

## VORWORT

Am 1. März 1994 konnte der Lehrstuhl für elektrische Energieversorgung auf eine zwanzigjährige Tätigkeit zurückblicken. Diesen Anlaß haben wir genutzt, um im Kreis aller ehemaligen Mitarbeiter auf die zurückliegende Zeit zu schauen. Nicht vergessen haben wir dabei die vielseitige und tatkräftige Unterstützung, die wir in dieser Zeit von den zahlreichen externen Unternehmen und Instituten bekommen haben, um unsere Arbeit effektiv und interessant gestalten zu können. Dafür sei Ihnen allen, die Sie uns geholfen haben den Lehrstuhl zu gestalten und auszubauen, sehr herzlich Dank gesagt. Dennoch war das Jubiläum nicht Anlaß, auf den Lorbeeren auszuruhen. Am 18.08.94 konnte das in unmittelbarer Nähe der Universität errichtete F&E-Gebäude offiziell eröffnet werden. Damit ist ein äußerst zweckmäßiger Bau für die dauerhafte und angemessene Unterbringung der Mitarbeiter des Zentrums für Expertensysteme Dortmund (ZEDO) unter genauer Einhaltung des vorgegebenen Kosten- und Zeitrahmens seiner Bestimmung übergeben worden. Durch die interdisziplinäre Arbeitsweise des ZEDO sowie die vorhandene, hervorragende Infrastruktur ist sichergestellt, daß vielseitige Anwendungen auf den Gebieten der Expertensysteme, der künstlichen neuronalen Netze und der Fuzzy Logic für Probleme der Praxis in Technik und Dienstleistungen entwickelt werden können. Nach fast dreijähriger Planung und Vorbereitung konnte das Zentrum für innovative Energieumwandlung und -speicherung (ZEUS) am 1.09.94 seinen Betrieb in Gelsenkirchen aufnehmen. Damit ist eine kohärente Gruppe bestehend aus drei Säulen aufgebaut worden. An der Universität entstehen wie bisher die grundsätzlichen Beiträge zu aktuellen F&E-Projekten der elektrischen Energieversorgung. Die informationstechnischen Probleme werden über ZEDO in die praktische Realisierung überführt. Neue Aufgaben der dezentralen, verteilten Energieumwandlung und -speicherung zusammen mit den entsprechenden Systemstudien und Schulungsmaßnahmen werden in ZEUS für die Praxis bearbeitet. Mit dieser Dreiteilung können die Anforderungen der Praxis noch besser als bisher berücksichtigt werden. Ich freue mich auf die erfolgreiche und vertrauensvolle Weiterführung der bisherigen Zusammenarbeit und bin sicher, daß die verbesserte und erweiterte Organisation unserer Arbeiten dazu einen guten und effektiven Rahmen gibt.

E. Handschin

## INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. PERSONAL	1
2. KOOPERATION MIT ANDEREN FORSCHUNGS- EINRICHTUNGEN	2
3. LEHRBETRIEB	4
3.1 Vorlesungen	4
3.2 Seminar	5
3.3 Praktika	5
3.4 Projektgruppen	6
3.5 Exkursionen	7
4. FORSCHUNGS- UND ENTWICKLUNGSARBEITEN	8
4.1 Software-Entwicklung für die Betriebsführung und Planung elektrischer Energieversorgungssysteme	9
4.2 Modellierung und Simulation statischer und dynamischer Vorgänge in elektrischen Energieversorgungssystemen	38
4.3 Schutz- und Leittechnik	59
5. VORTRÄGE	80
5.1 Beiträge für das Kolloquium	80
5.2 Vorträge von Lehrstuhlmitgliedern	81
6. VERÖFFENTLICHUNGEN UND BERICHTE	83
6.1 Veröffentlichungen	83
6.2 Forschungsberichte	88
6.3 Diplomarbeiten	89
6.4 Studienarbeiten	90
7. PROMOTIONEN	93



## 2. KOOPERATION MIT ANDEREN FORSCHUNGSEINRICHTUNGEN

*Zentrum für innovative Energieumwandlung  
und -speicherung E.U.S. GmbH  
Schwarzmühlenstr. 104  
45664 Gelsenkirchen*

Die in diesem Jahr gegründete Forschungsgesellschaft E.U.S. verfolgt das Ziel, im Ruhrgebiet ein F&E-Institut auf dem Gebiet der elektrischen Energietechnik zu betreiben. Schwerpunktmäßig bearbeitet E.U.S. systemtechnische Aufgaben im Zusammenhang mit der Planung und dem Betrieb verteilter Energieumwandlungs- und Energiespeicheranlagen. Ideell und personell ist E.U.S. aus dem Lehrstuhl für elektrische Energieversorgung hervorgegangen. In Zukunft wird eine enge Kooperation zwischen beiden Institutionen dazu dienen, innovative Beiträge aus der Hochschule zur praktischen Anwendung zu bringen.

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

Eine satzungsgemäße Aufgabe des ZEDO ist die Förderung der Forschung und des Forschungstransfers auf dem Gebiet neuer Informationsverarbeitungstechnologien wie wissensbasierte Systeme, künstliche neuronale Netze, Fuzzy Logik, Fuzzy Control und genetische Algorithmen. Mehrere derzeit am Lehrstuhl für elektrische Energieversorgung bearbeitete Forschungsvorhaben werden vom ZEDO aktiv unterstützt. Vornehmlich entwicklungsorientierte Vorhaben werden, nach der entsprechenden wissenschaftlichen Vorbereitung durch den Lehrstuhl, von ZEDO in Kooperation mit der Industrie durchgeführt.

*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 zum Einsatz von SMES in Energieversorgungsnetzen dar. Im Berichtszeitraum waren folgende Mitarbeiter des SEI als akademische Gäste am Lehrstuhl:

Prof. N. I. Voropai	27.08.1994 - 04.09.1994
Prof. A. Z. Gamm	07.11.1994 - 16.12.1994
Dr. D. Efimov	07.11.1994 - 16.12.1994

Der Austausch von akademischen Gästen des Lehrstuhls mit dem SEI wird durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert.

