendet generisch kodierte Regeln für Fehlersituationen, die durch spezielle Topologie- und Meldungskonstellationen charakterisiert sind. Zur Erstellung der Regelbasis ist die Analyse einer größeren Anzahl von Fehlersituationen notwendig. Demgegenüber sind die DS-ANN aufgrund der für neuronale Netze typischen Lernverfahren in der Lage, dieses Anwendungswissen automatisch aus solchen Beispielen zu extrahieren. Dabei obliegt dem Entwickler die Aufgabe, eine möglichst repräsentative Menge von Fehlersituationen auszuwählen, die den DS-ANN die Möglichkeit zur Verallgemeinerung bieten.

Während beim XPS das Anwendungswissen explizit in Form von Regeln vorliegt, die bei der Auswertung eine Erklärung der Ergebnisse ermöglichen, ist das erworbene Wissen bei den DS-ANN implizit hinterlegt und zur Begründung eines Ergebnisses nicht verfügbar. Die explizite Wissensrepräsentation und die Erklärungskomponente beim XPS bieten Vorteile in Hinblick auf die Systempflege und Anwenderakzeptanz, haben aber bei der konkreten Anwendung zur Fehlerdiagnose, bei der das eigentliche Ergebnis der Fehlerdiagnose im Vordergrund steht, geringe Bedeutung.

Zahlreiche Tests, bei denen Fehlfunktionen des Schutzes und der Informationsübertragungstechnik angenommen worden sind, haben gezeigt, daß beide Systeme mit einem ähnlichen Grad an Zuverlässigkeit und Genauigkeit reagieren, sofern entsprechende Szenarien auch beim Wissenserwerb verwendet worden sind. Während XPS nur diejenigen Situationen bewerten kann, auf die eine Beschreibung in der Regelbasis zutrifft, können die DS-ANN aufgrund der Assoziations- und Interpolationseigenschaften neuronaler Netze auch auf Situationen reagieren, die nicht explizit als Beispielszenarien zum Anlernen der DS-ANN verwendet worden sind. Die Robustheit von XPS kann verbessert werden, indem möglichst zahlreiche unterschiedliche Fehlerszenarien als Regeln in der Regelbasis implementiert werden. Durch die sequentielle Abarbeitung der Regeln führt eine Erweiterung der Regelbasis zwangsläufig zu erhöhten Antwortzeiten, während die Antwortzeit der DS-ANN unabhängig von der Anzahl der Lernbeispiele ist. Mehrfachfehler können von beiden Systemen erkannt werden. Die DS-ANN können aufgrund ihrer verteilten Architektur Mehrfachfehler ohne zusätzlichen Aufwand erkennen. XPS setzt zur Mehrfachfehlererkennung die Auswertung der Regelbasis nach einem verifizierten Fehler fort, wodurch die Antwortzeit ansteigt.

Die Antwortzeit von XPS zur Auswertung, das in einer Leitwarte einer Schachanlage eingesetzt wird und zwei EÜS mit jeweils ca. 20 Stationen, 100 Leitungen und 50 Transformatoren überwacht, beträgt maximal 15 sec. (PC/Pentium 166, UNIX). Das zur Simulation verwendete EÜS, dessen Daten innerhalb des DS-ANN-Projektes von einem Energieversorgungsunternehmen zur Verfügung gestellt worden sind, umfaßt 23 Stationen, 20 Transformatoren und 24 Leitungen verschiedener Spannungsebenen (380/220/110/50 kV). Das Ergebnis der DS-ANN basierten Fehlerdiagnose steht nach ca. 0,5 sec. (DEC Alpha 3600, UNIX) zur Verfügung. Im Vergleich mit der Zeitdauer zur Übertragung und Bereitstellung der

Meldungen über das SCADA System, die einige Sekunden bis mehrere Minuten betragen kann, sind die Systeme zur Fehlerdiagnose als hinreichend schnell zu bewerten, um das Betriebsführungspersonal in Fehlersituationen effektiv zu unterstützen.

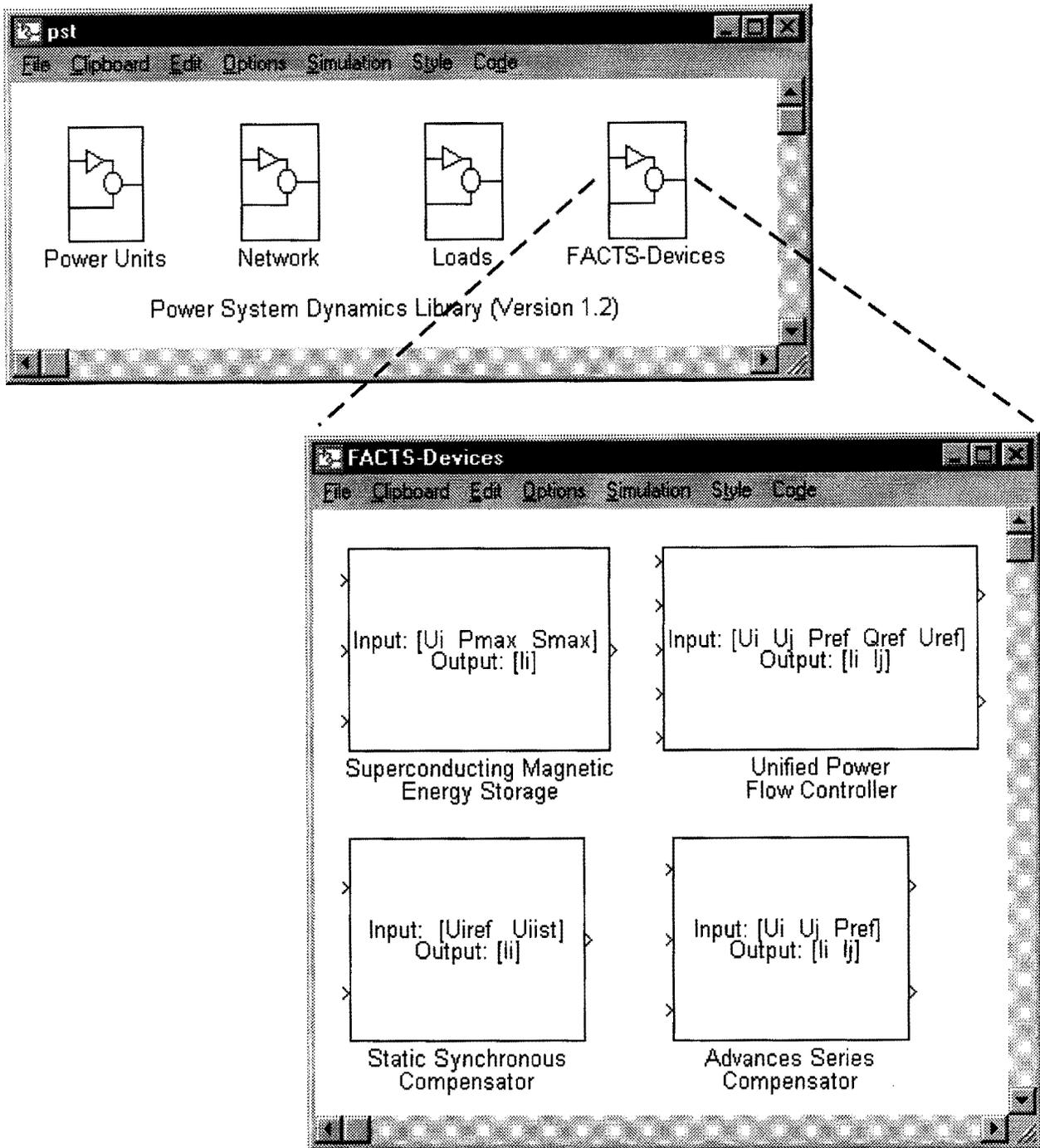
D. Kuhlmann, V. Bühner (ZEDO)

Diese Forschungsarbeit wird in Zusammenarbeit mit dem Zentrum für Expertensysteme Dortmund e.V. (ZEDO) durchgeführt.

#### **4.1.4 Blockorientierte Simulationsumgebung für dynamische Netzberechnungen von FACTS**

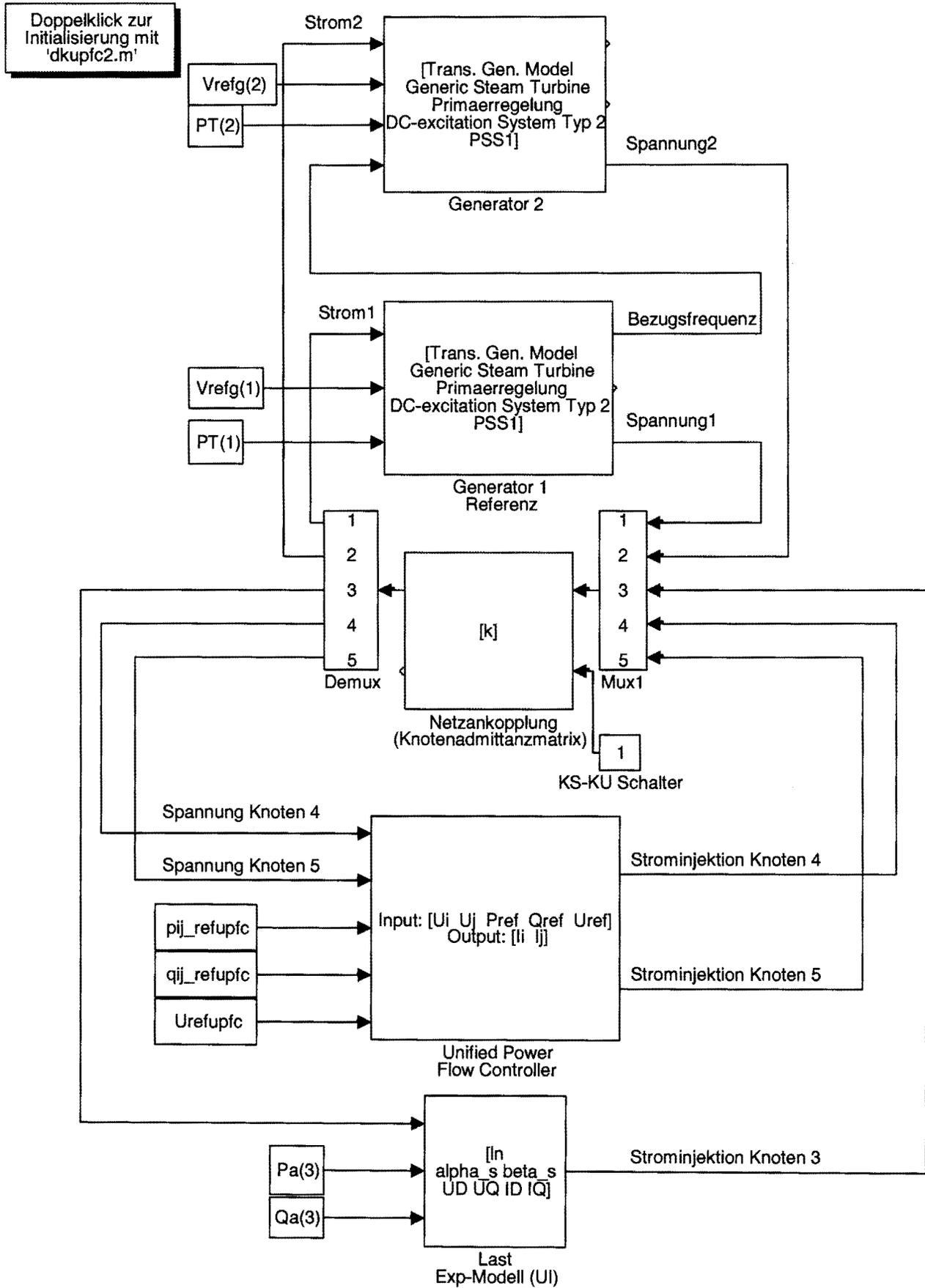
Die Berechnung und Visualisierung dynamischer Vorgänge in elektrischen Energieübertragungssystemen im Kurz-, Mittel- und Langzeitbereich ist ein wichtiges Hilfsmittel zur Systemanalyse, -synthese und zum Reglerentwurf. Dabei ist eine übersichtliche graphische Darstellung der zu simulierenden Systeme, eine modulare Erweiterbarkeit und die graphische Ausgabe sowohl aller real meßbaren als auch internen Prozeßgrößen im Sinne einer einfachen und komfortablen Bedienbarkeit von großem Vorteil.

Es wurde eine leistungsfähige objektorientierte Simulationsumgebung in Form einer Modell- und Komponentenbibliothek in MATLAB/SIMULINK™ implementiert (Bild 4.1.5), die diese Vorteile bietet. Durch die Verfügbarkeit einer breiten Palette mathematisch-technischer Werkzeuge können sowohl konventionelle als auch innovative Verfahren der Informationsverarbeitung, beispielsweise zum Reglerentwurf, mit geringem Aufwand in Simulationsmodelle elektrischer Energieübertragungssysteme integriert werden. Durch die Integration verschiedener schnell regelbarer leistungselektronischer Betriebsmittel (siehe Bild 4.1.5), sog. FACTS-Geräte (Flexible AC Transmission Systems) steht damit die Möglichkeit offen, die Auswirkungen dieser Betriebsmittel auf das dynamische Verhalten von Energieübertragungssystemen zu untersuchen und neue Regelungsmethoden zu entwickeln (siehe dazu Berichte 4.2.2 und 4.2.3). Dabei wurden parallele, serielle und seriell-parallele FACTS-Geräte implementiert, die repräsentativ sind für verschiedene Ausführungen, wie beispielsweise allgemeine Lastflußregler, schnelle Energiespeicher, Quer- und Längskompensatoren.



**Bild 4.1.5:** Modell- und Komponentenbibliothek zur dynamischen Simulation elektrischer Energieübertragungssysteme

Da eine Vielzahl physikalischer Effekte bereits durch die Berechnung von Effektivwert-Größen sowohl qualitativ als auch numerisch bestimmt werden können, beruhen die mit dieser sog. Power System Toolbox (PST) durchgeführten Simulationen auf dreiphasigen Berechnungen der elektrischen Größen, wodurch die Rechenzeit bei größeren komplexen Systemen in akzeptablen Grenzen gehalten werden kann.



**Bild 4.1.6:** Beispiel einer System-Datei für ein fünfknotiges Netz

Der Berechnung dynamischer Vorgänge, die z.B. durch Lastveränderungen, Kurzschlüsse, Kurzunterbrechungen und Änderungen der Führungsgrößen ausgelöst werden können, geht eine stationäre Berechnung zur Bestimmung des anfänglichen Systemzustandes voraus. Diese beinhaltet eine Lastflußrechnung und eine numerische Bestimmung der inneren Prozeßgrößen durch einen Optimierungsalgorithmus.

Das individuell zu simulierende System ist durch eine textuelle Parameter- und eine blockorientierte graphische System-Datei festgelegt. Somit können Modifikationen der Struktur und Betriebsmittelauswahl einerseits und der Systemparameter andererseits getrennt voneinander behandelt werden. Bild 4.1.6 zeigt das Beispiel einer System-Datei in SIMULINK™ für ein fünfknotiges Energieversorgungsnetz mit zwei Kraftwerken, einer Last und einem allgemeinen Lastflußregler.

Zu simulierende Szenarien in unterschiedlichen Zeitbereichen und beliebiger zeitlicher Länge können zu Beginn einer Simulation vollständig festgelegt werden, indem die dazu erforderlichen Sollwert- und Parameteränderungen oder Strukturumschaltungen in die System-Datei integriert werden, worauf die Simulation ohne weitere Eingriffe oder Unterbrechungen ausgeführt werden kann.

Ch. Becker, Ch. Rehtanz

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

### **4.2.1 Lastmodellierung in Mittelspannungsnetzen**

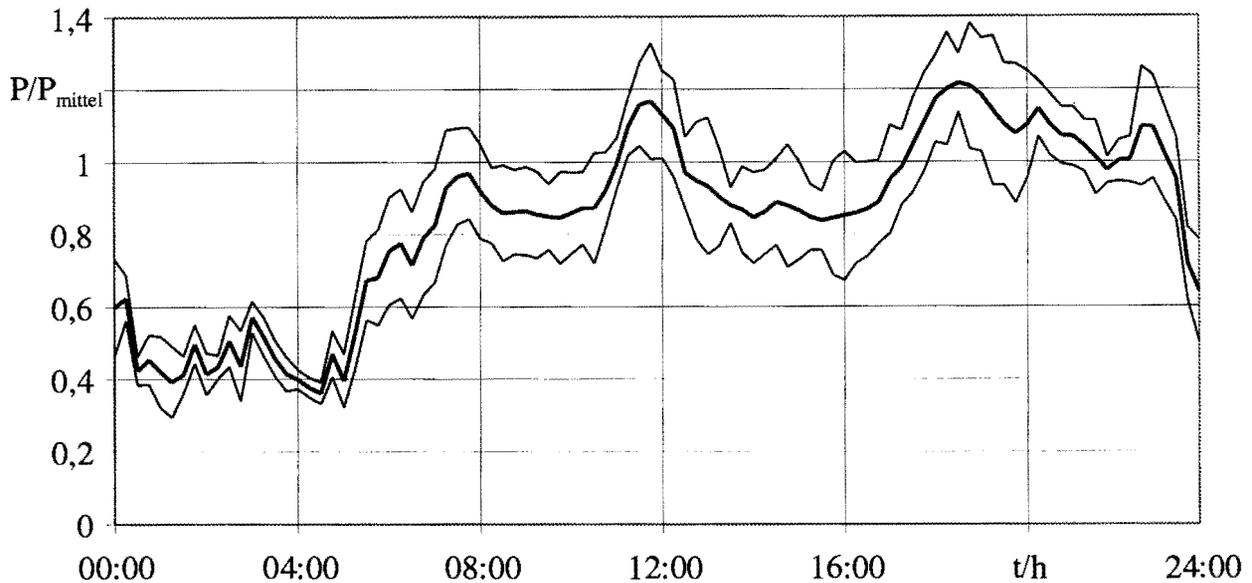
Die Beschreibung des Lastverhaltens in Mittel- und Niederspannungsnetzen ist für die Ausbauplanung und die Betriebsführung von großer Bedeutung. Die wachsende Integration von dezentralen Energieumwandlungsanlagen in Form von Windkraft, Brennstoffzellen, BHKW's, etc. sowie die Einführung eines liberalisierten Energiemarktes in Deutschland erfordern eine Beschreibung der Kundenlast als Funktion der Zeit.