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

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

Der Lehrstuhl für elektrische Energieversorgung bearbeitet zusammen mit IASE und TUW ein von der EU gefördertes Forschungsvorhaben zum Thema "Innovative Informationsverarbeitungstechnologien für die zuverlässige Betriebsführung ost-europäischer Energieversorgungsnetze". Im Rahmen dieses Projekts waren im Berichtszeitraum folgende akademische Gäste am Lehrstuhl:

Dr. A. Gluszek	IASE	21.03.1994 - 31.03.1994
B. Sajewicz	IASE	21.03.1994 - 31.03.1994
R. Lis	TUW	04.07.1994 - 15.07.1994

### **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.

##### **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, Kraftwerkstechnik

##### **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.

##### **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.

## 3.2 Seminar

### **Qualitätsmanagement in der elektrischen Energieversorgung**

(Prof. Dr.-Ing. E. Handschin und Mitarbeiter)

Inhalt: Grundlagen der Normen des Qualitätsmanagements, Qualitätsmanagement im elektrischen Anlagenbau und in EVU, Qualität der Versorgungsspannung, Vergleich der Qualitätspolitik verschiedener Länder.

## 3.3 Praktika

Im Rahmen des von allen Lehrstühlen und Arbeitsgebieten der Fakultät Elektrotechnik gemeinsam organisierten Grundlagenpraktikums im 3., 4. und 5. Semester 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.

Im Rahmen des von allen Lehrstühlen und Arbeitsgebieten der Fakultät Elektrotechnik gemeinsam organisierten Fortgeschrittenen-Praktikums im 6. und 7. Semester werden vom Lehrstuhl für elektrische Energieversorgung folgende Versuche angeboten:

**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.

**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.

**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.

### 3.4 Projektgruppen

Zur Förderung der Teamarbeit wird die Mitarbeit in Projektgruppen als Alternative zum Praktikum angeboten. In diesem Berichtszeitraum kamen folgende Projektgruppen zustande:

**Netzmodellsteuerung:** Der Einsatz von analogen Netzmodellen erlaubt eine detaillierte Untersuchung von stationären und dynamischen Vorgängen in elektrischen Energieübertragungssystemen. Im Rahmen dieser Projektgruppe wurde für ein Drehstrom-Netzmodell eine PC-gestützte Netzmodellregelung realisiert. Dazu waren die Meß- und Steuerungsleitungen des Netzmodells an den PC anzukoppeln und die geeignete Verarbeitungssoftware in der Programmiersprache C zu entwickeln.

**Dynamische Simulation:** Da elektrische Netze über kein nennenswertes Speichervermögen verfügen muß die Erzeugung kurzfristig der Netzbelastung angepaßt werden. Zur Aufrechterhaltung des Leistungsgleichgewichts wird dazu mit der sogenannten Primärregelung aufgrund des Frequenzverhaltens die Erzeugung der geregelten Kraftwerke kurzfristig angepaßt. Im Rahmen dieser Projektgruppe wurden einfache lineare und nichtlineare Modelle mit Hilfe des Simulationssystems SIMULINK erstellt, auf deren Grundlage das zeitliche Verhalten eines Energieversorgungssystems unter dem Einfluß der Primärregelung bei großen Lastsprüngen nachgebildet werden kann.

**Lastführungsstrategien:** Elektrische Energie stellt eine unter Versorgungsgesichtspunkten kaum speicherbare Energieform dar. Daher muß sie bedarfsgerecht erzeugt werden. Da die elektrische Energie oft für die Versorgung von Verbrauchern verwendet wird, die selbst Speicher darstellen, ist es naheliegend, zur weiteren Optimierung den Bedarf so zu beeinflussen, daß er zu Zeiten mit niedrigen Erzeugungs- und Verteilungskosten hin verschoben wird. In vielen Energieversorgungsunternehmen steht heute zu dieser Lastführung ein leistungsfähiges Rundsteuersystem bereit. Je nach Größe des Unternehmens werden hierbei sehr unterschiedliche Steuerverfahren angewendet. Ausgehend von einfachen Modellen steuerbarer Lasten wurden im Rahmen dieser Arbeit Konzepte für eine Lastführung entwickelt und in der Programmiersprache C implementiert.

**Mittelzeitsimulation eines Energieversorgungsnetzes:** Das Verhalten der Frequenz eines Energieversorgungsnetzes im Mittelzeitbereich kann durch ein lineares Differentialgleichungssystem beschrieben werden. Der zu simulierende Frequenzverlauf wird dabei neben den vorgegebenden Lastsprüngen durch den Startwert des Zustandsvektors und die verwendeten Modellparameter bestimmt. Durch einen Vergleich von Messungen der Netzfrequenz mit entsprechenden Simulationen kann der Modellparametersatz bis zu einer optimalen Übereinstimmung abgeglichen werden. Im Rahmen dieser Projektgruppe wurde ein Programm entwickelt, welches für ein vorgegebendes Modell eines Energieversorgungssystems auf der Basis von Frequenzmessungen und bekannten Lastsprüngen die Modellparameter für die Simulation estimiert.

### 3.5 Exkursionen

Im Berichtszeitraum wurden folgende Exkursionen für Studenten ab dem 7. Fachsemester durchgeführt:

- Eintägige Exkursion zum Braunkohlekraftwerk Neurath und zur Photovoltaikanlage Neurather See der RWE Energie AG
- Eintägige Exkursion zum Steinkohlekraftwerk Scholven der VEBA Kraftwerke Ruhr AG und zur Deponiegasverwertungsanlage der Dortmunder Stadtwerke in Dortmund - Huckarde
- Besichtigung der RWE-Hauptschaltleitung in Brauweiler.

#### 4. FORSCHUNGS- UND ENTWICKLUNGSARBEITEN

Die rasch voranschreitende Entwicklung der Informationstechnik gestattet in zunehmendem Maß sowohl die Realisierung komplexer dezentraler Regelungs- und Steuerungsmechanismen als auch deren Koordinierung unter eine zentrale Netzführungsstrategie. Dadurch ist es möglich, angemessen auf die sich verändernden Randbedingungen,

- Zwang zum rationelleren Energieeinsatz und damit zur umweltschonenden Verwendung vorhandener Ressourcen,
- zunehmender Begrenzung beim Ausbau der Kapazitäten von Erzeugung und Übertragung bei gleichzeitiger Forderung nach einem liberalisierten Netzbetrieb,
- stetig steigender Anforderungen der Verbraucher an die Spannungsqualität und die Frequenzstabilität,

bei der Bereitstellung elektrischer Energie zu reagieren. Hier gilt es neben der Weiterentwicklung traditioneller Lösungsansätze insbesondere auch neue Informationsverarbeitungstechnologien zur Lösung energietechnischer Aufgabenstellungen heranzuziehen. So konnten eine Reihe von Vorhaben zum Einsatz künstlicher neuronaler Netze und der Fuzzy-Logic erfolgreich vorangetrieben werden. Insbesondere die entwicklungsorientierten Vorhaben wurden dabei in enger Kooperation mit dem Zentrum für Expertensysteme Dortmund e.V. (ZEDO) durchgeführt.

Einen weiteren Schwerpunkt in den Arbeiten des Lehrstuhls bildet die innovative Energieumwandlung und -speicherung. Die systemtechnische Betrachtung der Integration verteilter Energieerzeugungsanlagen sowie des Einsatzes von Speichern unter betrieblichen wie wirtschaftlichen Aspekten liefert Erkenntnisse, inwieweit diese Betriebsmittel einen Beitrag zur Erfüllung der steigenden Anforderungen an die Energieversorgung leisten können. Die betreffenden Projekte werden in Zusammenarbeit mit dem neu errichteten Institut für innovative Energieumwandlung und -speicherung in Gelsenkirchen (ZEUS) durchgeführt.

Die in diesem Jahresbericht beschriebenen Arbeiten sind zur besseren Übersicht in die folgenden drei Bereiche untergliedert:

1. Software-Entwicklung für die Betriebsführung und Planung elektrischer Energieversorgungssysteme.
2. Modellierung und Simulation statischer und dynamischer Vorgänge in elektrischen Energieversorgungssystemen.
3. Schutz- und Leittechnik.

Die Ausführungen sind Kurzbeschreibungen der durchgeführten Projekte und zeigen in knapper Form Problemstellungen und erzielte Ergebnisse auf. Zu den einzelnen Projektbeschreibungen werden die zuständigen Mitarbeiter genannt sowie die weiterführenden, ausführlichen Berichte angegeben.

#### 4.1 Software-Entwicklung für die Betriebsführung und Planung elektrischer Energieversorgungssysteme

##### 4.1.1 Berücksichtigung von Energiespeichern in der Kraftwerkseinsatzplanung

Im Bereich der Kraftwerkseinsatzplanung stellt die Speicherbewirtschaftung, insbesondere in hydrothermischen Systemen mit einem hohen Wasserkraftanteil, eine wichtige Betriebs- und Planungsaufgabe dar. Für Erzeugungsparks mit großem Wasserkraftanteil aus Laufwasser bzw. Speicherbecken mit natürlichem Zulauf ergibt sich hierbei oft ein komplexes, stochastisches Optimierungsproblem. Im allgemeinen gewinnen die stochastischen Einflußfaktoren mit wachsendem Planungszeithorizont in der Optimierungsproblematik an Gewicht.

Für die kurzfristige Speicherbewirtschaftung im Zeitbereich eines Tages bis zu einer Woche bietet sich eine deterministische Formulierung der Optimierungsaufgabe an, da hierdurch eine erhöhte Modellgenauigkeit gegenüber der stochastischen Formulierung erzielt werden kann. Als Randbedingungen werden dabei der Speicherfüllstand zum Optimierungsbeginn sowie der gewünschte Füllstand zum Optimierungsende vorgegeben. Die natürlichen Zuflüsse gehen dabei als Prognosewerte zusätzlich mit in die Berechnung ein.

Die Optimierungsaufgabe der Speicherbewirtschaftung darf nicht entkoppelt von der Optimierung des thermischen Teils des Erzeugungsparks erfolgen. Bei der Betrachtung der Kostenstruktur von Speichern sind in erster Linie keine optimierungsfähigen Kosten zu erkennen, die analog den Brennstoffkosten thermischer Kraftwerke sind. Die Kosten für die Speicherenergie ergeben sich als Fixkosten für die Errichtung, Personal, Wartung, usw. Trotzdem ist es leicht ersichtlich, daß die Speicherenergie eine kostenmäßige Gewichtung, ähnlich den Arbeitspreisen bei thermischer Erzeugung, erfahren muß. Nur durch eine solche kostenmäßige Gewichtung kann die Entscheidung bzgl. des Einsatzes von Speicherenergie durch Vergleich mit den aktuellen Zuwachskosten der thermischen Blöcke erfolgen.

Die Forderung nach einer kostenmäßigen Bewertung von Speicherenergie muß in das mathematische Modell zur Berücksichtigung von Energiespeichern einfließen. Hierbei wird ein universelles Modell verwendet, das für verschiedene Sonderfälle geeignet ist. Das Modell beinhaltet Pumpspeicherkraftwerke ebenso wie Wasserkraftwerke mit ausschließlich natürlichem Zulauf. Für den erstgenannten Speichertyp wird hierzu die externe Aufladung (natürlicher Zufluß bei Hydrospeichern) zu Null gesetzt. Für Speicherkraftwerke mit ausschließlich natürlichem Zulauf wird in dem Modell der Betriebsmodus des Pumpens bzw. Ladens des Speichers nicht zugelassen.

Das mathematische Modell des Speichers beinhaltet die nichtlineare Ladezustandsänderung  $\Delta h$  in Abhängigkeit von der an das elektrische Netz abgegebenen Leistung wie in Bild 4.1 dargestellt. Die Ladezustandsänderung ist in erster Linie eine Funktion vom Pumpen- bzw. Generatorwirkungsgrad.

Der Pump- bzw. Ladebetrieb wird durch negative Einspeiseleistung berücksichtigt, wobei  $p^{\text{pump},k}$  die  $k$  unterschiedlichen diskreten Pumpleistungsstufen bei Pumpspeicherkraftwerken darstellt. Für moderne umrichter gespeiste Pumpmotoren entfällt die Bedingung nach diskreten Pumpleistungen. Hier wird der Pumpbetrieb innerhalb eines kontinuierlichen Leistungsbandes dargestellt. Neben der Abhängigkeit des Speicherwirkungsgrades von der Höhe der abgegebenen Leistung kann die Abhängigkeit von dem Füllstand des Speichers durch Diskretisierung für verschiedene Speicherfüllstände in dem Modell berücksichtigt werden. Die minimale und maximale Ladekapazität  $h^{\text{min}}$