Die bisherige Ausbauplanung und Betriebsführung der Versorgungsnetze orientiert sich weitestgehend an Schleppzeigermessungen, mit denen eine Ermittlung der maximalen Belastung auf einem Netzstrang möglich ist. Die Schleppzeigermessung gibt keinen Aufschluß darüber, wie häufig bzw. wie lange der maximale Belastungswert innerhalb eines Ablesezeitraums aufgetreten ist. Die Anpassung der für die Netzberechnung zugrundegelegten Verbraucherlast an diese Schleppzeigermessung innerhalb eines Netzstranges erfolgt dann vom Planungsingenieur über die Anschlußleistung an den Ortsnetzstationen und Gleichzeitigkeitsfaktoren. Der Gleichzeitigkeitsfaktor berücksichtigt die Tatsache, das die Maximalleistung mehrerer zusammengefaßter Kunden nicht zum gleichen Zeitpunkt angefordert wird.

Durch die oben beschriebene Lastmodellierung geht der zeitliche Verlauf der Verbraucherlast verloren. Die Modellierung der Verbraucherlast orientiert sich an dem maximalen Belastungszustand innerhalb eines Netzbezirkes, so daß der Schwachlastzustand nur unzureichend bzw. überhaupt nicht nachgebildet werden kann. Insbesondere für die Bewertung der Anschlußfähigkeit von dezentralen Energieumwandlungsanlagen ist die Kenntnis der minimalen Verbraucherlast wichtig.

Der zeitliche Lastverlauf von Tarifkunden läßt sich mit dem Verfahren der betriebsmittelbezogenen Lastmodellierung bestimmen. Ausgehend von Strommessungen in den Sammelschienen-Abgangsfeldern eines Netzbezirkes, den Jahresenergieverbräuchen an den jeweiligen Ortsnetzstationen sowie der Verbraucherzusammensetzung (Anteil Haushalt, Handel, Speicherheizung, etc.) an jeder Ortsnetzstation läßt sich der Lastverlauf mittels eines Estimations-

algorithmus bestimmen. Die Estimation wird dabei für jede Jahreszeit für die Gruppe der Werktage, Samstage und Sonntage durchgeführt. Bild 4.2.1 zeigt die bezogene Wirkleistung der Verbrauchergruppe Haushalt für einen Sommer-Werktag incl. der errechneten Standardabweichung.



**Bild 4.2.1:** Estimierter Lastverlauf der Verbrauchergruppe Haushalt für einen Sommer-Werktag

Schwierig gestaltet sich die Nachbildung der Sondervertragskunden. Sondervertragskunden zeichnen sich im allgemeinen durch ein sehr heterogenes Verhalten aus. Im Gegensatz zu der Verbrauchergruppe der Haushalte existieren deutlich weniger Sondervertragskunden in einem Netzbezirk. Für die Anwendung der betriebsmittelbezogenen Lastmodellierung ist allerdings ein dominantes Verhalten in einem Netzstrang erforderlich, um eine Estimation dieser Kunden mit geringem Fehler zu ermöglichen. Eine sorgfältige Nachbildung von Sondervertragskunden ist allerdings erforderlich, da es sich bei diesen Kunden im allgemeinen um leistungsstarke Verbraucher handelt, die maßgeblichen Einfluß auf die Netzbetriebsführung besitzen.

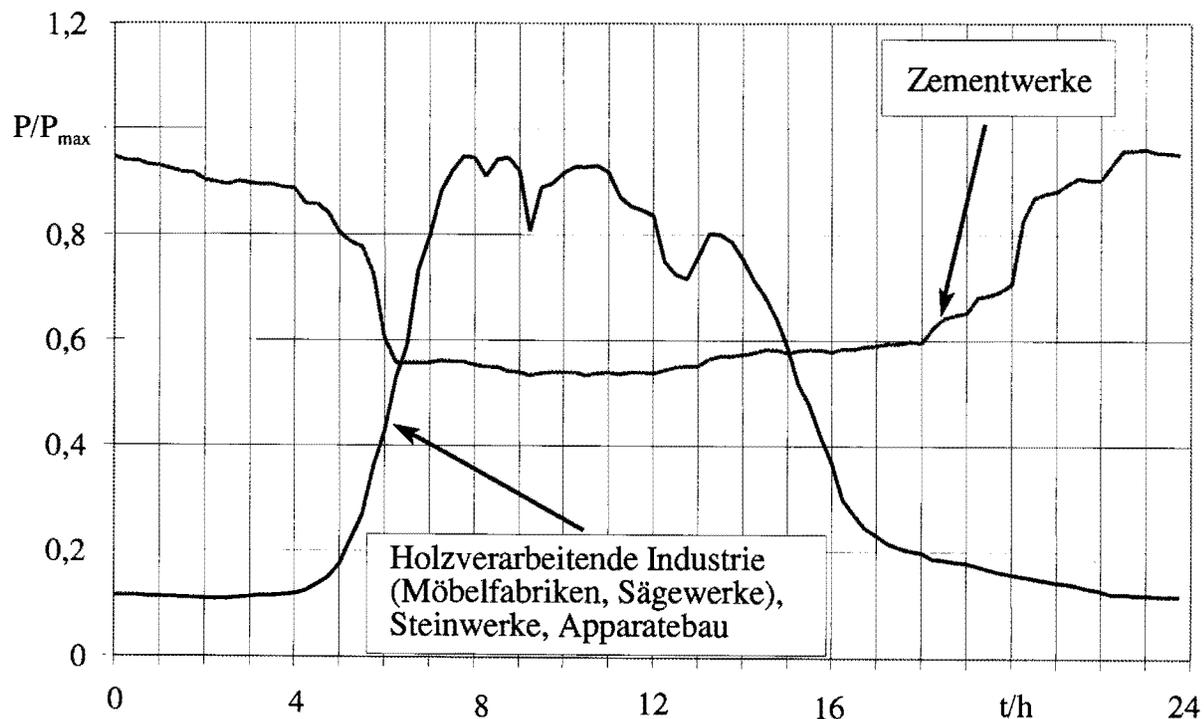
Für die Nachbildung der Sondervertragskunden ist deshalb eine andere Vorgehensweise gewählt worden. Aufbauend auf insgesamt 300 Lastgangmessungen über ein ganzes Jahr der verschiedensten Sondervertragskunden innerhalb eines gesamten EVU-Versorgungsgebietes sind mittels der Clusteranalyse Gruppenbildungen durchgeführt worden. Die Clusteranalyse führt eine Klassifizierung von Objekten (Sondervertragskunden) durch, die innerhalb eines Clusters eine möglichst homogene und zwischen den Clustern eine möglichst heterogene

Zuordnung durchführt. Durch eine auf statistischen Verfahren aufbauende Prüfgrößenberechnung läßt sich die optimale Clusteranzahl bestimmen, die eine signifikante Beschreibung der Sondervertragskunden mittels der Clusterzentren bei geringem Fehler ermöglicht.

Zusammenfassend lassen sich folgende Aussagen durch die Clusteranalyse ableiten:

- die 300 Sondervertragskunden lassen sich durch eine handhabbare Zahl von 8 Clustern beschreiben,
- die Prüfgrößenberechnung für die gefundene Clusterstruktur zeigt, daß eine Typisierung bestimmter Sondervertragskunden mittels Clusterzentren möglich ist,
- im Gegensatz zu Tarifkunden ist der jahreszeitliche Einfluß auf die Verbraucherleistung bei Sondervertragskunden gering,
- die Verläufe der Clusterzentren sind plausibel und lassen sich interpretieren.

Beispielhaft werden im Bild 4.2.2 zwei Clusterzentren für einen Winter-Werktag dargestellt. Das eine Clusterzentrum beschreibt Betriebe des Holzverarbeitenden Gewerbes mit vorwiegend manuellen Tätigkeitsbereichen wie z. B. Möbelfabriken. Das andere Clusterzentrum enthält ausschließlich Zementwerke.



**Bild 4.2.2:** Ausgewählte Clusterzentren der Clusteranalyse

Das Clusterzentrum der Holzverarbeitenden Industrie mit vorwiegend manuellen Tätigkeitsbereichen zeigt deutlich die in den Pausenzeiten auftretenden Leistungseinbrüche infolge des Ausschaltens der manuellen Fertigungsmittel. Weiterhin ist das Schichtverhalten dieses Gewerbebereiches zu erkennen, bestehend aus einer einzigen Tagesschicht mit Arbeitszeiten zwischen 06:00 Uhr und 17:00 Uhr. Erwähnt werden muß, daß nicht die gesamte Holzverarbeitende Industrie durch das dargestellte Clusterzentrum repräsentierbar ist. Holzverarbeitende Industrie mit vorwiegend automatisierter Fertigung wie z. B. die spanplattenverarbeitende Industrie wird durch andere Clusterzentren repräsentiert.

Das Clusterzentrum, welches ausschließlich die Zementwerke enthält, zeigt, wie durch Tarifgestaltung bei leistungsstarken Kunden Einfluß auf den Lastverlauf genommen werden kann. Zementwerke reduzieren energieintensive Prozesse im Hochtarifbereich, um durch Zuschalten dieser Prozesse im günstigeren Niedertarifbereich wirtschaftliche Vorteile zu erlangen. Dieses Verhalten tritt nicht nur an Werktagen auf, sondern kann auch an Samstagen, Sonn- und Feiertagen beobachtet werden. Das Beispiel der Zementwerke läßt vermuten, daß durch eine differenziertere Tarifgestaltung auch für andere Kunden ein Anreiz geschaffen werden kann, das Verbraucherverhalten in bestimmten Grenzen zu ändern, um somit für die EVU's durch Vergleichmäßigung der Lastganglinie einen wirtschaftlicheren Betrieb der Netze zu ermöglichen.

J. Teupen

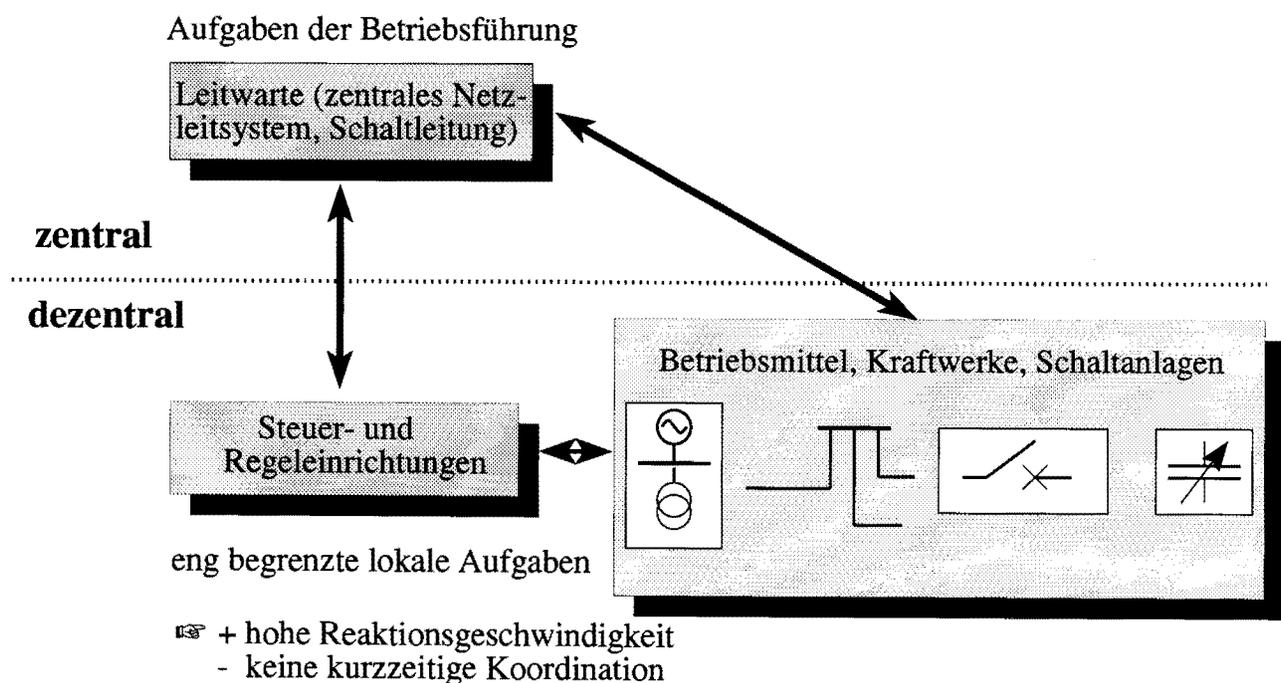
EV 9738

#### **4.2.2 Koordinierte Regelung für FACTS-Geräte zur Leistungsflußsteuerung als prozeßnahe Komponente autonomer Regelungssysteme**

Durch die zukünftige Entwicklung von einem regulierten zu einem deregulierten Markt für elektrische Energie entsteht die Notwendigkeit, elektrische Energieübertragungssysteme (EÜS) mit zusätzlichen Betriebsmitteln auszurüsten, die schnelle Eingriffsmöglichkeiten zur Regelung von Wirk- und Blindleistungsflüssen, zur Beeinflussung des Spannungsprofils und zur Stabilitätsverbesserung von EÜS bieten. Diese als FACTS-Geräte (Flexible AC

Transmission Systems) bezeichneten Betriebsmittel werden gegenwärtig im Rahmen verschiedener Studien und Testphasen als Prototypen eingesetzt und wurden vereinzelt schon für den Dauerbetrieb installiert.

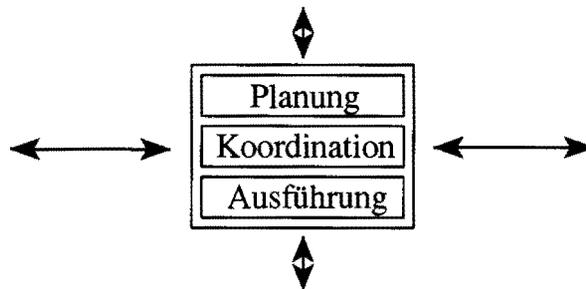
FACTS-Geräte zeichnen sich je nach Ausführung durch ihre Fähigkeit aus, im Kurzzeitbereich schrägregelnd, kompensierend oder speichernd in EÜS einzugreifen, um die oben genannten Eigenschaften zu ermöglichen. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, ihre Regelungen mit leit- und regelungstechnischen Einheiten der EÜS zu koordinieren, um sowohl im stationären als auch im dynamischen Fall die notwendige Versorgungssicherheit und -qualität zu gewährleisten. Der Bedarf einer koordinierten Regelung in EÜS mit FACTS-Geräten ist im Rahmen einer bereits abgeschlossenen Forschungsarbeit am Lehrstuhl gezeigt worden. Zur Entwicklung einer Koordinierung muß zunächst die Struktur der Prozeßführung von EÜS betrachtet werden. Diese ist in prinzipieller Form in Bild 4.2.3 dargestellt. Die zentrale Leitwarte übernimmt dabei u.a. die Kraftwerksführung mit Sekundärregelung, Optimierung und Überwachungsfunktionen, die Netzbetriebsführung mit Netzzustandsbeobachtung und Fernsteuerung von Schalthandlungen wie auch die Vorgabe von Führungsgrößen für lokale Regler. Diese sind dezentral angeordnet und bewerkstelligen z.B. die Primär- und Spannungsregelung.



**Bild 4.2.3:** Struktur der Prozeßführung von EÜS

Eine numerische oder auch strukturelle Modifikation von dezentral angeordneten Regelungen ist somit nur über die Leitwarte durchführbar.

Einen möglichen Lösungsansatz zur Realisierung von koordinierten Regelungen liefert die Theorie der autonomen Systeme. Grundbaustein eines autonomen Regelungssystems ist die in Bild 4.2.4 gezeigte autonome Komponente mit unterschiedlich stark ausgeprägten Instanzen "Planung", "Koordination" und "Ausführung". Der Grad der Ausprägung ist abhängig von der Leitebene, auf der die Komponente zum Einsatz kommt. Der wichtigste Aspekt dieses Ansatzes ist die Dezentralisierung von bisher zentral angeordneten Teilen der Prozeßführung, um die im Kurzzeitbereich liegenden Reaktionszeiten von FACTS-Geräten sinnvoll nutzbar machen zu können. Dabei spielen Regler-Adaptionen und Führungsgrößenveränderungen eine große Rolle.