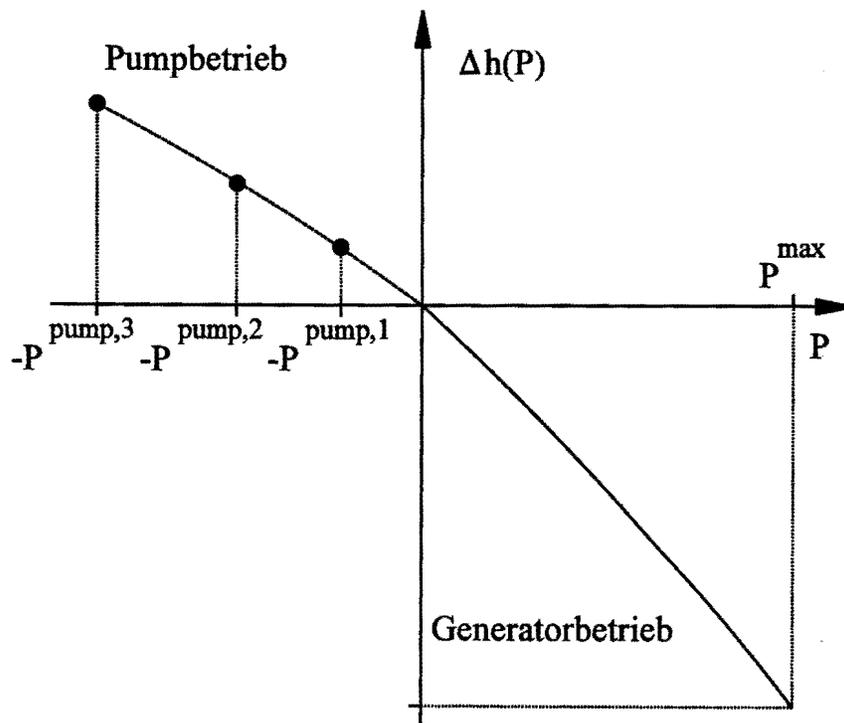
bzw.  $h^{\max}$  des Speichers wird durch die folgende Nebenbedingung berücksichtigt:

$$h^{\min} \leq h^{\text{start}} + \sum_{\vartheta=1}^t (\Delta h(P_{\vartheta}) + h_{\vartheta}^{\text{zulauf}}) \leq h^{\max}, \quad \forall t = 1 \dots T-1$$

wobei  $h^{\text{start}}$  den Füllstand zu Optimierungsbeginn und  $h_{\vartheta}^{\text{zulauf}}$  die natürliche Aufladung während des Zeitschritts  $\vartheta$  kennzeichnet. Die Bedingung muß für alle Zeitschritte  $t$  des Optimierungshorizonts erfüllt sein. Zum Ende des Optimierungszeitraums muß der geplante Zielfüllstand  $h^{\text{ende}}$  erreicht werden. Die hierfür berücksichtigte Bilanzbedingung lautet:

$$\sum_{\vartheta=1}^T (\Delta h(P_{\vartheta}) + h_{\vartheta}^{\text{zulauf}}) = h^{\text{ende}} - h^{\text{start}}$$

Das beschriebene Optimierungsmodell für Speicher wird bei der Lösung der Optimierungsaufgabe im Rahmen der kurzfristigen Einsatzplanung mit Hilfe der Lagrange Relaxation berücksichtigt, indem die Bilanzbedingung nach Vormultiplikation mit einem Lagrange-Faktor zu der Lagrange-Funktion des restlichen Erzeugungssystems hinzugefügt wird. Der dabei verwendete, vormultiplizierte Lagrange-Faktor wird auch "Wasserbewertungsfaktor" genannt und ergibt sich als Ergebnis der Optimierungsrechnung. Er stellt die kostenmäßige Bewertung der Speicherenergie unter Berücksichti-

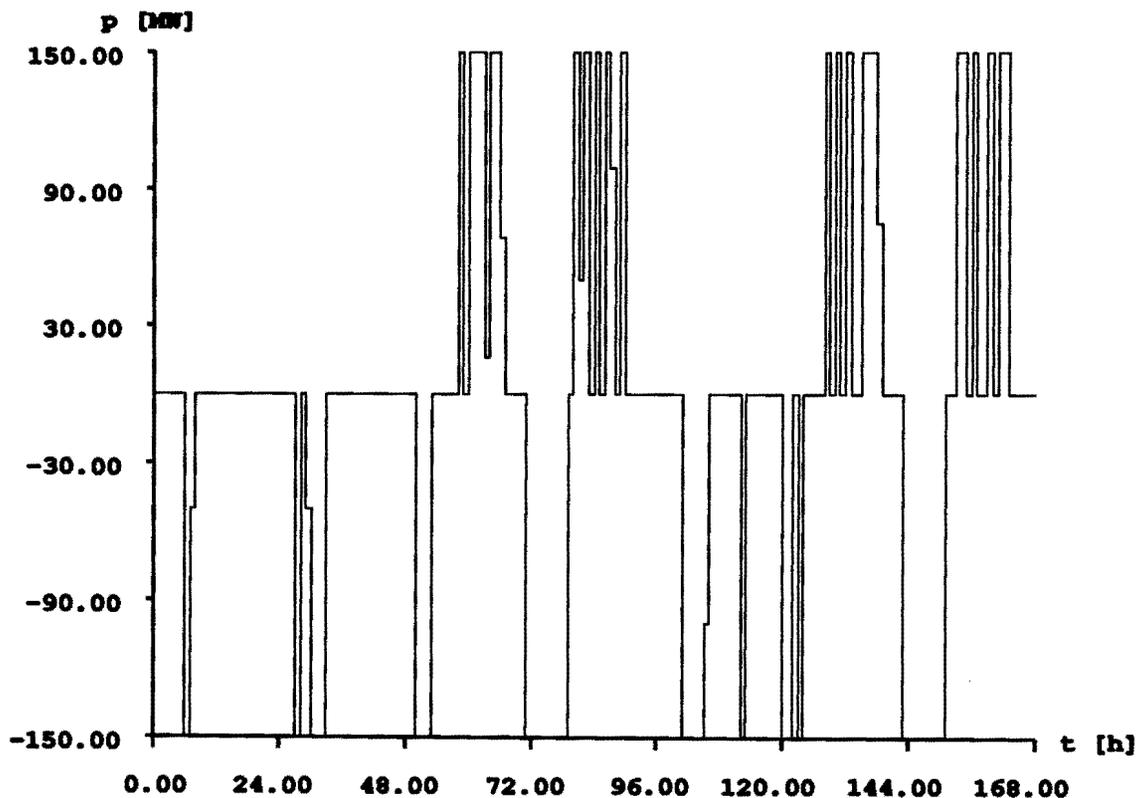


**Bild 4.1:** Ladezustandsänderung in Abhängigkeit der abgegebenen Leistung

gung des gewünschten Endfüllzustandes des Speichers und der Zulaufprognose sowie der thermischen Erzeugung und der Lastprognose dar. Neben der damit möglichen Entscheidung über den Speichereinsatz gegenüber thermischer Erzeugung kann er auch als Koordinierungsgröße für unterlagerte Funktionsblöcke der Optimierung, insbesondere der Momentanoptimierung, herangezogen werden.