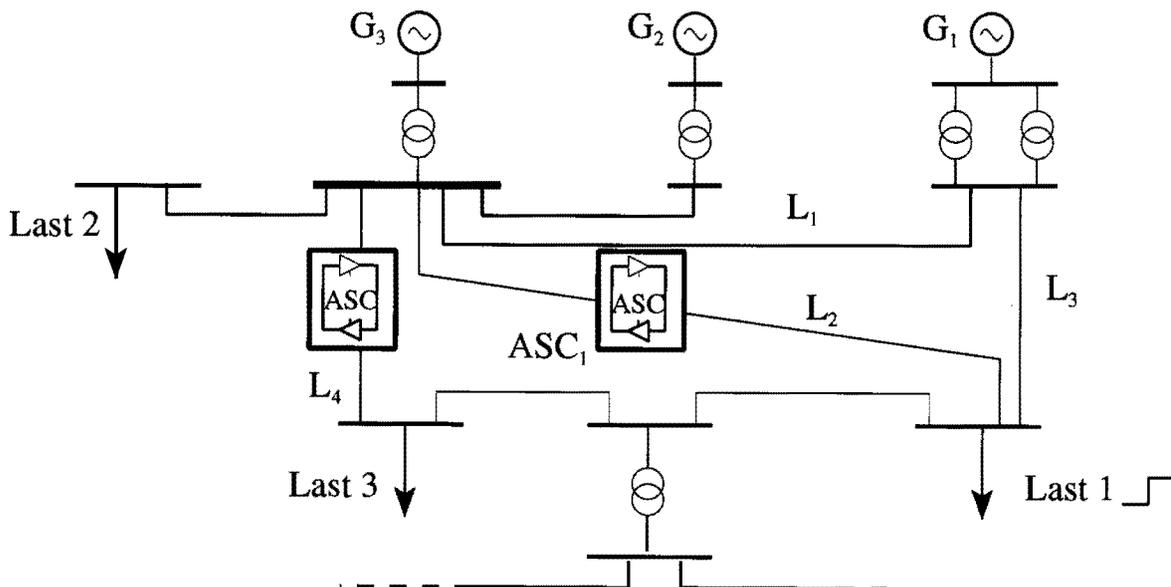


**Bild 4.2.4:** Autonome Komponente

Um autonome Komponenten auf allen Leitebenen spezifizieren und präzisieren zu können, muß die Voraussetzung gegeben sein, daß alle relevanten betriebsmittelnahen Regelungsaufgaben durch geeignete Regler-Module bezüglich ihrer Struktur festliegen und Parameter-einstellungen adaptierbar sind. Zur Koordination verschiedener Regelungen können dann beispielsweise Adaptionen durch andere autonome Komponenten vorgenommen werden.

Von den oben erwähnten Maßnahmen, die mit FACTS-Geräten ausgeführt werden können, soll hier die Koordination leistungsflußregelnder Funktionen von FACTS-Geräten mit der kraftwerksseitigen Wirkleistungs-Regelung (Primärregelung) aufgeführt werden. Eine koordinierte Regelung wird beispielhaft für das in Bild 4.2.5 gezeigte EÜS realisiert.

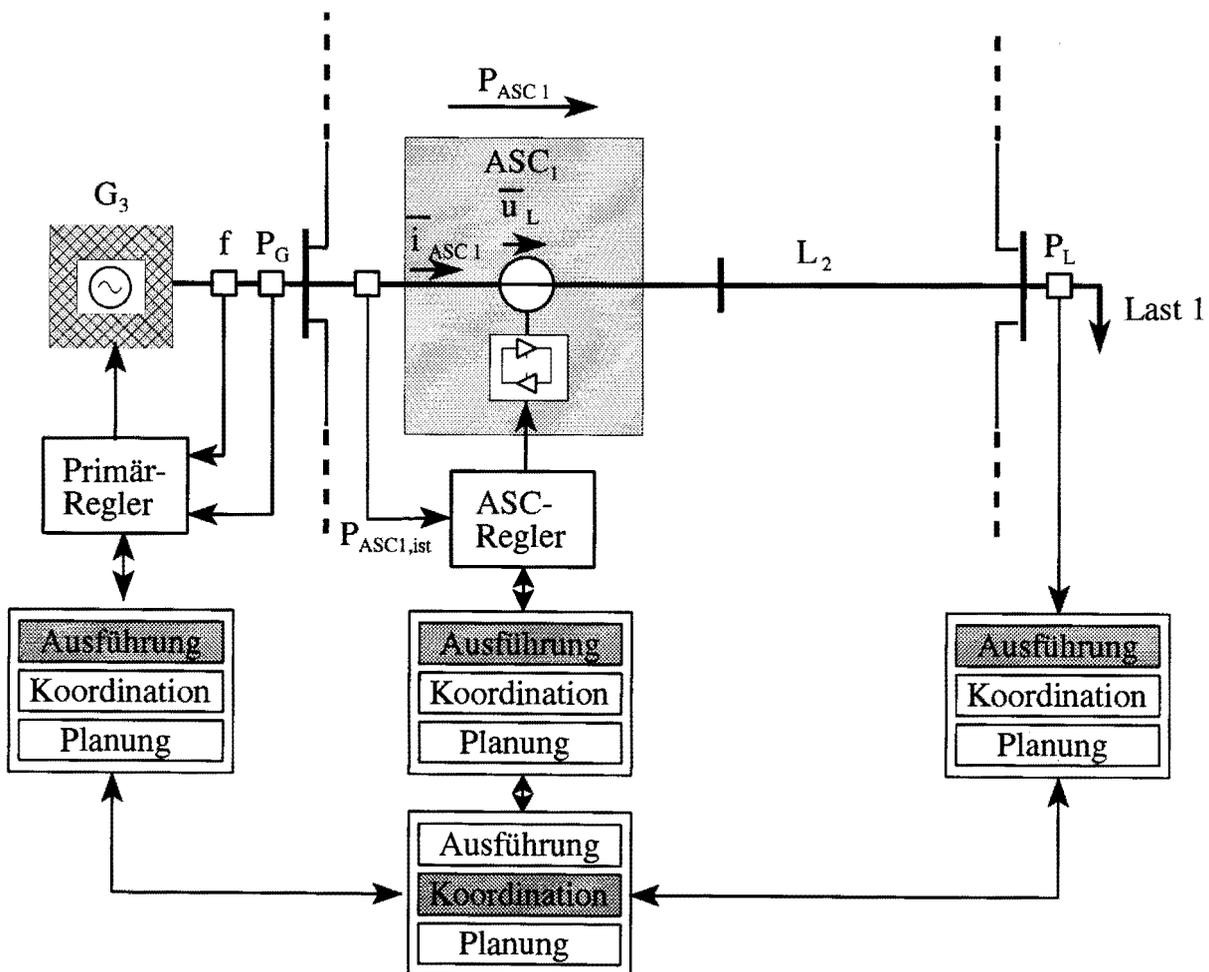
Die in Serie zu den Leitungen  $L_2$  und  $L_4$  installierten Längskompensationen ASC (Advanced Series Compensator) ermöglichen eine gezielte schnelle Leistungsflußsteuerung über diese Leitungen. Da allgemein durch die Verwendung von FACTS-Geräten eine höhere Auslastung vorhandener Übertragungskapazitäten erzielt werden soll, muß bei Inkrafttreten der Primärregelungen der Kraftwerke als Reaktion auf verbraucherseitige Leistungsschwankungen beobachtet werden, ob Leitungszüge des Netzes eventuell überlastet werden können. Dieses Problem stellt sich, da die Konstanthaltung von Wirkleistungsflüssen über bestimmte Leitungen mittels leistungsflußregelnder FACTS-Geräte eine Umleitung der Regelleistungsflüsse nach sich zieht. Es können also im betrachteten Beispielnetz bei konstant gehaltenen Sollwerten der ASC die Leitungen  $L_2$  und  $L_4$  nicht für die Übertragung von Primärregelleistung genutzt werden, so daß bei einem auftretenden Sprung der Last 1 eine Überlastung der Leitungen  $L_1$  und/oder  $L_3$  entstehen könnte, sofern sich  $G_2$  und  $G_3$  maßgeblich an der Primärregelung beteiligen. In diesem Fall muß die Änderung der Wirkleistungseinspeisung der Kraftwerke  $G_2$  und  $G_3$  mit dem Sollwert für den Leistungsfluß durch  $ASC_1$  abgestimmt werden.



**Bild 4.2.5:** Energieübertragungssystem mit längskompensierenden FACTS-Geräten

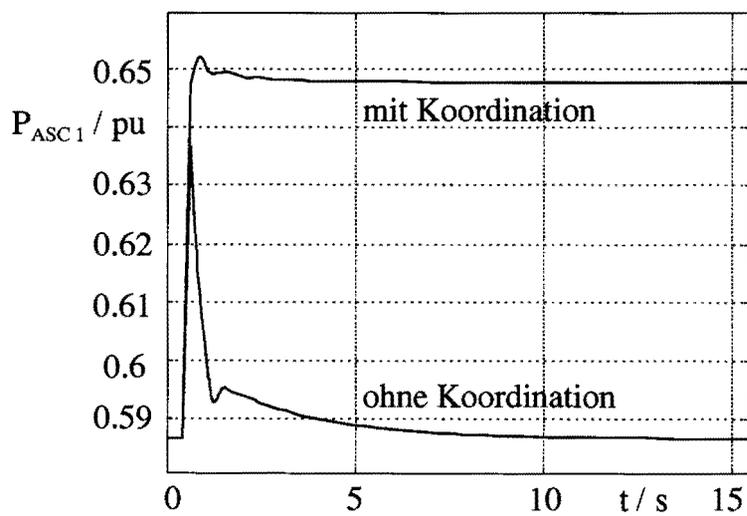
Ein strukturelles Konzept unter Verwendung autonomer Komponenten zur Abstimmung der Regelung des  $ASC_1$  in  $L_2$  mit der kraftwerksseitigen Wirkleistungsregelung von  $G_3$  zeigt Bild 4.2.6 vereinfacht für den Fall, daß eine Wirkleistungsänderung nur in Last 1 auftritt. Die Koordination muß allgemein unter allen nicht konstanten Lasten, Kraftwerksregelungen und

FACTS-Geräten erfolgen, d. h. Sollwertanpassungen müssen in jedem Fall vorgenommen werden, wenn ein leistungsflußregelndes Betriebsmittel in Serie zu einem Leitungszug geschaltet ist, der eine sich ändernde Last und ein an der Primärregelung beteiligtes Kraftwerk miteinander verbindet. Das autonome System muß entscheiden, welche Leitung, deren Leistungsfluß nicht mit FACTS-Geräten geregelt wird, möglicherweise überlastet werden kann und welches leistungsflußregelnde Betriebsmittel zur Abhilfe eine Sollwertveränderung erfahren muß. Autonome Komponenten, die sich in der Nähe von Lasten befinden, dienen lediglich der Meßwernerfassung und -aufbereitung. Dazu ist es erforderlich, daß Wirkleistungsabgaben an Netzstationen genau gemessen werden können. Für die meßtechnische Erfassung des Einflusses einer Primärregelung ist es ausreichend, die von dem betreffenden Kraftwerk abgegebene Wirkleistung zu messen, da durch die kurzen Antwortzeiten der FACTS-Geräte eine hinreichend schnelle Reaktion auf Änderungen der Wirkleistungseinspeisung garantiert ist.

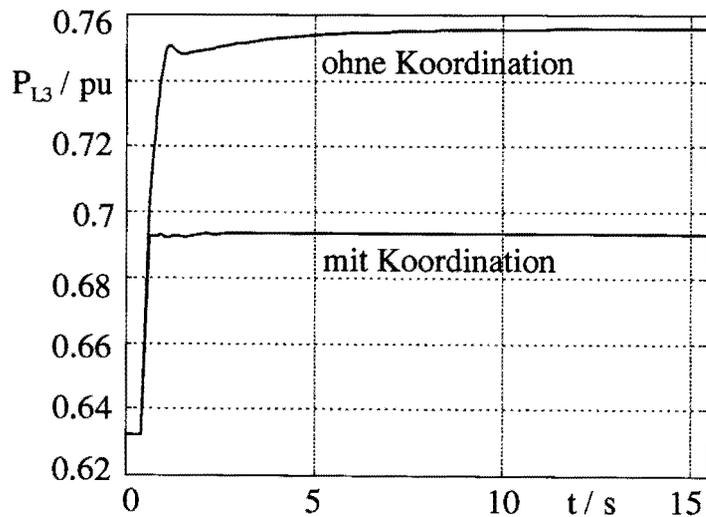


**Bild 4.2.6:** Beispiel eines autonomen Regelungssystems

Im folgenden werden die Auswirkungen einer koordinierten Regelung beispielhaft anhand einer dynamischen Simulationsrechnung gezeigt. Hierbei tritt ein Sprung der Wirkleistungsentnahme von 10 Prozent in Last 1 auf. Der Sollwert des Wirkleistungsflusses über  $ASC_1$  und damit über  $L_2$  ist so eingestellt, daß er dem stationären Leistungsfluß über diese Leitung entspricht, der vor der Erhöhung von Last 1 vorherrscht. Das Kraftwerk  $G_2$  beteilige sich nicht an der Regelung, sondern nur die Kraftwerke  $G_1$  und  $G_3$ , so daß der auf die Regelung von  $ASC_1$  geschaltete Sollwert in Abhängigkeit der von  $G_3$  erzeugten Primär-Regelleistung verändert werden muß, um eine mögliche Überlastung von Leitung  $L_3$  zu verhindern. Die graphischen Ausgaben der Simulation sind in den Bildern 4.2.7 und 4.2.8 dargestellt.



**Bild 4.2.7:** Wirkleistungsfluß über  $ASC_1$



**Bild 4.2.8:** Wirkleistungsfluß über  $L_3$

Im Falle der koordinierten Regelung liegt der Leistungsfluß über  $L_3$  niedriger als im unkoordinierten Fall, da jetzt die Primärregelleistung des Kraftwerks  $G_3$  vorwiegend über die Leitung  $L_2$  und  $ASC_1$  fließt. Ohne eine koordinierte Regelung muß Leitung  $L_3$  allein die Primärregelleistung beider an der Regelung beteiligten Kraftwerke zur Last transportieren.

Zusammenfassend zeigt dieses Simulationsbeispiel, daß durch die Anwendung einer koordinierten Regelung in der Leistungsflußsteuerung in EÜS mit FACTS-Geräten als Komponente eines autonomen Regelungssystems möglichen Leitungsüberlastungen im Falle von Lastschwankungen entgegengewirkt werden kann.

Ch. Becker

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

#### **4.2.3 Systemische Integration eines multifunktionalen SMES in die Netzregelung**

Die systemische Vorgehensweise bei der Integration eines supraleitenden magnetischen Energiespeichers (SMES) bedeutet die Berücksichtigung aller Systemkomponenten, die durch den Speichereinsatz betroffen sind sowie insbesondere deren Koordination untereinander und mit dem Speicher. Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt in der Auffindung einer geschlossenen Gesamtlösung. Im Gegensatz dazu liefert die konventionelle Entwicklung zunächst Einzellösungen, deren Zusammenwirken eine nicht genügende Gesamtlösung ergeben kann.

Zur Erzielung der Wirtschaftlichkeit eines SMES ist ein breites Aufgabenfeld zu berücksichtigen. Die grundlegende Motivation dieser Arbeit ergibt sich aus der Tatsache, daß bei spannungsinstabilen Systemzuständen nur durch eine schnelle Bereitstellung von Wirkleistung Lastabwürfe bzw. ein Systemzusammenbruch vermieden werden können. Die besondere Eignung eines SMES zur schnell regelbaren Bereitstellung von Wirk- und Blindleistung bietet hier einen Ansatz. Dieses spezielle Einsatzziel ist mit bereits in einer vorhergehenden Arbeit untersuchten Aufgaben zu dem folgenden Aufgabenkomplex zusammenzufassen:

- Verbesserung der Spannungstabilität,
- Bereitstellung von Wirkleistungssekundenreserve,
- Verbesserung der transienten Stabilität bzw. Pendeldämpfung,
- Verbesserung der Spannungsregelung und -qualität.

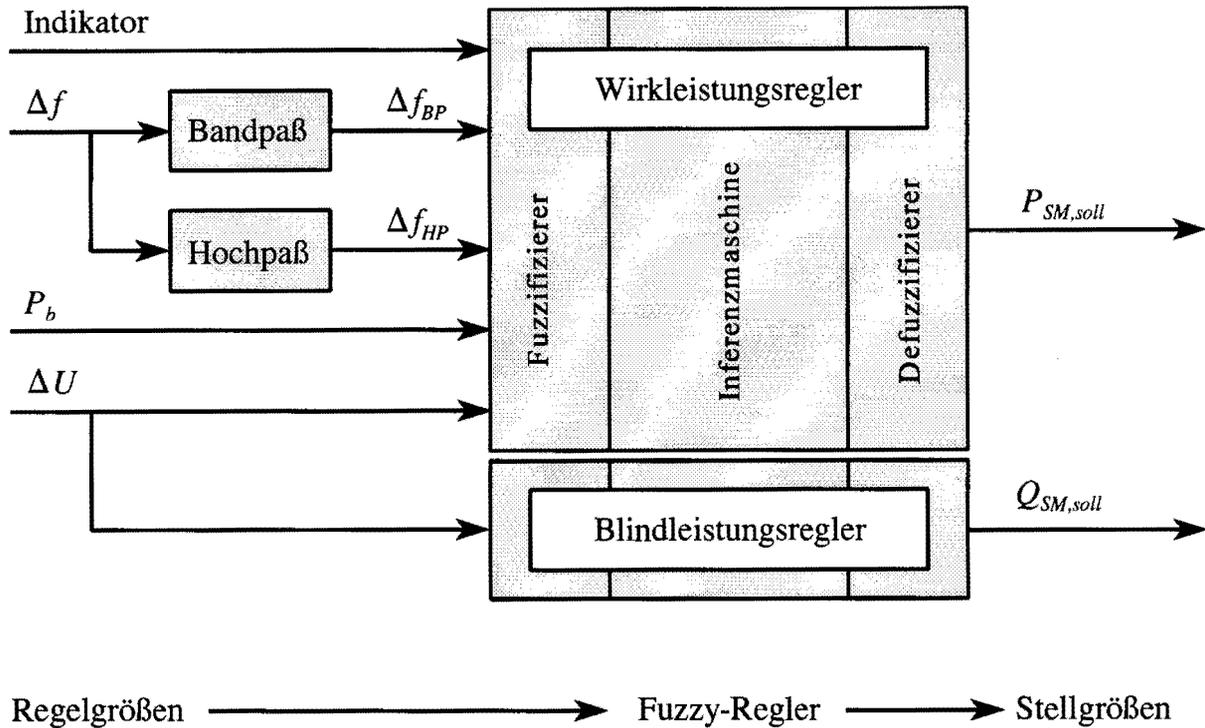
Zur Entwicklung einer Gesamtlösung zur Erfüllung dieses Aufgabenfeldes sind neben dem eigentlichen SMES Änderungen in der Betriebsführung und der Kraftwerksführung vorzunehmen. Im Bereich der Spannungsstabilität wird neben der wirtschaftlichen Lastaufteilung ein spannungsstabiler Arbeitspunkt für das Kraftwerkseinspeisemuster benötigt, welcher in Abhängigkeit der Spannungsstabilität angefahren werden kann. Die Überfunktionsphase zwischen den unterschiedlichen Einspeisemustern wird durch den Speichereinsatz abgesichert. Zur Identifikation spannungsinstabiler Zustände sind Indikatoren entwickelt worden, die den Anforderungen einer zuverlässigen und schnellen Visualisierung und Bestimmung der Spannungsstabilität genügen. Hierzu wurden künstliche neuronale Netze nach Kohonen verwendet, die in einem folgenden Abschnitt getrennt erläutert werden.

Die einzelnen Aufgaben müssen koordiniert geregelt werden. Innerhalb dieses Konzeptes zur Spannungsstabilitätsverbesserung hat der Wirkleistungseinsatz abgestimmt mit der Frequenzregelung zu erfolgen, um das Leistungsgleichgewicht im System aufrechtzuerhalten. Die Bereitstellung von Wirkleistungssekundenreserve muß mit den dafür vorgesehenen Kraftwerken mittels einer Regelleistungsaufteilung koordiniert werden. Die Abgrenzung zeitlich unterschiedlicher Aufgaben wie zum Beispiel der Pendeldämpfung hat ebenfalls zu erfolgen. Der Blindleistungseinsatz des SMES kann bei den unterschiedlichen Aufgaben zu einer gemeinsamen Spannungsregelung zusammengefaßt werden. Somit ist die Multifunktionalität des SMES durch den Reglerentwurf zu berücksichtigen.

Eine ereignisorientierte Koordination der SMES-Aufgaben wird innerhalb eines Fuzzy-Reglers gemäß Bild 4.2.9 durch die Auswahl und Aufarbeitung der Eingangsdaten und das Regelwerk erzielt. Hierbei werden die folgenden Aspekte berücksichtigt:

- Einbeziehung des gesamten, erforderlichen Aufgabenfeldes für den jeweiligen Einsatzort,
- Koordination der Teilaufgaben bei gleichzeitiger Nutzung des gesamten Aufgabenfeldes,
- ereignisorientierte Gewichtung der Aufgaben.

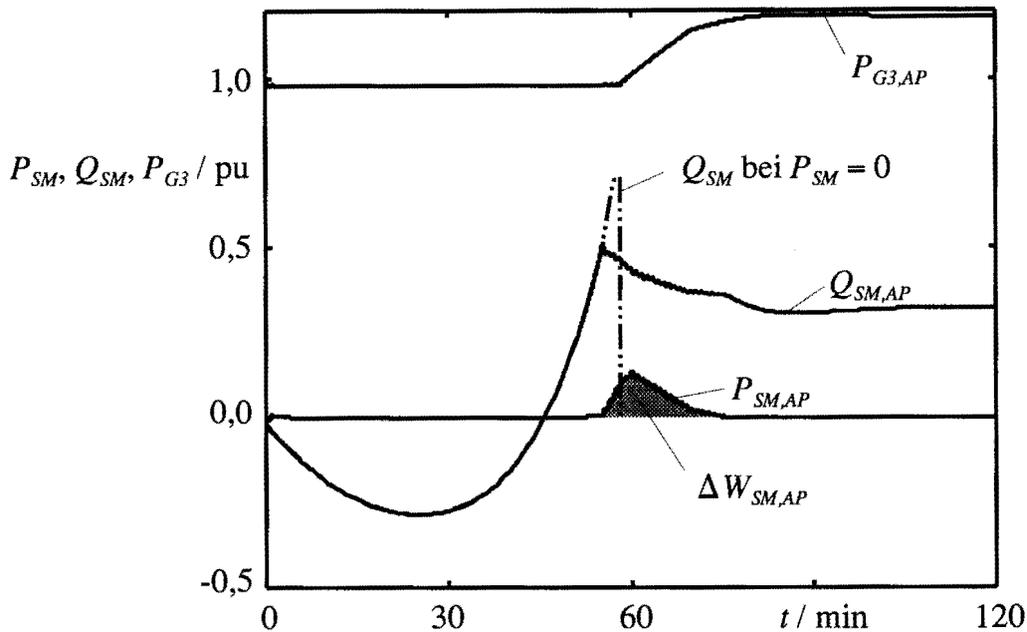
Die Zeitbereiche für die unterschiedlichen Aufgaben werden durch Filterung der Regelgrößen abgegrenzt. Hierdurch ist eine koordinierte Behandlung der Pendeldämpfung und der Bereitstellung von Wirkleistungssekundenreserve trotz verschiedener Zeitbereiche innerhalb eines Reglers geschlossen möglich. Die Verbesserung der Spannungsstabilität wird hauptsächlich durch den Indikatorwert geregelt, wobei eine Koordination mit der Frequenz zu erfolgen hat, so daß das Leistungsgleichgewicht innerhalb des Systems gewahrt bleibt.



**Bild 4.2.9:** Ereignisorientierter SMES-Regler für Spannungsstabilität, Wirkleistungssekundenreserve, Pendeldämpfung und Spannungsregelung

Die Funktionsweise der Regelung für die unterschiedlichen Aufgaben wurde innerhalb einer am Lehrstuhl entwickelten objektorientierten dynamischen Simulationsumgebung unter MATLAB/SIMULINK validiert. Innerhalb dieser Umgebung existiert eine Komponentenbibliothek für konventionelle und innovative Betriebsmittel sowie für Verfahren, die für die Untersuchung insbesondere der Spannungsstabilität benötigt werden.

Die Reglervalidierung erfolgt für den SMES-Einsatz innerhalb eines realen, spannungskritischen Übertragungssystems. Bei einer ausgeprägten Abendspitze, die bei geringfügiger Überhöhung zu Spannungsinstabilitäten führt, wird der Lastanstieg bei konstantem Leistungswinkel  $\cos \varphi$  als eine lineare einstündige Lastrampe mit nachfolgender linearer Beibehaltung des Maximalwertes nachgebildet. Bild 4.2.10 zeigt die zugehörigen Verläufe der SMES-Leistung und einer ausgewählten Kraftwerksleistung für die beiden Fälle ohne und mit geregelter Speicherwirkleistung.



**Bild 4.2.10:** SMES-Blindleistung und SMES-Wirk-/ Blindleistung mit zusätzlicher Einspeisearbeitspunktverschiebung bei kritischer Lasterhöhung

Ist zunächst nur die Blindleistungsregelung des SMES aktiv, so gleicht diese unregelte Kompensationseinrichtungen aus und wirkt somit spannungsregelnd. Bei weiter steigender Lastrampe wird jedoch überproportional viel Blindleistung benötigt, um die Spannung zu halten und somit das System zu stabilisieren. Es erfolgt ein Kollaps kurz vor Erreichen des Lastmaximums. Wird derselbe Vorgang bei aktiver Wirk- und Blindleistungsregelung durchgeführt, so stellt der Speicher nach Unterschreiten eines kritischen Indikatorwertes lokal und lastnah Wirkleistung  $P_{SM,AP}$  zur Verfügung und entlastet somit kritische Übertragungswege. Nach einer Totzeit im Minutenbereich beginnt die Verschiebung des Einspeisemusters der Kraftwerke. Diese Verschiebung erfolgt hier durch die Erhöhung der Einspeisung eines lastnahen Kraftwerks  $P_{G3,AP}$ . Der Speicher fährt seinen Wirkleistungseinsatz zurück und die Spannungsstabilität des Systems ist gewährleistet. Die Blindleistung  $Q_{SM,AP}$  steht weiterhin zur Spannungsregelung bereit.

Anhand dieses Simulationsbeispiels ist somit die Speicherregelung in Hinblick auf die Spannungsstabilität validiert worden. Zusammenfassend ist für die Verbesserung der Spannungsstabilität folgendes festzuhalten:

- Wird aus der Optimierung ein spannungsstabiler Arbeitspunkt erhalten, der von dem wirtschaftlichen abweicht, so ist in kritischen Fällen eine Systemabsicherung durch eine

Verschiebung des Kraftwerkseinspeisemusters möglich, wenn der SMES durch schnellen Wirkleistungseinsatz die Überföhrungsphase absichert.

- Als auslösende Ereignisse sind neben unerwartet hohen Lastanforderungen die Verringerung der Übertragungskapazität eines kritischen Gebietes durch Leitungs- oder Betriebsmittelausfälle zu nennen. Durch die besonders kurze Reaktionszeit ist ein SMES in der Lage, beide Fälle analog zu stabilisieren, wodurch sich eine hohe Einsatzflexibilität ergibt.
- Zur Vermeidung von stabilisierenden Lastabschaltungen bietet sich alternativ ein erweiterter, kostenintensiver Leitungsausbau zur Entlastung sämtlicher kritischer Gebiete für selten auftretende Ereignisse an. Im Gegensatz hierzu bietet der SMES eine wesentlich höhere Flexibilität und damit Wirtschaftlichkeit, auf unterschiedliche Ereignisse zu reagieren und gleichzeitig weitere Aufgaben wahrzunehmen.

Ch. Rehtanz

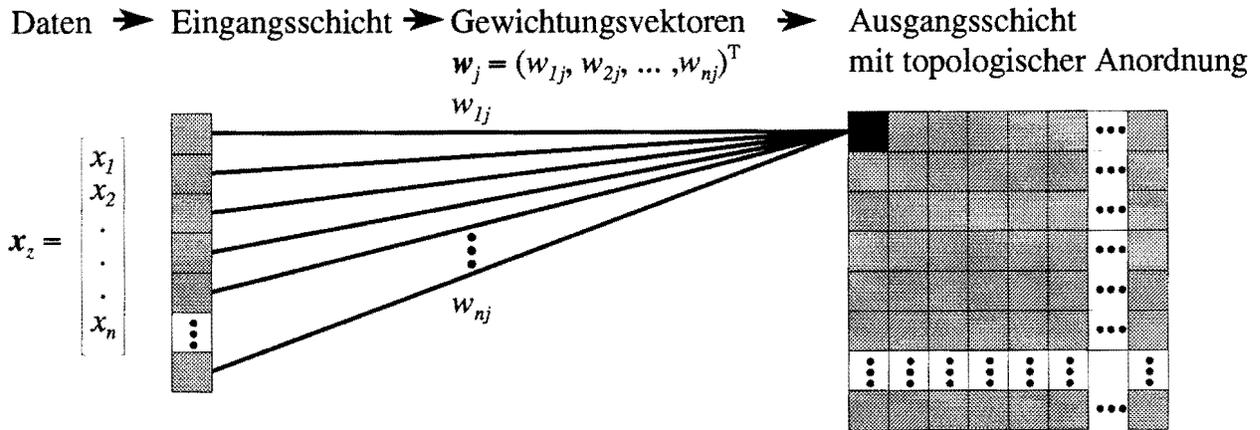
EV 9716

Dieses Forschungsvorhaben wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert.

#### **4.2.4 Spannungsstabilitätsindikatoren mittels künstlicher neuronaler Netze nach Kohonen**

Die Bestimmung der Spannungsstabilität zur Netzüberwachung und Regelung von Maßnahmen zur Stabilitätsverbesserung muß sowohl schnell, als auch zuverlässig erfolgen. Die bisherigen in der Literatur vorgestellten Indikatoren sind entweder sehr rechenaufwendig oder nichtlinear und unstetig bei kontinuierlichen Zustandsveränderungen. Eine Lösung dieses Problems bietet die Verwendung von künstlichen neuronalen Netzen nach Kohonen gemäß Bild 4.2.11.

Hierbei erfolgt eine nichtlineare Abbildung des hochdimensionalen Eingangsdatenraumes der systembeschreibenden Größen auf einen zweidimensionalen Ausgangsdatenraum, der die Spannungsstabilität repräsentiert. Der Ausgangsdatenraum wird als Kohonen-Karte bezeichnet und dient über die Bestimmung der Spannungsstabilität hinaus auch deren Visualisierung.

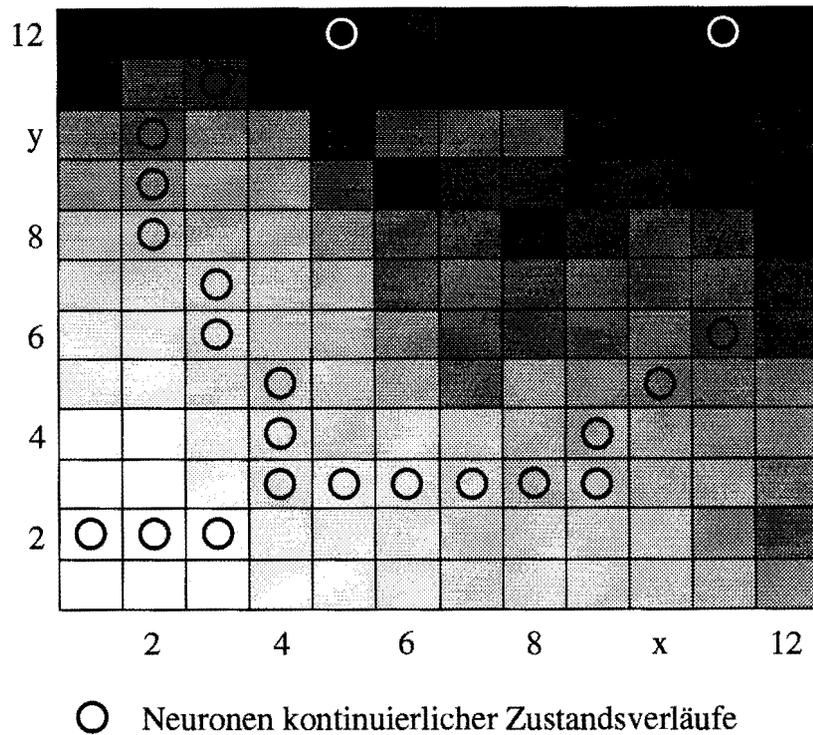


**Bild 4.2.11:** Struktur eines künstlichen neuronalen Netzes nach Kohonen

Die Informationen über die Abbildung werden in einem Trainingsprozeß in den Gewichtungsvektoren gespeichert. Die Trainingsdaten müssen alle möglichen Systemzustände umfassen, wobei sowohl Topologieänderungen, als auch z.B. Kraftwerksausfälle berücksichtigt werden müssen. Bei diesem Lernprozeß werden die Eingangsvektoren zu Gruppen zusammengefaßt und einzelnen Neuronen der Ausgangsschicht zugeordnet. Diesen Gruppen können in einem weiteren Schritt getrennt berechnete Informationen über deren Spannungsstabilität zugeordnet werden. Die Eingangsdaten müssen die für die Spannungsstabilität relevanten Informationen enthalten. Aufgrund der mathematischen Abgrenzung der Spannungsstabilität auf den Bereich der Lastflußgrößen, sind diese als Eingangsgrößen ausreichend.

Ein Beispiel einer Kohonen-Karte mit 12 mal 12 Neuronen ist in Bild 4.2.12 auf der Datenbasis eines realen, spannungskritischen Energieübertragungssystems dargestellt. Helle Gebiete bedeuten eine hohe und dunkle Gebiete eine niedrige Spannungsstabilität. Für Zustände der beiden schwarzen Neuronen erfolgt ein Spannungskollaps. Die gesamte Karte deckt alle möglichen Zustände des Systems ab.

Zur Überprüfung der Abbildungseigenschaft wird ausgehend von einem stabilen Netzzustand die Lastanforderung aller Knoten kontinuierlich bei festem Kraftwerkseinspeisemuster bis zum Spannungskollaps erhöht. Es ist ein kontinuierlicher Zustandsverlauf auf der Karte zu sehen. Für ein geändertes Kraftwerkseinspeisemuster ergibt sich ein anderer Verlauf, der in dem zweiten Kollapsneuron endet. Die unterschiedlichen Kollapsneuronen sind unterschiedlichen Netzgebieten zuzuordnen, in denen der Kollaps erfolgt.



**Bild 4.2.12:** Ausgangsneuronen einer Kohonen-Karte zur Visualisierung der Spannungsstabilität von Zustandsverläufen verschiedener Kraftwerkeinspeisemuster

Insgesamt wurde gezeigt, daß mit der Darstellung von Spannungsstabilitätsindikatoren mittels Kohonen-Karten der entscheidende Schritt getan wurde, einen aktuellen Systemzustand in die Menge aller möglichen Zustände im Sinne der Spannungsstabilität einzuordnen. Die Kartendarstellung bietet die visuelle Einordnung und dadurch eine übersichtliche Darstellung sowohl eines Systemzustandes als auch von Zustandsverläufen. Die Visualisierung der Spannungsstabilität mit einer Kohonen-Karte ist somit innerhalb von Betriebsführungssystemen praktisch einsetzbar. Neben der Visualisierung findet aufgrund weniger Rechenoperationen eine schnelle Bestimmung des Indikatorwertes z. B. für automatische Überwachungszwecke statt. Über die Bestimmung der Spannungsstabilität hinaus sind anhand der in den Gewichtungsvektoren der Kohonen-Karte gespeicherten Informationen die Beeinflussungsfaktoren der Spannungsstabilität zu bestimmen und somit Systemanalysen durchzuführen.