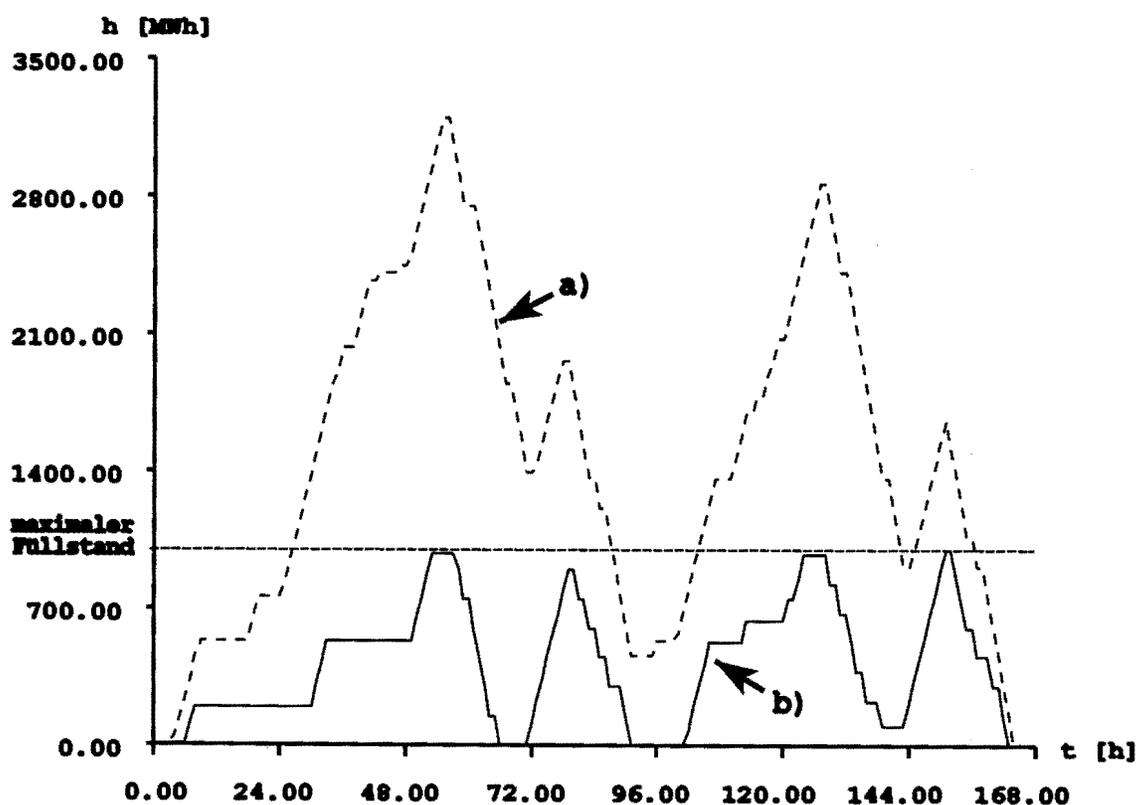
Bei der Formulierung der Optimierungsaufgabe mit Hilfe der Lagrange Relaxation ist eine Dekomposition in blockspezifische, entkoppelte Unterprobleme möglich. Jeder berücksichtigte Speicher stellt ein solches Unterproblem dar. Bei der Unterproblemlösung werden die Grenzbedingungen für die Speicher berücksichtigt. Die Lösung der entkoppelten Unterprobleme für Speicher kann effektiv und schnell mit Hilfe der Dynamischen Programmierung erfolgen, wobei sich die zulässigen Zustände zu einem Zeitpunkt aus den diskretisierten Ladezuständen des Speichers ergeben. Hierdurch kann der Einfluß des Speicherfüllstands auf den Speicherwirkungsgrad nachgebildet werden.

Der ermittelte Speichereinsatz eines 150-MW-Pumpspeicherkraftwerks für einen Erzeugungspark mit ca. 4000 MW installierter Kraftwerksleistung für eine Woche ist im Bild 4.2 dargestellt.



**Bild 4.2:** Zeitlicher Verlauf der eingespeisten Leistung eines 150-MW-Pumpspeicherkraftwerks mit 75% Wirkungsgrad

Der Einsatz des Pumpspeicherkraftwerks lehnt sich dabei an den Verlauf der Zuwachskostenkurve über der Zeit an. Zu den Zeitpunkten niedriger Zuwachskosten, das sind hier die ersten 48 Stunden (Wochenende), die Nachtstunden sowie ein Feiertag in der Mitte der Woche, wird der Speicher im Lademodus betrieben. Während den Spitzenlastzeiten, also Zeitpunkten mit hohen Zuwachskosten, wird der Speicher entladen. Daß der Speicher nicht während der gesamten Schwachlastzeit geladen und während der gesamten Spitzenlastzeit entladen wird, liegt in einer begrenzten Speicherkapazität von 1000 MWh begründet. In Bild 4.3 ist hierzu der Verlauf der Ladezustandstrajektorie für die beiden Fälle der Berücksichtigung der begrenzten Speicherkapazität und einer als beliebig groß angenommenen Kapazität dargestellt. Ist die Speicherkapazität nicht begrenzt, so wird der Speicher erwartungsgemäß fast während der gesamten Schwach- und Spitzenlastzeit eingesetzt.



**Bild 4.3:** Ladezustandstrajektorien des Speichers über der Zeit, a) ohne, b) mit Berücksichtigung einer begrenzten Speicherkapazität

Die Ergebnisse belegen die Anwendbarkeit des Speichermodells für den Typ des Pumpspeicherkraftwerks. Analoge Ergebnisse lassen sich für Speicherkraftwerke mit ausschließlich natürlichem Zufluß erzielen.