Ch. Rehtanz

EV 9716

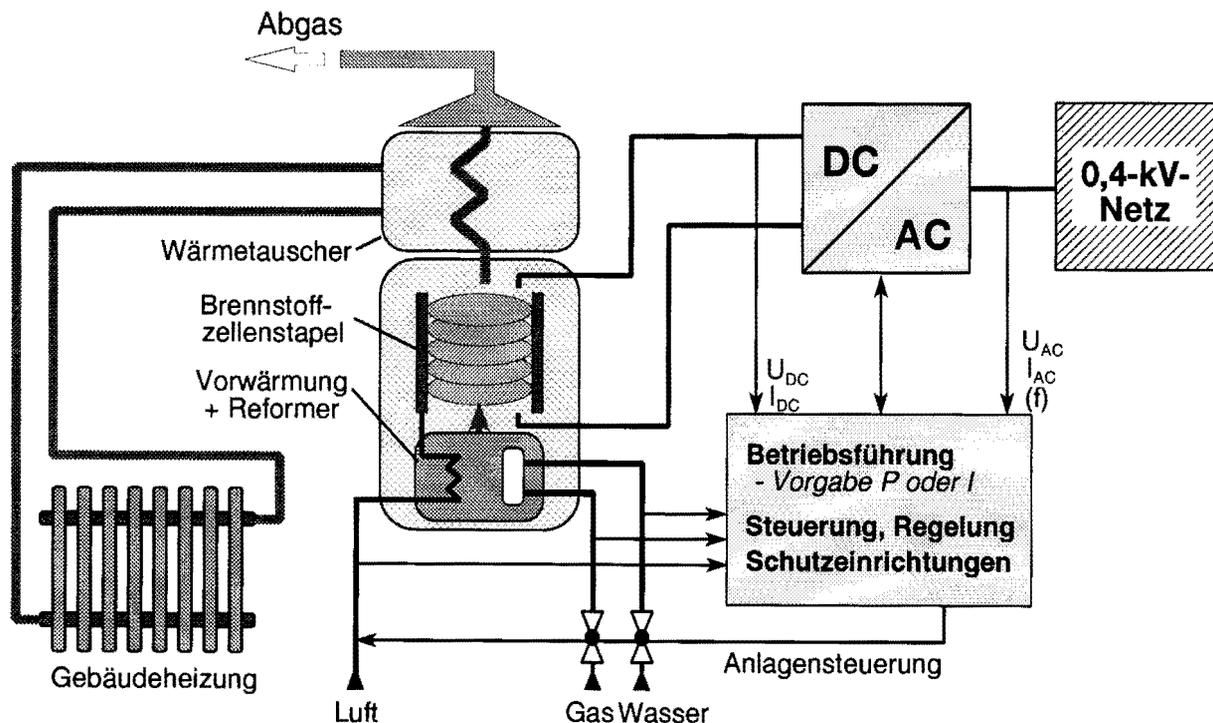
Dieses Forschungsvorhaben wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert.

### 4.3 Schutz- und Leittechnik

#### 4.3.1 Netzanbindung von SOFC-Brennstoffzellenanlagen im Niederspannungsnetz

Das Langzeitverhalten von oxidkeramischen Brennstoffzellen bei wechselnden Gasqualitäten wird derzeit von der Dortmunder Energie- und Wasserversorgung (DEW), der schweizer Firma SulzerHEXIS AG und dem Lehrstuhl für elektrische Energieversorgung untersucht. Im Gaslabor der DEW ist ein SOFC-Brennstoffzellenversuchsstand der Firma SulzerHEXIS AG installiert und ferngeführt mit einem Langzeitmeßdatenerfassungs- und Prozeßvisualisierungssystem (siehe Jahresbericht 1996) gekoppelt. Im Rahmen dieses Projektes werden zur Zeit die Randbedingungen für die Einbindung von SOFC-Brennstoffzellensystemen (SOFC-BZ) in das öffentliche Niederspannungsnetz untersucht.

SOFC-Brennstoffzellensysteme sind aufgrund ihrer hohen Betriebstemperatur für die Kraft-Wärme-Kopplung prädestiniert. Die vorhandene Verteilungsinfrastruktur für Erdgas und die fortschreitende Entwicklung kleiner SOFC-Einheiten im Leistungsbereich einiger Kilowatt ermöglichen die Erschließung eines Marktes für die Gebäudeversorgung (Bild 4.3.1).



**Bild 4.3.1:** Systemkonzept einer SOFC-BZ-Anlage für die Gebäudeversorgung

Zur Einspeisung des von Brennstoffzellenanlagen erzeugten Gleichstromes in das öffentliche Niederspannungsnetz sind Wechselrichter erforderlich. Hierzu wurde eine Marktanalyse durchgeführt. Die heute verfügbaren Wechselrichter im Leistungsbereich von 0,5 bis 5 kW

sind für den Einsatz in Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen) entwickelt worden. Für den Einsatz in SOFC-BZ sind diese Wechselrichter wegen ihrer hohen DC-Eingangsspannung nur bedingt geeignet. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, daß einphasige selbstgeführte Puls-Wechselrichter die zur Zeit technisch und wirtschaftlich sinnvollste Variante sind, um eine SOFC-BZ mit Nennleistungen  $< 4,5$  kVA an das Niederspannungsnetz anzuschließen.

Ein weiterer Schwerpunkt der zur Zeit durchgeführten Untersuchungen sind die Anforderungen an den Wechselrichter in Bezug auf die erforderlichen Regel- und Schutz-einrichtungen für Brennstoffzellensysteme. Gegenüber dem Einsatz bei PV-Anlagen ergeben sich zusätzliche Randbedingungen hinsichtlich der möglichen Variation der Stromentnahme und bei einer plötzlichen unerwarteten Unterbrechung der Stromentnahme - beispielsweise bei einem Fehler im Netz.

Für einen Netzparallelbetrieb wurden die entsprechenden Normen und Richtlinien hinsichtlich der von Wechselrichtern ausgehenden Netzzrückwirkungen untersucht. Es stellte sich heraus, daß diese für den Fall einer deutlichen Zunahme der Anzahl kleiner Eigenerzeugungsanlagen mit Wechselrichtern keine hinreichende Aussagekraft bieten. Auch der derzeitige Stand der Wechselrichtertechnik bleibt in den Richtlinien unberücksichtigt. Dieses verdeutlicht die Tatsache, daß nur Grenzwerte für Oberschwingungsströme bis 2 kHz angegeben werden, obgleich die Erzeugung höherfrequenter Ströme durch moderne Puls-Wechselrichter nicht ausgeschlossen werden kann.

Neben den Netzzrückwirkungen sind die in den technischen Anschlußbedingungen vorgegebenen Sicherheitsanforderungen, insbesondere gegen eine unkontrollierte Inselbildung, zu erfüllen. Die heute von den Herstellern angebotene ENS (Einrichtung zur Netzimpedanzüberwachung mit jeweils zugeordnetem Schaltorgan in Reihe) arbeitet nach dem Prinzip der Impedanzmessung bei der Zuschaltung einer Kapazität. Ob die geforderte Sicherheitsabschaltung bei einer großen Anzahl von SOFC-BZ in einem Netzbezirk sicher funktioniert, kann nach derzeitigem Kenntnisstand nicht beurteilt werden.

Steigt die Zahl der SOFC-BZ und damit die eingespeiste Leistung in das Niederspannungsnetz, sind Auswirkungen auf das Mittelspannungsnetz zu erwarten. Hierzu wurden Lastfluß-rechnungen für ein typisches Niederspannungsnetz durchgeführt. Eine Vermeidung der Rückspeisung in das überlagerte Mittelspannungsnetz kann durch eine Dimensionierung auf den minimalen Leistungsbedarf des Gebäudes oder durch den elektrischen Teillastbetrieb der SOFC-BZ zum Beispiel durch Reduzierung des Brenngasmassenstromes erreicht werden. Hierzu sind jedoch weitere Untersuchungen des Brennstoffzellenstapels hinsichtlich des Langzeitverhaltens erforderlich.

W. Horenkamp

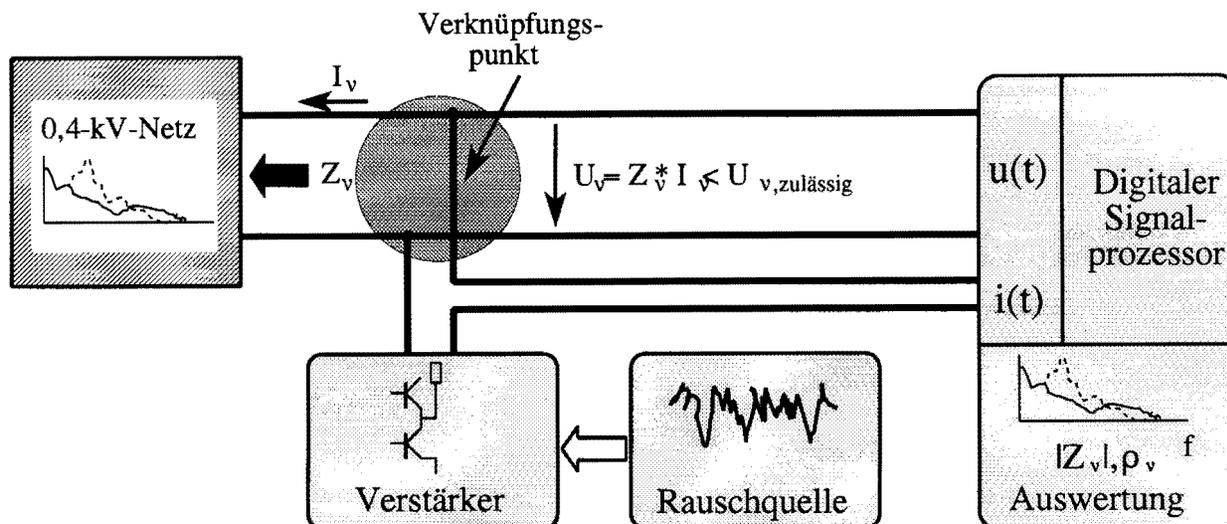
EV 9747

Das Forschungsvorhaben wird durch das Ministerium für Wirtschaft, Mittelstand, Technologie und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen gefördert

#### **4.3.2 Meßsystem zur Beurteilung der Auswirkungen nichtlinearer Verbraucher und Eigenerzeugungsanlagen im Niederspannungsnetz**

Zur Beurteilung der an einem Anschlußpunkt vorhandenen Netzzrückwirkungen elektrischer Verbraucher stehen entsprechende Meßeinrichtungen (z.B.: das am LS-EV entwickelte Netzzrückwirkungsmeßsystem NRM) zur Verfügung. Diese Meßeinrichtungen erfassen in der Regel die in den entsprechenden Richtlinien angegebenen Grenzwerte für Oberschwingungsströme bis zur 50. Ordnung (2,5 kHz). Um eine zuverlässige Aussage über die Beeinflussung elektrischer Anlagen im Hinblick auf die zu erwartenden Netzzrückwirkungen bei einem Neuanschluß von elektrischen Anlagen zu bekommen, ist zusätzlich die detaillierte Kenntnis der Netzimpedanz an dem Anschlußpunkt erforderlich.

Für eine überschlägige Betrachtung der zu erwartenden Netzzrückwirkungen bei dem Anschluß von nichtlinearen Verbrauchern oder Eigenerzeugungsanlagen (EEA) mit Wechselrichtern an das Niederspannungsnetz ist die Ermittlung der Kurzschlußleistung  $S_k$  für die 50-Hz-Grundschwingungskomponente am Verknüpfungspunkt nicht mehr ausreichend. Eine weitergehende Möglichkeit ist die Messung der Innenimpedanz des Netzes nach DIN VDE 0413 Teil 3. Aufgrund der ungenügenden Auflösung in den einzelnen Harmonischen ist dieses Verfahren für die Erfassung der Netzimpedanz nur bedingt geeignet. Die heute üblichen Verfahren erzeugen Transienten durch Schalthandlungen oder speisen aufgezeichnete Transienten in das Netz ein. Mit Hilfe der Leistungsdichten der Spannungsantwort des Netzes und des eingespeisten transienten Stromes ist die Berechnung der Übertragungsfunktion und damit die Bestimmung der Netzimpedanz möglich. Eine weitere Möglichkeit ist die Einspeisung von weißem Rauschen in das Netz. Dieses Verfahren ist aus der Nachrichtentechnik übernommen worden (Bild 4.3.2). Durch die kontinuierliche Anregung des Netzes wird der sonst notwendige Einsatz von teuren Meßdatenerfassungssystemen (z.B. Transientenrekorder) und Schalteinrichtungen (z.B. Kondensatorbatterien) umgangen. Moderne Leistungshalbleitertechnologien ersetzen die konventionellen Schaltvorrichtungen zur Transientenerzeugung und ermöglichen eine flexiblere Durchführung von Impedanzmessungen vor Ort.



**Bild 4.3.2:** Struktur der Impedanzmeßeinrichtung

Auf Basis dieses Verfahrens wird zur Zeit ein breitbandiges Impedanzmeßsystem entwickelt. Die obere Grenzfrequenz liegt bei 20 kHz, begründet durch moderne Pulswechselrichter mit Taktfrequenzen über 2 kHz, welche Oberschwingungsströme im Bereich der Wechselrichter-Taktfrequenz erzeugen können. Der Anteil dieser Anlagen wird in den nächsten Jahren durch die Weiterentwicklung der Leistungshalbleiter wie IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) zunehmen. Dieser Frequenzbereich muß daher verstärkt mit betrachtet werden. Die untere Grenzfrequenz von 10 Hz bietet die Möglichkeit der Beurteilung von Flickerausbreitungen.

Probleme bei der Realisierung treten hier vor allem bei der Einspeisung des Testsignals in das Niederspannungsnetz auf. Die Verstärkerverluste, die geforderte Bandbreite und die erforderlichen Schutzmaßnahmen verlangen einen erheblichen schaltungstechnischen Aufwand.

Zur Zeit wird in weiteren Arbeiten das Meßsystem optimiert und ein Leistungsverstärker zur Einspeisung der Testsignale sowie die entsprechenden Algorithmen zur Impedanzbestimmung auf Basis eines digitalen Signalprozessors entwickelt.

W. Horenkamp, Th. Wiesner

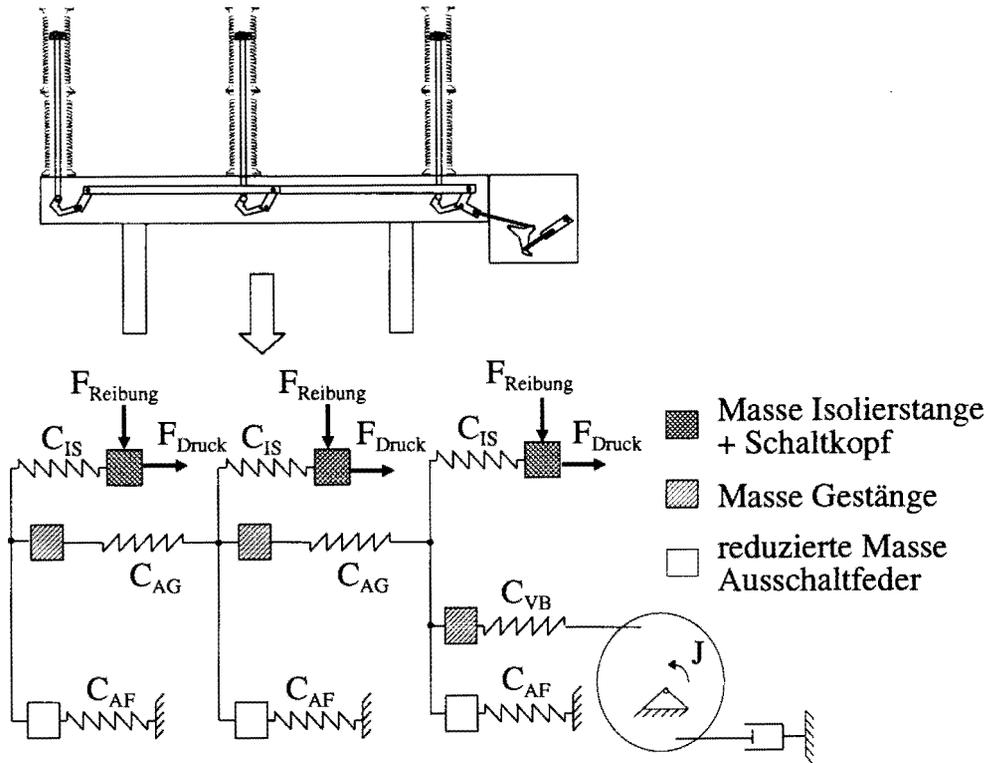
EV 9729

### 4.3.3 Modellierung der Schaltbewegung von Leistungsschaltern

In elektrischen Energieübertragungssystemen (EÜS) stellt der Leistungsschalter ein wichtiges Betriebsmittel für den zuverlässigen Betrieb der Transportnetze dar. Die Erfassung und die Auswertung seiner Zustandsdaten lassen Rückschlüsse auf den Zustand des Betriebsmittels zu und bilden hierbei eine wesentliche Voraussetzung für eine zustandsorientierte Instandhaltungsplanung in EÜS. Zur Ermittlung des mechanischen Zustandes des Leistungsschalters werden von den Herstellern zunehmend Diagnosesysteme entwickelt und angeboten, die eine meßtechnische Erfassung charakteristischer Parameter erlauben. Eine wesentliche Messung stellt in diesem Zusammenhang die Aufzeichnung der Weg-Zeit-Kurve der Schaltbewegung eines Leistungsschalters dar.