J. Handke

EV 9402, EV 9411

#### 4.1.2 Objektorientierte Konzepte in der Netzberechnung

Standardisierungsbemühungen unterschiedlicher Gremien und die Etablierung von de-facto-Standards in den Bereichen Betriebssysteme (POSIX-Schnittstelle), Programmiersprachen (ANSI-C, FORTRAN77/90), Rechnerkommunikation (ISO/OSI-Modell, TCP/IP), Datenbanken (SQL-Schnittstelle), Grafik- und Fenstersysteme (X-Window-System, OSF/Motif) haben in den letzten Jahren zu erheblichen Fortschritten in puncto *Portabilität, Interkonnektivität und Interoperabilität* geführt. In Verbindung mit der hohen Leistungsfähigkeit moderner Rechnerhardware sind damit die Voraussetzungen für die Entwicklung von offenen, nicht-proprietären Netzleitsystemen gegeben. Dies ermöglicht einen evolutionären Ansatz, bei dem sowohl Hard- als auch Softwarekomponenten ausgetauscht und neue Komponenten nach und nach hinzugefügt werden können - und damit eine stufenweise Erneuerung eines Netzleitsystems statt der Kompletterneuerung nach 10-15 Jahren.

Die Anforderungen an die Netzleittechnik-Software ändern sich im Laufe der Zeit. Zum einen liegt dies im Wunsch nach neuer oder erweiterter Funktionalität und größerer Benutzerfreundlichkeit begründet, zum anderen auch in Änderungen und Erweiterungen des Energieversorgungssystems selbst. Neben den oben genannten Forderungen (Portabilität usw.) ist daher die *Flexibilität, Erweiterbarkeit und Wartbarkeit* der Software von großer Bedeutung. Die für die traditionelle Softwareentwicklung charakteristische Trennung zwischen passiven Daten einerseits und Funktionen, die Operationen auf diesen Daten ausführen andererseits, erweist sich im Hinblick auf die genannten Forderungen als problematisch, da insbesondere bei großen, komplexen Systemen Änderun-

gen des Datenmodells oder einzelner Programmteile zu schwer überschaubaren Seiteneffekten führen können. Die *Wiederverwendbarkeit* von Softwarekomponenten, die aufgrund steigender Entwicklungskosten in hohem Maße angestrebt werden muß, ist nur begrenzt möglich oder sinnvoll, da oftmals nur schwer entschieden werden kann, ob eine existierende Implementierung in eine neue Systemumgebung paßt. In den meisten Fällen ist die Anpassung zudem aufwendiger als eine Neuentwicklung.

Zur Überwindung der genannten Probleme bietet die objektorientierte (OO) Softwaretechnologie eine Reihe von Konzepten, wobei gerade die Wiederverwendbarkeit und die Erweiterbarkeit zu den Stärken der Objektorientierung gehören. Als weitere Vorteile werden in der Literatur genannt:

- kürzere Entwicklungszeiten
- verbesserte Software-Qualität
- leichtere Wartbarkeit
- "natürlichere" Modellierung

Diesen Vorteilen stehen in der Regel Effizienzverluste bezüglich der Rechenzeit und des Speicherplatzbedarfs der mit OO-Technologie entwickelten Software gegenüber. Dies wird jedoch durch die stetig steigende Rechenleistung und fallende Speicherpreise mehr als aufgewogen. Als weitere Hemmnisse beim Einsatz der Objektorientierung lassen sich die für den in prozeduralen Bezügen denkenden Entwickler zunächst ungewohnte Herangehensweise beim Entwurf eines Programmsystems und die Komplexität der durch zusätzliche Sprachkonstrukte teilweise stark erweiterten OO-Programmiersprachen nennen. Die sich daraus ergebenden längeren Einarbeitungszeiten der nicht mit OO-Technologie vertrauten Mitarbeiter müssen bei der Planung eines Software-Projekts berücksichtigt werden.

Am Beispiel eines im Rahmen dieses Forschungsvorhabens entwickelten Objektmodells für ein Energieversorgungssystem, sollen im folgenden die wichtigsten Konzepte der Objektorientierung und die sich daraus ergebenden Vorteile kurz dargestellt werden.

Der Entwurf eines Objektmodells beginnt mit der Analyse, bei der die für den Problembereich relevanten *Objekt-Klassen* identifiziert und ihre Beziehungen zueinander definiert werden müssen. Für ein Energieversorgungssystem erhält man dabei ein Objektmodell, dessen Klassen mit den für die Anwendung interessierenden Komponenten aus der realen Welt korrespondieren. Eine Klasse kann man sich als eine Schablone vorstellen, nach deren Muster die Objekte (Instanzen) erzeugt werden. Sie enthält *Attribute*, die den Zustand eines Objektes beschreiben und *Operationen*, die das Verhalten definieren. Bild 4.4 zeigt das Klassendiagramm der Klasse *LEITUNG*, wobei hier, wie auch im folgenden Bild, die grafische Notation der Object Modeling Technique (OMT) verwendet wird.

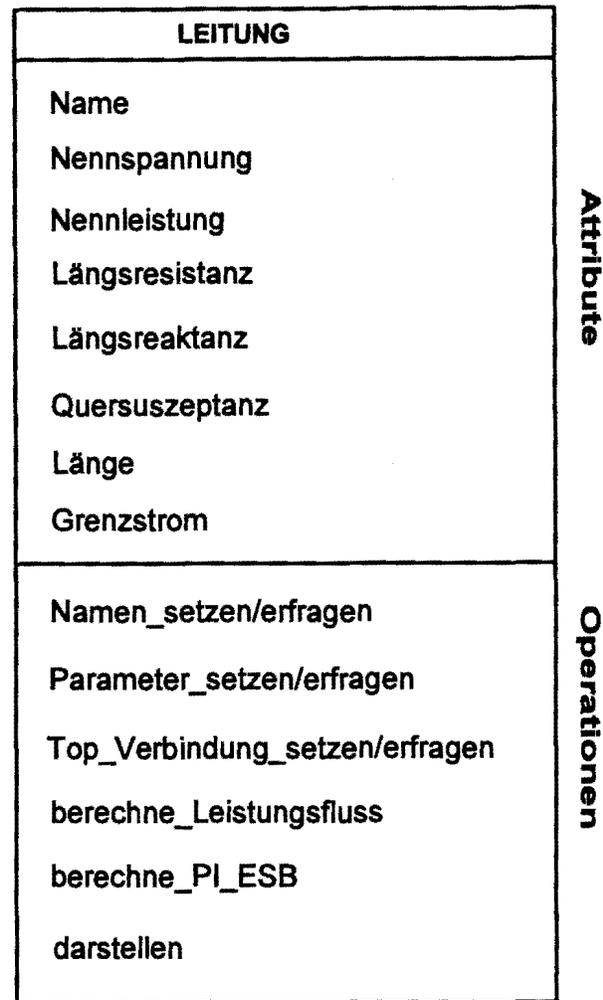
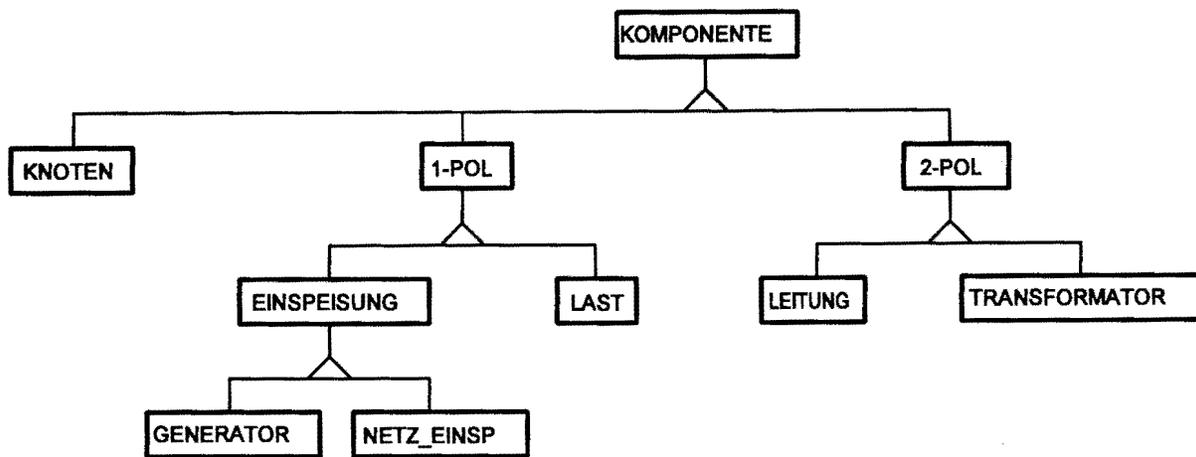


Bild 4.4: Klassendiagramm einer Leitung

Der nächste Schritt ist die *Generalisierung* gemeinsamer Eigenschaften zu *Oberklassen*, bzw. die *Spezialisierung* einer Klasse in einer *Unterklasse*. Das Ergebnis ist die in Bild 4.5 dargestellte Klassenhierarchie des Netzdatenmodells. Die Klassen *LEITUNG* und *TRANSFORMATOR* wurden dabei generalisiert zur Oberklasse *2-POL*, die selbst wiederum eine Spezialisierung der Klasse *KOMPONENTE* darstellt. Die Klasse *LEITUNG* erbt also alle Attribute und Operationen der Klassen *KOMPONENTE* und *2-POL* und definiert eigene, für diese Klasse spezifische Attribute und Operationen. *KOMPONENTE* und *2-POL* sind Beispiele für *abstrakte Klassen*, zu denen kein Gegenstück in der realen Welt existiert, während *LEITUNG* und *TRANSFORMATOR* *konkrete Klassen* sind, von denen Objekt-Instanzen gebildet werden können.



**Bild 4.5:** Klassenhierarchie des Netzdatenmodells

Die Attribute eines Objektes können nur über die für das Objekt definierten Operationen manipuliert werden, ein direkter Zugriff ist nicht möglich. Diese Eigenschaft wird *Kapselung* genannt und sorgt dafür, daß die Benutzung eines Objektes unabhängig ist von der internen Repräsentation.

Eine Operation wird durch das Senden einer *Nachricht* an ein Objekt aktiviert. Diese Nachricht kann Parameter enthalten, die der Operation übergeben werden. Ein Objekt kann ebenfalls Werte als Ergebnis einer Operation zurückgeben. Wie bereits erwähnt, erbt eine Klasse alle Operationen ihrer Oberklasse. Durch die Definition eigener *Methoden* für geerbte Operationen ist es möglich, die Reaktion eines Objektes auf bestimmte Nachrichten zu verändern bzw. zu erweitern. Dem Sender der Nachricht bleibt es verborgen, *wie* die entsprechende Operation ausgeführt wird, er spezifiziert lediglich, *was* getan werden soll. Diese Eigenschaft, die als *Polymorphismus* bezeichnet wird, gewährleistet eine einheitliche Kommunikation mit und zwischen den Objekten, ohne die genaue Klasse eines Objektes berücksichtigen zu müssen. Sendet man beispielsweise die Nachricht "berechne Leistungsfluß" an ein Objekt, so gibt das entsprechende Objekt in Abhängigkeit von den Spannungen in den angrenzenden Knoten und den spezifischen elektrischen Parametern des Elementes, die Wirk- und Blindleistung zurück, die an den Polen der entsprechenden Netzkomponente eingespeist wird. Auf

diese Weise können die Leistungsflüsse über sämtliche Elemente unabhängig vom Elementtyp (Leitung, Transformator usw.) bestimmt werden.

Wird das Objektmodell um neue Klassen erweitert, so brauchen die Programme, die diese Objekt-Datenbasis verwenden, nicht modifiziert zu werden; es muß lediglich sichergestellt sein, daß die neu hinzugefügten Objektklassen auf die bereits existierenden Nachrichten definitionsgemäß reagieren. Das gleiche gilt bei Änderungen der internen Parameter einer vorhandenen Klasse, beispielsweise um die Genauigkeit der Modellierung durch das Hinzufügen zusätzlicher Attribute zu verbessern. Aufgrund der strengen Kapselung bleiben derartige Änderungen lokal auf die betroffene Klasse beschränkt. Der Vererbungsmechanismus sorgt in diesem Fall dafür, daß die vorgenommenen Änderungen auch bei gegebenenfalls vorhandenen Unterklassen zum Tragen kommen - das Datenmodell bleibt daher in sich konsistent.

Somit sind Erweiterungen und Änderungen des Datenmodells durch die konsequente Anwendung objektorientierter Konzepte ohne Rückwirkungen auf die umgebende Software möglich. Das Vererbungskonzept erleichtert ebenfalls die Wiederverwendung vorhandener Komponenten und hilft, Code-Redundanz zu vermeiden. Damit wird sowohl die Entwicklungszeit reduziert als auch die Qualität der Software erhöht, wenn auf bereits ausgetestete Klassenbibliotheken zurückgegriffen wird.