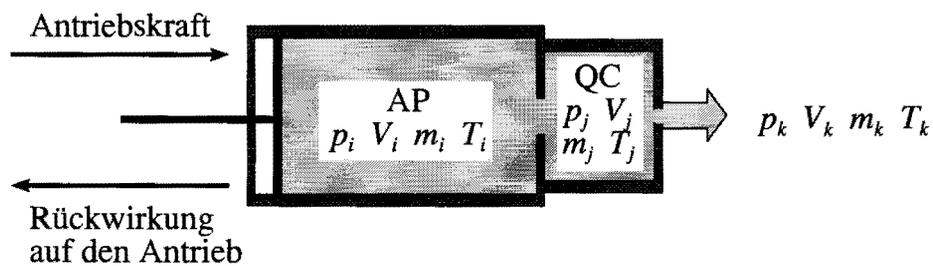
Zur Ermittlung der Beziehungen zwischen charakteristischen, meßbaren Parametern der Weg-Zeit-Kurve und den physikalischen Einflußgrößen ist eine genaue Kenntnis der mechanischen, thermodynamischen und strömungsmechanischen Zusammenhänge des Leistungsschalters Voraussetzung. Wesentliche Bestandteile, die den mechanischen Bewegungsablauf beim Ausschaltvorgang bestimmen, sind die Federcharakteristik der Ausschaltfedern, der Druckaufbau in den Hilfskompressionskammern zur Löschung des Lichtbogens und die Dämpfercharakteristik. Gekoppelt sind die einzelnen Bauteile durch Verbindungsgestänge und Hebel, die aufgrund der großen Kräfte, der zu bewegenden Massen und der räumlichen Ausdehnung des Leistungsschalters nicht unerhebliche Schwingungen ausführen, die die Bewegungskarakteristik nachweislich beeinflussen. Eine voneinander unabhängige Berechnung des Druckaufbaus in den jeweiligen Polsäulen und der Dämpferkraft ermöglicht eine Aufteilung des Leistungsschaltermodells in drei Teilmodelle, wobei das Schwingungsmodell der Gestänge die Verknüpfung der Teilmodelle darstellt. In Bild 4.3.3 ist die Kopplung des Dämpfers und des Haupthebels mit dem Antriebsgestänge, das wiederum über Hebel mit den drei Isolierstangen in den Polsäulen verbunden ist, dargestellt.

Die Löschung des Lichtbogens erfolgt bei Leistungsschaltern mit autopneumatischem Löschesystem durch den Druckaufbau des Lichtbogens selber. Bei stromschwachen Lichtbögen ist der durch die Kompression im Hilfspuffer generierte Druck größer als der durch den Lichtbogen induzierte. In diesem Fall strömt das komprimierte Gas von der Hilfskompressionskammer durch die Druckkammer direkt in die Trennstrecke und löscht somit den Lichtbogen nach einem Stromnulldurchgang. Die zum Druckaufbau nötige Energie muß vom Antriebssystem aufgebracht werden.



**Bild 4.3.3:** Überführung der Getriebeelemente in ein Feder-Masse-System

Zur Beschreibung der thermodynamischen und strömungsmechanischen Vorgänge werden vier Differentialgleichungen für Druck  $p$ , Temperatur  $T$ , abgegebene Wärme  $Q$  und den Gas-Massenstrom  $m$  für jedes Teilsystem berechnet (Bild 4.3.4).



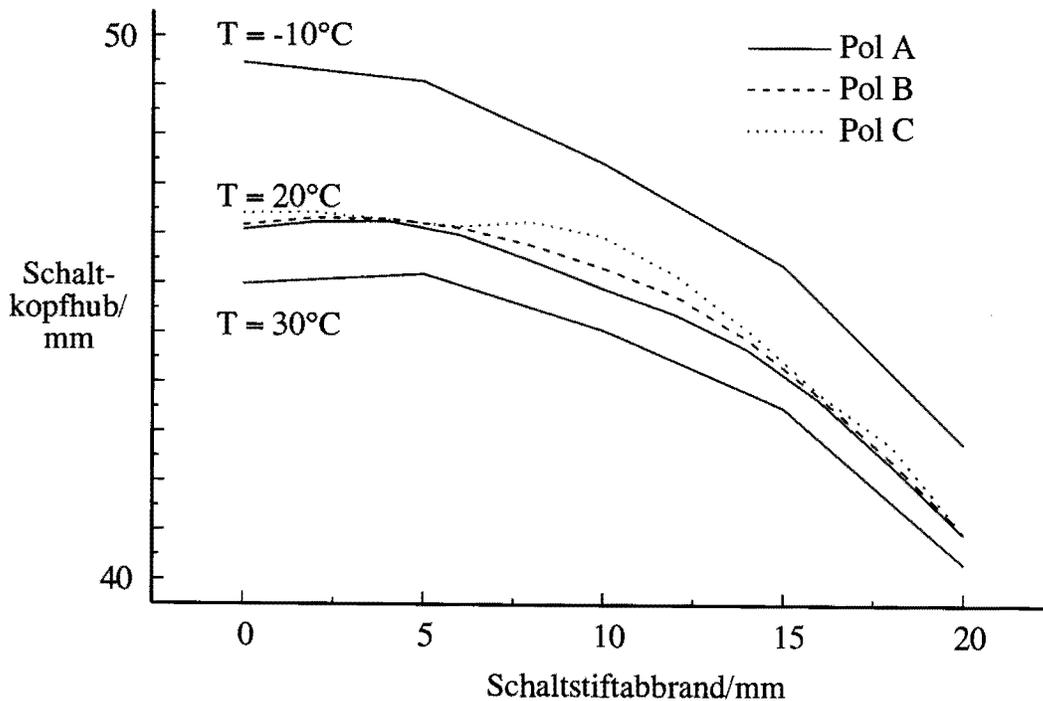
**Bild 4.3.4:** Strömungsmechanischer Modellansatz

Zur Verifizierung des Modells dienen beim Hersteller gemessene Weg-Zeit-Kurven des Ausschaltvorganges, Druckkurven der Kompressionskammern und Kraftmessungen der Gestänge. Das Modell berechnet neben Weg- und Geschwindigkeitsverläufen in den

jeweiligen Polsäulen alle inneren Größen, die für eine Analyse des Leistungsschalters relevant sind. Hinzu kommen Kenngrößen des Leistungsschalters.

Eine charakteristische Kenngröße ist der Hub, den der Schaltkopf in einer bestimmten Zeit nach Kontakttrennung vollzieht. Diese Größe darf einen kritischen Wert nicht unterschreiten, um die Löschung des Lichtbogens nach Kontakttrennung zu gewährleisten. Mit dem Modell ist es möglich, Einflußgrößen auf den Schaltkopfhub zu bestimmen. Als mögliche Einflußgrößen für eine Simulation dienen u.a. folgende Größen: Abbrand des Schaltstiftes, Ausbrand der Isolierstoffdüse, Außentemperatur, Polsäulendruck (Veränderung im Laufe der Zeit durch Leckage), Ansprechdruck der Überdruckventile in den Druckkammern und Ölverlust im Dämpfer. In Bild 4.3.5 ist beispielhaft ein Abbrand des Schaltstiftes von 0 bis 20 mm und die daraus resultierende Veränderung des Schaltkopfhubes bei verschiedenen Außentemperaturen dargestellt.

Mit dem Modell können Korrelationen zwischen charakteristischen, meßbaren Parametern der Weg-Zeit-Kurve und den physikalischen Einflußgrößen ermittelt werden. Es ist zu untersuchen, inwieweit diese Ergebnisse für die Ermittlung vereinfachter Modelle genutzt werden können, um in Zukunft eine integrierte Auswertung der Weg-Zeit-Kurve direkt am Leistungsschalter realisieren zu können.



**Bild 4.3.5:** Hub des Schaltkopfes nach Kontakttrennung in Abhängigkeit der Temperatur bei Variation des Schaltstiftabbrands

EV 9750

Dieses Forschungsvorhaben wird in Kooperation mit der AEG Energietechnik GmbH Dortmund durchgeführt.

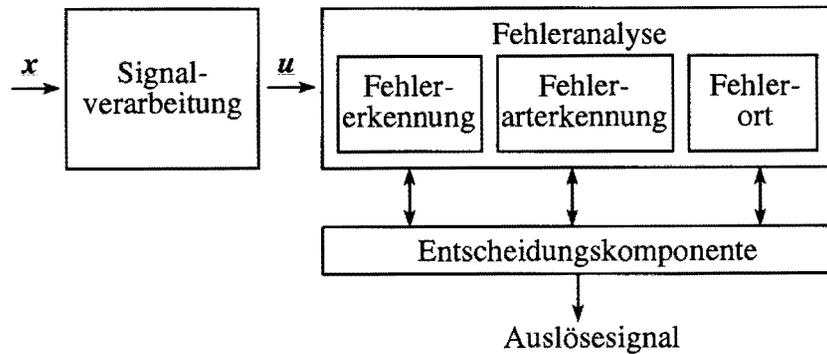
#### **4.3.4 Neuronale Netze in der Schutztechnik**

Von Schutzgeräten wird eine Höchstmaß an Entscheidungssicherheit bei möglichst kurzer Auslösezeit gefordert. Die Berechnung von abgeleiteten Größen zur Bildung eines Schutzkriteriums aus den gemessenen Signalwerten wird durch zahlreiche Effekte erschwert, die u.a. durch Wandler sättigung, magnetische und induktive Kopplungen, Fehlerwiderstände am Fehlerort, Übertragungsfehler etc. hervorgerufen werden. Die Anwendung von Signalverarbeitungsalgorithmen zur Berechnung der Kenngrößen in digitalen Schutzgeräten ermöglicht prinzipiell die Kompensation dieser Störeffekte. Eine möglichst umfassende Berücksichtigung von Störeffekten führt durch eine damit verbundene Zunahme der Komplexität der Signalverarbeitungsalgorithmen zu längeren Auswertungszeiten, die dem Wunsch nach möglichst kurzer Auslösezeit entgegenstehen. Neue Verfahren, die sich durch hohe Verarbeitungsgeschwindigkeiten auszeichnen, können in großem Umfang dazu beitragen, dieses Problem zu lösen. Zu diesen Verfahren gehören vor allem die im Bereich der Signalverarbeitung einsetzbaren künstlichen neuronalen Netze (KNN).

KNN sind besonders für Interpolations- und Klassifikationsaufgaben geeignet. Hohe Auswertungsgeschwindigkeiten und eine große Robustheit gegenüber verfälschten Eingangssignalen lassen sie für den Einsatzbereich der Signalverarbeitung in der Schutztechnik als sehr gut geeignet erscheinen und zeigen ein weitgefächertes Anwendungspotential in den Bereichen der

- Realisierung von Schutzgeräten mit sehr kurzen Reaktionszeiten,
- Verbesserung der Zuverlässigkeit von Auslöseentscheidungen,
- Kompensation von Meßfehlern (z.B. Wandler sättigung),
- schnellen Parameteranpassung an unterschiedliche Betriebssituationen.

Die Leistungsfähigkeit von Schutzgeräten wird maßgeblich durch die Komponenten zur Signalverarbeitung und zur Fehleranalyse bestimmt. Letztere sind durch Verfahren zur Erkennung des Fehlereintritts, zur Bestimmung der Fehlerart und des Fehlerortes gegeben. Die Auslöseentscheidung wird anhand von Informationen der Komponenten zur Fehleranalyse getroffen (vgl. Bild 4.3.6).



**Bild 4.3.6:** Komponenten eines Schutzgerätes

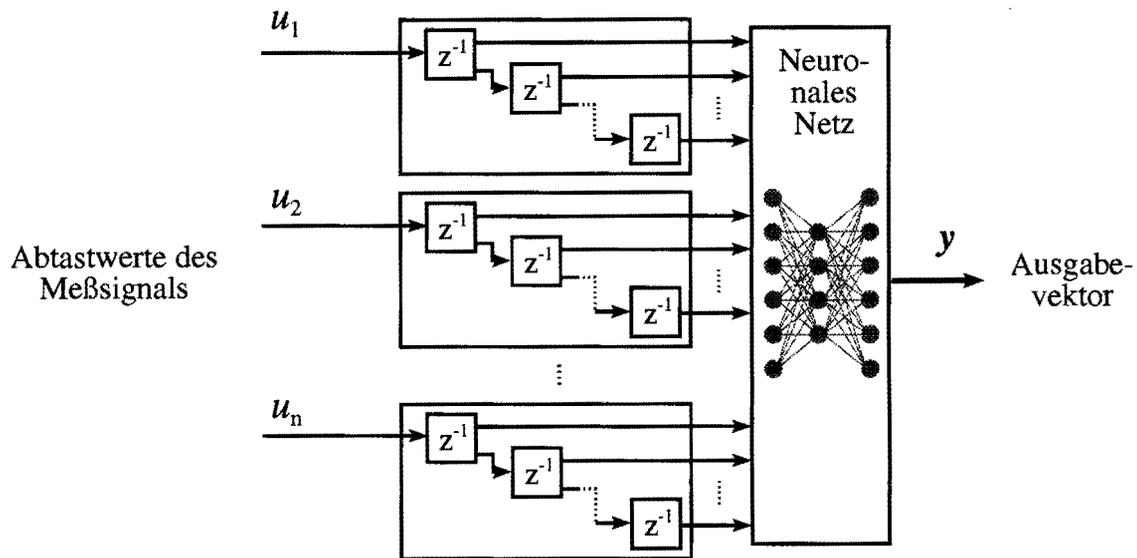
Der Einsatz von KNN in Schutzgeräten bezieht sich auf die Informationsverarbeitung innerhalb einzelner Komponenten des Schutzgerätes, in denen die Geschwindigkeits- und Robustheitsanforderungen durch konventionelle Verfahren nicht zufriedenstellend erfüllt werden können.

Die hier zugrunde liegende Analyse gegenwärtiger Ansätze zur komponentenweisen Realisierung der in Bild 4.3.6 dargestellten typischen Funktionsblöcke eines Schutzgerätes zeigt, daß durch die KNN vorwiegend die folgenden Bestimmungen vorgenommen werden:

- Amplituden der Grundschwingung von Strom- und Spannungsverläufen,
- fehlerbehaftete Phase (z.B. für Kurzunterbrechungseinrichtungen),
- Fehlerart,
- Entfernung zum Fehlerort in Distanzschutzeinrichtungen,
- Systemzustand des EÜS zur Anpassung von adaptiven Schutzeinrichtungen.

Grundlage für die Entwicklung dieser KNN ist zunächst die Bestimmung von relevanten Merkmalsvektoren aus den durch die Meßwertaufnehmer zur Verfügung gestellten Meßdaten. Diese Merkmalsvektoren bestehen in Abhängigkeit von der konkreten Anwendung zumeist aus einer unterschiedlichen Anzahl von Abtastwerten der Spannungs- und Stromverläufe der unterschiedlichen Phasen im Zeitbereich (Bild 4.3.7). Für einige Klassifikationsaufgaben ist die Transformation der Signale vom Zeitbereich in den Frequenzbereich von Interesse.

Das Erstellen geeigneter Trainingsdaten stellt die Grundlage für die funktionsorientierte Ausbildung des KNN durch Training dar. Nach Abschluß der Trainingsphase ist eine Evaluierung des Verhaltens des KNN erforderlich.



**Bild 4.3.7:** Integration eines KNN für Aufgaben in der Schutztechnik

Der praktische Einsatz der KNN ist dadurch erschwert, daß bislang keine allgemeingültigen Regeln zur Festlegung der Struktur der KNN und zur Auswahl der Trainingsdaten verfügbar sind. Der benötigte Umfang an Trainingsdaten kann nur aus der Simulation gewonnen werden. Eine praxisorientierte Auslegung der KNN bedingt die möglichst genaue Nachbildung der unterschiedlichen Betriebssituationen eines EÜS und die genaue Anordnung des Schutzgerätes innerhalb dieses Systems. Bei der Erstellung der Trainingsdaten müssen die verschiedenen Fehlertypen, der Betriebszustand des Gesamtsystems vor Fehlereintritt sowie die Nicht-linearitäten des Meßwertaufnehmers (z.B. Wandlersättigung) und das Meßrauschen in die Simulation einfließen. Allgemeine Empfehlungen für die Optimierung von KNN hinsichtlich ihrer Interpolations- und Generalisierungseigenschaften können aus dem Stand der Technik nicht abgeleitet werden.

Hinsichtlich der hohen Zuverlässigkeitsanforderungen an die Komponenten der Schutzgeräte zeigt die hier zugrunde liegende Studie des weiteren, daß nur die komponentenweise Substitution konventioneller Algorithmen durch KNN zu verbesserten Schutzgeräten führt. Diese genügen insbesondere bei einem vermehrten Einsatz von impedanzverändernden Betriebsmitteln, wie FACTS-Geräten, den gesteigerten Anforderungen an Zuverlässigkeit, Schnelligkeit und Selektivität.

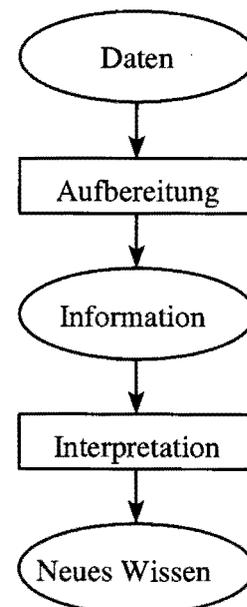
D. Kuhlmann, D. Westermann

EV 9748

### 4.3.5 Intelligente Stationsbetriebsführung

Stationen in elektrischen Energieversorgungssystemen entstehen durch eine Gruppierung elektrischer Betriebsmittel an einem Ort, um sie von hier einfacher überwachen und steuern zu können. Stationen selber sind daher keine Elemente des Energieversorgungsnetzes sondern Einrichtungen der Netzbetriebsführung, um die große geographische Entfernung zwischen der zentralen Netzleitstelle und den Betriebsmitteln zu überbrücken. Die Bedeutung der Stationen ist wesentlich durch die technischen Möglichkeiten in den Bereichen Kommunikationstechnik und Automatisierungstechnik bestimmt. In den Anfängen waren die Stationen mit Personal besetzt, wurden danach mit Entwicklung der Fernwirktechnik von der Netzleitstelle fernüberwacht und mit Einführung der digitalen Stationsleittechnik in Teilbereichen automatisiert. Die fortschreitende Entwicklung im Bereich der Informationstechnik und der Computational Intelligence ermöglicht eine weitere Aufwertung der Stationen durch eine Dezentralisierung von Netzbetriebsführungsaufgaben und durch die Einbindung der Stationen in ein verteiltes intelligentes Informationssystem. Die Intelligenz, die die Stationen mit dem Abzug des Personals verloren hatten, kehrt damit in einem gewissen Umfang in die Stationen zurück. Kernpunkte dieses Arbeitsgebietes sind die Konzeption und Entwicklung der notwendigen informationstechnischen Strukturen in den Stationen unter Berücksichtigung der energietechnischen Anforderungen und der zukünftigen ökonomischen Strukturen in der elektrischen Energieversorgung.

Ein Informationssystem ist ein Hilfsmittel zur Erfassung und zum Austausch von Informationen. Information bezeichnet eine Größe, die Auskunft über einen Zustand von mehreren möglichen Zuständen einer Sache gibt. Information kann auf verschiedenste Arten dargestellt und kodiert werden. In technischen Informationssystemen stellen binär-kodierte Daten die kleinsten Informationseinheiten dar. Die Aufgabe eines Informationssystems besteht einmal darin, einem Benutzer die gespeicherten Informationen in geeigneter Form zur Verfügung zu stellen, damit er diese interpretieren und so seinen Wissensstand erweitern kann. Der Ablauf dieses Informationsverarbeitungsprozesses ist in Bild 4.3.8 graphisch veranschaulicht.

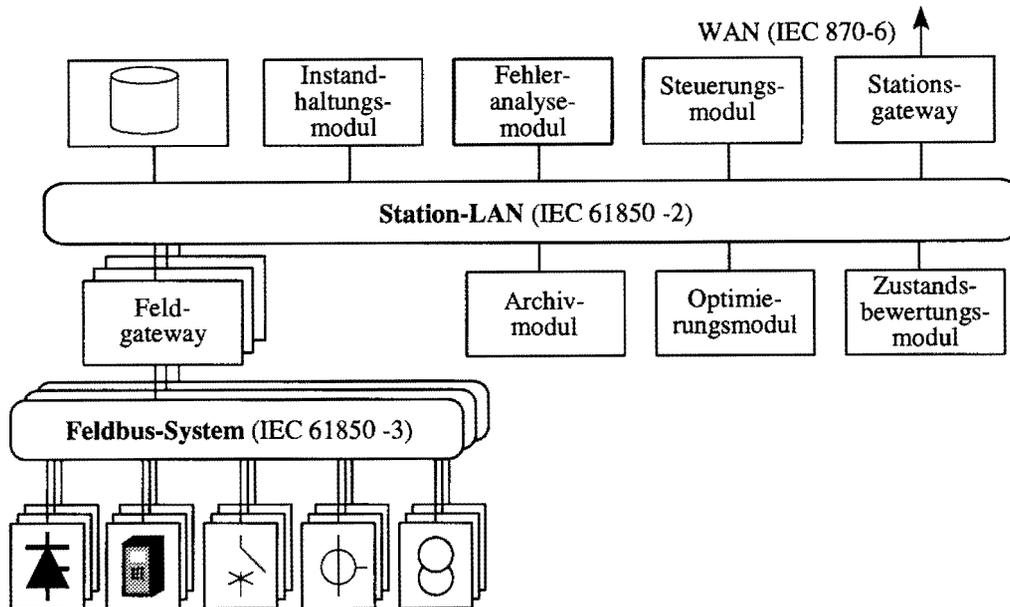


**Bild 4.3.8:** Der Daten- und Informationsverarbeitungsprozeß

Daten werden in binär-kodierter Form erfaßt und durch eine Aufbereitung für den Benutzer zu verwertbaren Informationen, aus denen er durch eine Interpretation zu neuem Wissen über eine Sache gelangt.

Die Grundlage eines Informationssystems bildet ein Datenbanksystem, das für die Verwaltung und Aufbereitung der erfaßten Daten eingesetzt wird. Darüber hinaus werden in modernen Informationssystemen Verfahren zur Aufbereitung der Daten zu höherwertigen Informationen eingesetzt, um den Benutzer bei der Verarbeitung des umfangreichen Datenmaterials, das heutzutage durch die moderne Informationstechnik zur Verfügung gestellt wird, zu entlasten. Zur weiteren Entlastung des Benutzer bei der Interpretation werden Verfahren der Computational Intelligence eingesetzt, die eine automatische Deutung der Informationen und eine automatische Generierung neuen Wissens ermöglichen. Es wird in diesem Zusammenhang auch von intelligenten Informationssystemen gesprochen. Der Umfang und die Art der in einem Informationssystem verwalteten Informationen läßt sich unter Verwendung multimedialer Techniken ausweiten. Mit einem derartigen intelligenten multimedialen Informationssystem hat der Benutzer über seinen Arbeitsplatzrechner Zugriff auf alle verfügbaren Informationen, die in geeigneter Weise für ihn aufbereitet und interpretiert im System vorliegen. In verteilten Rechnersystemen, die im Zuge der großflächigen Einführung digitaler Kommunikationstechnik entstehen, liegen Informationen nicht länger zentral sondern an geographisch verteilten Orten vor. Das Management dieser Informationen stellt besondere Anforderungen hinsichtlich des Zugriffs, der Konsistenz und Integrität. Informationssysteme, die in der Lage sind, geographisch verteilt Informationen zu verwalten, werden als verteilte Informationssysteme bezeichnet.

In einem elektrischen Energieversorgungssystem fallen große Mengen an Prozeßinformationen über das gesamte Netzgebiet verteilt an und werden dezentral in den Stationen erfaßt. Für ein effizientes Management und für die effiziente Verarbeitung dieser Informationen bietet es sich demnach an, die Stationen in ein intelligentes verteiltes Informationssystem einzubinden. Hierfür ist zunächst innerhalb einer Station eine geeignete informationstechnische Infrastruktur zu schaffen. Eine mögliche Konzept für diese Struktur ist in Bild 4.3.9 schematisch skizziert. Dieses Konzept verwendet drei Arten von Kommunikationssystemen, mehrere Feldbus-systeme, ein LAN und ein WAN. Ein Feldbussystem verbindet die Aktoren, Sensoren sowie Kontroll- und Schutzrechnereinheiten innerhalb eines Feldes. Da hier zeitkritische Nachrichten (z.B. Ausschaltbefehl eines Schutzrechners) zu übertragen sind, muß das Feldbussystem ein deterministisches Antwortzeitverhalten aufweisen. Deshalb besteht der Datenverkehr innerhalb eines Feldbussystems aus kurzen Datenpaketen (Nachrichten, Befehlen, Meßwerten etc.) und das Kommunikationsmodell ist einfach strukturiert.

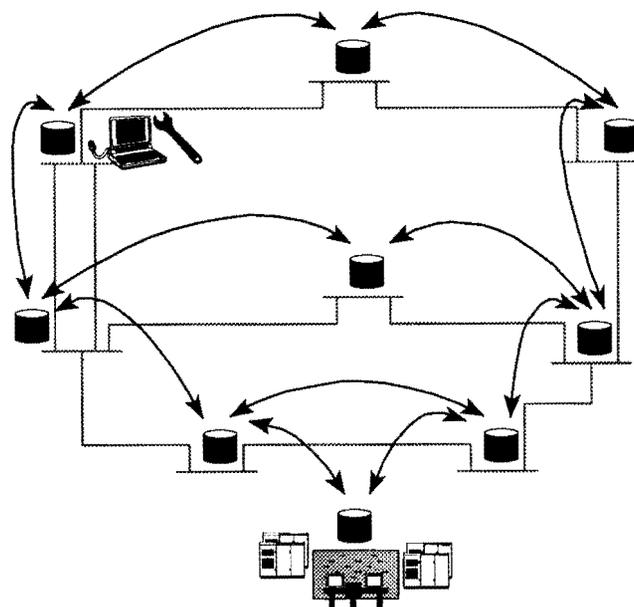


**Bild 4.3.9:** Informationstechnische Struktur einer Station

Das LAN übernimmt den Datenaustausch der Rechnermodule auf Stationsebene. Über dieses LAN werden die in den Feldern erfaßten Daten (Meßwerte, Meldungen, Parameter etc.) in ein Datenbanksystem übertragen und stehen dort für den Zugriff durch die anderen Auswerte- und Interpretationsmodule in der Station bereit. Die Station ist wiederum über ein Gateway an das übergeordnete WAN angeschlossen, in das sämtliche Stationen und Einrichtungen des Energieversorgungssystems integriert sind. Um ein hohes Maß an Herstellerunabhängigkeit bei der technischen Realisierung zu erreichen, ist der Einsatz standardisierter Protokolle in diesen Kommunikationssystemen von großer Bedeutung. Zur Zeit laufen daher zahlreiche Projekte, um geeignete Protokolle für den Informationsaustausch in einer Station zu entwickeln.

Je nach Größe und Bedeutung einer Station können dort vielfältige intelligente Auswerte- und Analyseverfahren zum Einsatz kommen, die aus den erfaßten Daten höherwertige Informationen sowie neues Wissen über den aktuellen Prozeßzustand erzeugen. Durch die Einbindung der Station in das verteilte Informationssystem besteht darüber hinaus für diese Verfahren die Möglichkeit, auf Informationen anderer Stationen zuzugreifen und diese bei ihren Auswertungen und Analysen zu berücksichtigen. Diese neue Verfügbarkeit von Informationen und dieses neue Wissen in der Station läßt sich für eine Verlagerung (d.h. Dezentralisierung) von Betriebsführungsaufgaben in die Stationen verwenden. Die Stationen werden somit zu intelligenten autonomen Betriebsführungseinheiten ausgebaut, die die Verantwortung für den lokalen Prozeßablauf im Rahmen vorher festgelegter Kompetenzen übernehmen.

Im Gesamtüberblick ergibt sich dann die in Bild 4.3.10 dargestellte informationstechnische Struktur in einem Energieversorgungssystem.



**Bild 4.3.10:** Stationen und Netzleitstelle eines Energieversorgungssystems bilden ein geographisch verteiltes Informationssystem

Die Prozeßdaten werden an den Orten, an denen sie erfaßt worden sind, gespeichert und verwaltet. Alle Stationen sowie die Netzleitstelle sind in ein Weitverkehrskommunikationssystem eingebunden und können so miteinander kommunizieren. Das globale Management der geographisch verteilten Informationen wird durch das verteilte Informationssystem übernommen. Alle vorhandenen Prozeßinformationen sind somit in jeder Station des Energieversorgungsnetzes, z.B. für das Instandhaltungspersonal, abrufbar. Der Informationszugriff ist nicht länger ortsabhängig. Für den Benutzer ist die Verteilung der Information dagegen transparent, d.h. er muß über keine Kenntnis des Speicherortes einer Information verfügen, um auf diese zugreifen zu können. Ist das Informationssystem multimedial aufgebaut, beschränkt sich der beschriebene ortsunabhängige Informationszugriff nicht auf die Prozeßdaten sondern erstreckt sich letztendlich auf die Gesamtheit aller Informationen im Energieversorgungsunternehmen (Installationspläne, Dokumentationen, Richtlinien etc.).

Die weiteren Untersuchungen in diesem Arbeitsgebiet beschäftigen sich mit den Anforderungen an die Leistungsfähigkeit der notwendigen Kommunikationssysteme und den Anforderungen und der Konzeption des verteilten Informationssystems, die sich aus dem Umfang der möglichen Dezentralisierung von Betriebsführungsaufgaben ergeben.

A. Koel

EV 9710

## 5 Vorträge

### 5.1 Beiträge für das Kolloquium

- 08.01.1997 *T. Göke, FGH Mannheim*  
"Zentrale Kompensation von Oberschwingungen in Mittelspannungsnetzen"
- 17.02.1997 *D. Westermann, Universität Dortmund*  
"Integration innovativer Betriebsmittel in die Netzbetriebsführung elektrischer Energieübertragungssysteme"
- 16.04.1997 *A. Gaul, Universität Dortmund*  
"Wirtschaftlich optimale Lastverteilung mit evolutionären Strategien"
- 02.07.1997 *U. Neumann, Universität Dortmund*  
"Integrierte Instandhaltungsplanung für elektrische Energieübertragungssysteme"
- 23.09.1997 *C. Rehtanz, Universität Dortmund*  
"Einsatz eines SMES zur Verbesserung der Spannungsstabilität elektrischer Energieübertragungssysteme"

### 5.2 Vorträge von Lehrstuhlmitarbeitern

- 14.01.1997 *E. Handschin*: "Einsatz elektrischer Energiespeicher in der Energieversorgung", Vortrag beim VDE Bezirksverein Rhein Ruhr in Gelsenkirchen
- 16.01.1997 *E. Handschin*: "Technische und wirtschaftliche Aspekte der elektrischen Energiespeicherung", Vortrag beim VDE, Bezirksverein Stuttgart
- 29.01.1997 *E. Handschin*: "Zustandsabhängige Instandhaltungsplanung", AKTR Forum der FGH in Stuttgart
- 03.02.1997 *E. Handschin*: "Technologies of Electrical Storage Devices", Vortrag am Lehrstuhl von Prof. Dr.-Ing. Feser der Universität Stuttgart
- 09.04.1997 *C. Rehtanz*: "Einsatz eines SMES zur Verbesserung der Spannungsstabilität in elektrischen Energieversorgungssystemen", DFG-Kolloquium an der Universität Kaiserslautern
- 24.04.1997 *E. Handschin, R. Palma*: "Cooperation in Energy System Research", ALFA-Workshop, Imperial College of Science, Technology and Medicine, London

- 13.06.1997 *C. Rehtanz*: "System Engineering Aspects for the Implementation of SMES in Electrical Power Systems" Screw Compressor / UPS Seminar, Dortmund
- 07.07.1997 *D. Kuhlmann*: "Experiences with two different fault diagnosis systems applying expert system and device-specific ANN techniques", Vortrag im Rahmen der International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems, ISAP'97, Seoul, Korea
- 09.07.1997 *D. Kuhlmann*: Diskussionsteilnehmer an der Podiumsdiskussion "Fault diagnosis, alarm processing and supervision – expert system and model-based approaches" im Rahmen der International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems, ISAP'97, Seoul, Korea
21. 07.1997 *U. Neumann*: "Integrated maintenance scheduling system for electrical energy systems", IEEE-PES Summer Meeting 1997 in Berlin
- 24.07.1997 *A. Gaul*: "Establishing a rule base for a hybrid ES/XPS approach to load management", Vortrag im Rahmen des IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Berlin
- 18.08.1997 *E. Handschin*: "System Operation in an Energy Market Environment", IFAC/CIGRE Symposium on Control of Power Systems and Power Plants, Beijing, China
- 11.09.1997 *W. Horenkamp, L. Neuhaus*: "Prozeßvisualisierung mit Datenfernübertragung für einen Brennstoffzellenprüfstand", Vortrag im Rahmen der MessComp '97 in Wiesbaden
- 01.10.1997 *E. Handschin*: "Ergänzende Systeme der Netzbetriebsführung / Auswerte-, Beratungs- und Trainingsysteme", AKTR-Seminar der FGH in Deidesheim
- 02.10.1997 *E. Handschin*: "Object-Oriented Based Methods and Techniques in Control Centres Applied to Open Access Schemes", 10th International Conference on Power System Automation and Control, PSAC '97, Bled, Slovenien
- 02.10.1997 *C. Rehtanz*: "Kohonen Neural Networks for Visualization and Analysis of Voltage Stability", 10th International Conference on Power System Automation and Control, PSAC '97, Bled, Slovenien
- 10.10.1997 *C. Rehtanz*: "Visualization and Analysis of Voltage Stability Using Self-Organizing Neural Networks", 7th International Conference on Artificial Neural Networks, ICANN '97, Lausanne, Schweiz

- 04.11.1997 *R. Palma*: Vortrag im Rahmen des Kongresses: "XII Congreso Chileno de Ingeniería Eléctrica", Temuco, Chile
- 14.11.1997 *J. Teupen*: Vortrag im Rahmen des EUS-Kolloquiums "Neue schutz- und leittechnische Konzepte für dezentrale Energieversorgungsanlagen", EUS-GmbH, Gelsenkirchen
- 18.11.1997 *A. Koel*: "Substation Control - Present State and Future Trend"  
Kolloquium: Selected Problems of Power System Control, Prag
- 27.11.1997 *D. Kuhlmann*: "System Fault Diagnosis Using Artificial Neural Networks",  
Vortrag im Rahmen des EES-UETP Seminars "Artificial Neural Networks for Power Systems Applications", Lissabon, Portugal

## 6 Veröffentlichungen

### 6.1 Veröffentlichungen

*E. Handschin, A.J. Gaul, W. Hoffmann:* "Optimal management of electrical loads using knowledge aware evolutionary strategies", Engineering Intelligent Systems for Electrical Engineering and Communications, CRL Publishing Ltd., vol. 5, No 1, March 1997

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.

*E. Handschin, A.J. Gaul, W. Hoffmann, C. Lehmköster:* "Establishing a rule base for a hybrid ES/XPS approach to load management", A Paper recommended and approved by the IEEE Power System Analysis, Computing and Economics Committee of the IEEE Power Engineering Society for publication in the IEEE Transaction on Power Systems. Manuscript submitted Dec 31, 1996; made available for printing May 23, 1997, Paper No PE-940-PWRS-0-05-1997

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 to 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.

*V. Bühner, E. Handschin, W. Hoffmann, D. Kuhlmann:* "Experiences with two different fault diagnosis systems applying expert system and device-specific ANN techniques", Proc. of the International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems, ISAP'97, 6.-10. Juli 1997, Seoul, Korea, S. 111-115

In this paper experiences with two approaches to power system fault diagnosis and their integration into control systems are reported. The Expert System based software package (XPS/ALARM) is currently in operation in the control centre of a coal mining company and an alternative ANN based solution has been implemented and integrated into an EMS system in cooperation with a manufacturer. By discussing experiences with the development, the EMS integration of both systems, and results derived from online and offline tests strong and weak points of both alternative approaches are presented in this paper.

*E. Handschin, D. Kuhlmann, D. Westermann:* "ANN-based measuring algorithms for power system protection", angenommen für: International Journal of Engineering Intelligent Systems, A special Issue on Intelligent Systems Applications on Power System Protection, erscheint Ende 1997

During the last years a lot of research activities have been directed to point out the properties of Artificial Neural Networks (ANN) for applications in the field of electric power engineering. A survey of the use of ANN for the realization of powerful measuring algorithms with special interest in power system protection is presented in this paper. After a brief description of requirements for modern power protection system different application areas for ANN in the field of signal processing, fault classification and fault location are discussed. All these methods are related to measuring algorithms for power system protection.

*E. Handschin, W. Horenkamp, L. Neuhaus:* "Prozeßvisualisierung mit Datenfernübertragung für einen Brennstoffzellenprüfstand", Expert-Verlag, September 1997, Bd. 2 Meßcomp'97 "Die Meß- und Automatisierungspraxis", S. 343-351

Für einen Brennstoffzellenversuchsstand wird ein System zur Langzeitmeßdatenerfassung, Prozeßvisualisierung und Datenfernübertragung beschrieben. Es werden die Vor- und Nachteile alternativer Lösungskonzepte aufgezeigt und das realisierte System erläutert. Insbesondere werden die Möglichkeiten der Datenarchivierung und der Datenfernübertragung dargestellt.

*E. Handschin, C. Rehtanz: "Kohonen Neural Networks for Visualization and Analysis of Voltage Stability", Proc. of 10th International Conference on Power System Automation and Control, PSAC '97, Bled, Slovenien, 01. - 03. Oktober 1997*

A conclusive mathematical description of voltage stability in electrical power systems separates the load flow Jacobian matrix for the analysis. The indication by the minimum singular value of the load flow Jacobian and an indicator of maximum load increase are used as a basis for the determination of voltage stability. Beyond these indicators the application of a self-organizing Kohonen-Neural-Network (KNN) is presented for a fast and secure indication and visualization of voltage stability. The advantage of the structural representation of the system condition by the KNN is worked out bypassing the disabilities of the standard voltage stability indicators. In addition, the application of KNN aims at the analysis of measures for the improvement of voltage stability. All examples are calculated using a model of a real power transmission system.

*E. Handschin, T. Nikodem, R. Palma, C. Rehtanz: "Object-Oriented Based Methods and Techniques in Control Centres Applied to Open Access Schemes", Proc. of 10th International Conference on Power System Automation and Control, PSAC '97, Bled, Slovenien, 01. - 03. Oktober 1997*

The introduction of open access conditions creates new challenges in the development and maintenance of methods and techniques applied in control centres. The object oriented 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 institutional arrangements of the electricity supply industry. It presents the global object oriented structure of a power system representation and the realization of traditional power system analysis applications with object oriented programming methods. For the purpose of evaluating open access approaches for power system planning and operation a developed computer program is presented.

*E. Handschin, D. Kuhlmann, C. Rehtanz: "Visualization and Analysis of Voltage Stability Using Self-Organizing Neural Networks", Proc. of 7th International Conference on Artificial Neural Networks, ICANN '97, Lausanne, Schweiz, 08. - 10. Oktober 1997, Lecture Notes in Computer Science, Nr. 1327, Springer-Verlag, Berlin, 1997, S. 1113-1118*

On the basis of a compelling mathematical description of voltage stability in electrical power systems and its indication using the minimum singular value of the load flow Jacobian the

application of a self-organizing Kohonen-Neural-Network (KNN) is presented for a fast and secure indication and visualization of voltage stability. The advantage of the structural representation of the system condition by the KNN is worked out by bypassing the disabilities of standard voltage stability indicators. In addition the application of KNN aims at the analysis of measures for the improvement of voltage stability. All examples are calculated using a model of a real power transmission system.

*E. Handschin, U. Neumann, G. Bretthauer, T. Gamaleja, W. Hoffmann: "Integrated maintenance scheduling system for electrical energy systems", A Paper recommended and approved by the IEEE Transmission and Distribution Committee of the IEEE Power Engineering Society for publication in the IEEE Transactions on Power Delivery, Manuscript submitted Dec 30, 1996; made available for printing May 23, 1997, Paper No PE-875-PWRD-0-05-1997*

In electrical energy systems an essential part of the operation costs results from maintenance activities. Many applications discussing the task of reducing maintenance expenditure mainly aim at developing diagnostic techniques in order to avoid unnecessary maintenance activities. However, maintenance scheduling can only be done effectively if the condition of the whole system is taken into account and system-specific aspects are considered besides device-specific information. The integrated maintenance scheduling system presented in this paper takes into consideration device and system-specific data in order to coordinate the maintenance activities for constrained maintenance schedules. Since despite the restrictions many different schedules can be generated, they are evaluated in order to find an optimal schedule concerning economic and utility dependent criteria. For this task, methods of evolutionary strategies and fuzzy decision theory are applied. In this way, the presented scheduling system supports the maintenance engineer to coordinate maintenance activities more effectively.

*E. Handschin, M. Heine, D. König, T. Nikodem, T. Seibt, R. Palma: "Object-oriented software engineering for transmission planning in open access schemes", A Paper recommended and approved by the IEEE Power System Analysis, Computing and Economics Committee of the IEEE Power Engineering Society for publication in the Transactions on Power Systems, Manuscript submitted December 31, 1996; made available for printing May 23, 1997, Paper No PE-941-PWRS-0-05-1997*

The object-oriented approach has gained wide spread importance and acceptance in software development due to the advantages it offers concerning flexibility, expandability, maintainability, and 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.

*E. Handschin, M. Heine, T. Nikodem, R. Palma: "Object Oriented Software Engineering for Power Systems in Open Access Schemes", XII Congreso Chileno de Ingeniería Eléctrica, 03.-08. November 1997, Temuco, Chile*

The object oriented 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 institutional arrangements of the electricity supply industry. It presents the global object oriented structure of a power system representation and the realization of traditional power system analysis applications with object oriented programming methods. For the purpose of evaluating open access approaches for power system planning and operation a developed computer program is presented.

*E. Handschin, A. Koel: "Substation Control - Present State And Future Trends", International Colloquium on Selected Problems of Power System Control, Prag, November 1997*

This paper describes the development of substation control from manned substations up to substations in the future communication and information age. The new promising possibilities of this age can contribute to a more efficient substation control in electrical power systems, because all information will be available at every place in the power system regardless of their physical location. But to take full advantage of this new information access suitable applications for the information processing and presentation must be available. In this context the use of computational intelligence for the information processing and multimedia techniques for the information presentation will play an important role. Furthermore, the new availability of information combined with the use of computational intelligence will allow a decentralization of control functions. Thus the intelligence, which was lost due to the withdrawn of the substation staff, will come back to the substation and it will become an intelligent substation.

## **6.2 Forschungsberichte**

*W. Feilhauer, C. Leder:* "Berechnung von Erdungsgittern in Freiluftschaltanlagen", EV 9707

*A.J. Gaul, V. Grunert, T. Hilker:* "Modellierung von Rundsteuerlasten", EV 9708

*Ch. Rehtanz:* "Einsatz eines SMES zur Verbesserung der Spannungsqualität in elektrischen Energieversorgungssystemen", EV 9716

*E. Handschin, Ch. Rehtanz:* "Seminar Innovative Energieversorgung", EV 9721

*U. Neumann:* "Zustandsbezogene Instandhaltungsplanung", EV 9733

*D. Kuhlmann, D. Westermann:* "ANN-based measuring algorithms for power system protection: A literature survey", EV 9748

## **6.3 Diplomarbeiten**

*Th. Seibt:* "Entwicklung eines OPF-Algorithmus zur Untersuchung von Durchleitungen im Verbundbetrieb", EV 9702

*G. Bayard:* "Analyse und Verbesserung der Stabilität longitudinaler Energieübertragungsnetze mit Hilfe innovativer Betriebsmittel", EV 9709

*G.K. Prünke:* "Konzeption eines Praktikumsversuches zum Thema "Schutztechnik in Hochspannungsnetzen", EV 9710

*D. Reinecke:* "Ermittlung der optimalen Ausbaustrategie eines Mittelspannungsnetzes", EV 9728

*Th. Wiesner:* "Erfassung charakteristischer Größen im Niederspannungsnetz zur Identifizierung von Verbrauchern", EV 9729

*H. Breulmann:* "Einfluß dezentraler Netzeinspeisungen auf die Planung und den Betrieb von Mittelspannungsnetzen", EV 9730

*M. Finkelmann:* "Wirtschaftlicher Netzanschluß von industriellen Großkunden durch den Einsatz aktiver Netzfilter", EV 9735

*R. Hanfland:* "Einsatz der Clusteranalyse zur Modellierung von Sondervertragskunden in Mittelspannungsnetzen", EV 9738

*F. Pieper:* "Netzanbindung von SOFC-Brennstoffzellenanlagen im Niederspannungsnetz", EV 9747

*Ch. Wulf:* "Auswirkung der Kurzzeiterdung in einem gelöscht betriebenen Mittelspannungsnetz", EV 9749

*A. Schmitt:* "Modellierung und Auswirkung der Schaltbewegung von Leistungsschaltern", EV 9750

## **6.4 Studienarbeiten**

*Th. Wiesner:* "Identifizierung von Verbrauchern aus Summenmessungen in teil- und vollelektrischen Haushalten", EV 9701

*M. Finkelmann:* "Leistungsfähigkeit von UPC-Systemen zur Netzzrückwirkungskompensation bei industriellen Verbrauchern", EV 9703

*F. Pieper:* "Erarbeitung von Optimierungsvorschlägen anhand einer Betriebsanalyse des BHKW der Universität Dortmund", EV 9712

*Ch. Wulf:* "Auswirkungen von Potentialanhebungen bei atmosphärischen Entladungsvorgängen in kompensierten 10-kV-Netzen", EV 9715

*F. Scheunemann:* "Entwicklung eines Modells zur Zuverlässigkeitsbewertung von Übertragungsnetzen basierend auf der Monte-Carlo Simulation", EV 9718

*Ch. Mensmann:* "Analyse des Verbraucherverhaltens von Sondervertragskunden in Mittelspannungsnetzen", EV 9719

*H. Hösch:* "Nutzung von Windkraftanlagen im Umland der Universität Dortmund unter Berücksichtigung der Verbesserung der Spannungsstabilität", EV 9734

*A. Luig:* "Energie- und Leistungsmessung unter Verwendung eines digitalen Signalprozessors", EV 9736

*L. Müller:* "Vergleichende Strukturanalyse der deutschen und spanischen Elektrizitätswirtschaft", EV 9739

*P. Althoff:* "Realisierung einer Prozeßvisualisierung für einen SOFC-Prüfstand", EV 9740

*Th. Dietz:* "Anwendbarkeit der Spieltheorie zur Simulation ökonomischer Entscheidungsprozesse in liberalisierten Energieversorgungsunternehmen", EV 9751

## **6.5 Programmbeschreibungen**

*F. Reyer, T. Nikodem, D. Kuhlmann:* "Störwerkerfassungssysteme für das Industrienetz der BASF AG - Parametrierung und Auswertung", EVP 9701

*W. Horenkamp:* "Digitaler Funktionsgenerator mit Leitungsteil", EVP 9702

*R. Hanfland:* "Einsatz der Clusteranalyse zur Modellierung von Sondervertragskunden in Mittelspannungsnetzen", EVP 9703

## 7 Promotionen

*Dirk Westermann:* "Integration innovativer Betriebsmittel in die Netzbetriebsführung elektrischer Energieübertragungssysteme"

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

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. D. Povh

Tag der mündlichen Prüfung: 19.03.1997

Veränderte Randbedingungen in der Energieversorgung erfordern eine verbesserte Anpassungsfähigkeit bestehender elektrischer Energieübertragungssysteme (EÜS) durch betriebliche Maßnahmen. Diese können netzseitig durch innovative Betriebsmittel (IB), die durch den Einsatz leistungselektronischer Komponenten eine schnelle Regelbarkeit aufweisen, durchgeführt werden. Aufbauend auf der hier vorgestellten stationären und dynamischen Modellierung von IB wird im Rahmen eines systemtechnischen Ansatzes die Integration in die Netzbetriebsführung vorgestellt und das Betriebsverhalten analysiert. Ausgehend von den Problemen, die mit der Integration von IB in die Netzbetriebsführung verbunden sind, wird ein systemtechnischer Ansatz formuliert, der sowohl die Einsatzplanung als auch die Betriebsführung berücksichtigt. Es werden Störungen im Verbundbetrieb analysiert, bei denen ein Bedarf an Koordination der IB-Regelung besteht. Es wird gezeigt, daß dieser über präventive Koordinationsmaßnahmen gedeckt werden kann, wodurch ein Dauerbetrieb auch von mehreren IB gewährleistet werden kann, so daß damit die Grundlage für spezifische Abschätzungen des Potentials anpassungsfähiger Energieübertragungssysteme gegeben ist.

*Thomas Göke:* "Zentrale Kompensation von Oberschwingungen in Mittelspannungsnetzen"

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

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. W. H. Wellßow

Tag der mündlichen Prüfung: 19.03.1997

Das Ziel dieser Arbeit ist, durch zentrale Kompensation im Mittelspannungsnetz die Oberschwingungspegel im Mittelspannungsnetz und den unterlagerten Niederspannungsnetzen zu reduzieren. Zu diesem Zweck sollen Filterkreisanlagen an der Hauptsammelschiene im Mittelspannungsnetz eingesetzt werden, die auf die entsprechenden Oberschwingungen abgestimmt werden. In der vorliegenden Arbeit werden Reichweite und Wirkungsgrad derartiger Kompensationseinrichtungen untersucht. Nach den erforderlichen Grundlagen werden die gültigen Verträglichkeitspegel erläutert und die Ergebnisse unterschiedlicher Meßprogramme zusammengefaßt. Die Einsatzmöglichkeiten und Realisierungskonzepte passiver Filterkreisanlagen für die zentrale Kompensation werden vorgestellt. Diese werden

spezifiziert und dimensioniert. Zur Untersuchung systemtechnischer Aspekte wie Reichweite und Wirkungsgrad wird ein Verfahren der linearen harmonischen Analyse ausgewählt, mit dem die stationären Oberschwingungen in Energieversorgungssystemen berechnet werden. Mittels eines Monte-Carlo-Simulationsverfahrens werden stochastische und zeitlich veränderliche Oberschwingungspegel in den zu untersuchenden Mittelspannungsnetzen simuliert. Anhand der Simulation ausgewählter Szenarien werden allgemeingültige Aussagen zur zentralen Kompensation abgeleitet.

*Armin J. Gaul:* "Wirtschaftlich optimale Lastverteilung mit evolutionären Strategien"

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

Korreferent: Prof. Dr. A. Germond

Tag der mündlichen Prüfung: 17.07.1997

Elektrische Energie ist in Größenordnungen von einigen hundert Megawattstunden nur bedingt speicherbar. Klassische Optimierungsverfahren setzen daher eine bedarfsgerechte Erzeugung voraus und optimieren den Kraftwerkseinsatz. In dieser Arbeit werden fernschaltbare elektrische Lasten in diese Optimierung einbezogen. Das Planungsverhalten der Betriebsführung wird dazu auf dem Rechner nachgebildet. Untersucht werden zur Steuerung der Lasten sowohl genetische Algorithmen als auch evolutionäre Strategien. Basierend auf der Tageseinsatzplanung der Kraftwerke kann mit diesen Verfahren eine Optimierung der steuerbaren Lasten realisiert werden. Evolutionäre Strategien zeigen dabei hervorragende Eigenschaften. Weder Randbedingungen noch die Unstetigkeit der Zielfunktion stellen Probleme dar. In allen untersuchten Fällen wird die Güte der »von Hand« optimierten Vergleichslastgänge algorithmisch erreicht.

*Christian Rehtanz:* "Einsatz eines SMES zur Verbesserung der Spannungsstabilität elektrischer Energieübertragungssysteme"

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

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. F. Gubina

Tag der mündlichen Prüfung: 31.10.1997

Bei nicht bedarfsgerechtem Ausbau oder dereguliertem Betrieb elektrischer Energieübertragungssysteme besteht die Gefahr eines Spannungskollaps. Zur Entwicklung bislang nicht vorhandener stabilisierender Maßnahmen wird eine mathematische Herleitung und Abgrenzung der Spannungsstabilität anhand der Bifurkationstheorie vorgenommen. Hieraus werden Spannungsstabilitätsindikatoren auf der Basis künstlicher neuronaler Netze nach Kohonen entwickelt, die erstmalig eine schnelle und zuverlässige Bestimmung und

Visualisierung der Spannungsstabilität ermöglichen. Zur Verbesserung der Spannungsstabilität erfolgt die systemische Integration eines SMES, wobei sämtliche Komponenten der Kraftwerks- und Betriebsführung untersucht werden. Eine multifunktionale SMES-Regelung wird geschlossen für die ereignisorientierte und koordinierte Erfüllung der SMES-Aufgaben der Spannungsstabilität, der Bereitstellung von Wirkleistungssekundenreserve und der Verbesserung der transienten Stabilität bzw. Versorgungsqualität entworfen. Der SMES-Einsatz wird anhand dynamischer Simulationen validiert und dessen Wirtschaftlichkeit abgeschätzt.

*Uwe Neumann:* "Integrierte Instandhaltungsplanung für elektrische Energieübertragungssysteme"

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

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. G. Bretthauer

Tag der mündlichen Prüfung: 31. 10.1997

Ein wesentliches Ziel aktueller Untersuchungen hinsichtlich der Instandhaltung in elektrischen Energieübertragungssystemen liegt in der Aufwandsreduktion bei der Instandhaltungsplanung. Zwei wichtige Bestandteile hiervon sind einerseits die Ermittlung des Instandhaltungsbedarfs der Betriebsmittel sowie andererseits die zeitliche Koordination der zu planenden Instandhaltungsmaßnahmen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Restriktionen, wie beispielsweise topologische Abhängigkeiten der Betriebsmittel und verfügbare Personalressourcen. Ausgehend von diesen Teilaufgaben der Instandhaltungsplanung wird in dieser Arbeit zum einen ein Verfahren zur einheitlichen und von den unterschiedlichen Informationsquellen unabhängigen Beschreibung der Betriebsmittelzustände entwickelt. Zum anderen werden Verfahren realisiert, die eine rechnerunterstützte Koordination der Instandhaltungsmaßnahmen ermöglichen. Beide Bestandteile werden in einen umfassenden Lösungsansatz zur Instandhaltungsplanung integriert und bilden so ein geschlossenes Lösungskonzept für eine wirtschaftliche Instandhaltungsplanung.