Basierend auf diesem Objektmodell wurde ein Programmpaket für die stationäre Netzberechnung (Lastfluß, Kurzschluß) sowie ein Grafiksystem für die Netzbildanzeige und die Darstellung der Berechnungsergebnisse entwickelt. Für dieses Grafiksystem wurde eine Klassenbibliothek entwickelt, mit deren Hilfe beliebige Ausgabegeräte angesprochen werden können. Auf diese Weise konnte das Programm auf verschiedene Grafikplattformen (X11, MS-Windows, OS/2) portiert werden und ermöglicht zudem die Ausgabe des Netzbildes auf einem Plotter.

Aus projektspezifischen Gründen (u.a. Portabilität) erfolgte die Implementierung dieser Programme und Klassenbibliotheken in der Programmiersprache ANSI-C. Da objektorientierte Programmierung von ANSI-C nicht explizit unterstützt wird, wurden OO-Konzepte wie Vererbung und Polymorphismus durch spezielle Programmierkonventionen realisiert. Von vielen Autoren objektorientierter Methodiken wird betont, daß ein objektorientiertes Software-Design auch dann nützlich ist, wenn keine OO-Sprache

eingesetzt werden kann, da OO-Konzepte immer in nicht-objektorientierte Sprachen übertragen werden können.

M. Heine

EV 9415

#### 4.1.3 Meldungsverarbeitung mit betriebsmittelorientierten Künstlichen Neuronalen Netzen

Die Meldungsverarbeitung und Fehlerortung in elektrischen Energieversorgungsnetzen (EES) ist Grundlage für eine schnelle Aufklärung und Beseitigung von Fehlern. Aufgrund fehlerhafter Reaktionen des Schutzsystems, Störungen bei der Datenübertragung oder nicht vollständig überwachter Netzbezirke kann es zu unvollständigen und widersprüchlichen Meldungsmustern kommen, die eine Anwendung von konventionellen Methoden erschweren. Heutzutage ist es zumeist die Aufgabe des Netzleitenden, die einkommenden Meldungen zu analysieren, die Fehlerursache zu erkennen und geeignete Maßnahmen zur Störungsbehebung und Wiederversorgung einzuleiten.

Die Erweiterung eines Netzleitsystems um eine effektive Meldungsverarbeitung entlastet den Netzleitenden von der Analyse des gestörten Netzzustands und erlaubt ihm, seine Aufmerksamkeit auf die Auswahl geeigneter Maßnahmen zur Störungsbehebung zu richten, um eine schnelle Wiederversorgung der Verbraucher zu erreichen. Weiterhin wird die Gefahr der Fehlerausweitung durch eine Fehlinterpretation des Meldungssehers reduziert.

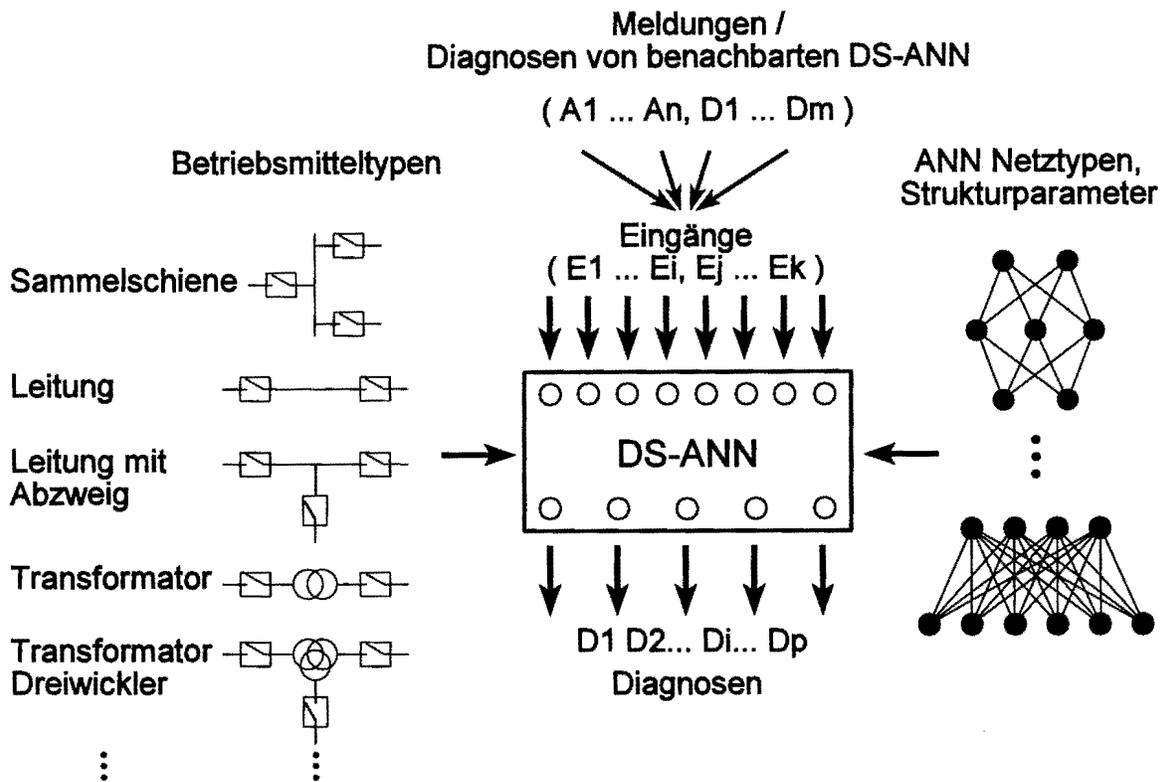
Zur Lösung dieses Problems bieten sich Künstliche Neuronale Netze (artificial neural networks, ANN) an, die sich aufgrund ihrer Struktur besonders gut zur Verarbeitung von verrauschten Eingangsgrößen und von großen Datenmengen eignen. Die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens entwickelte betriebsmittelorientierte Strukturierung von ANN gewährleistet eine flexible Anpassung an Topologieänderungen des EES und reduziert die Anzahl der Trainingsdaten im Vergleich zu Lösungsansätzen mit nicht vorstrukturierten ANN. Für jedes Betriebsmittel (Leitung, Sammelschiene, Generator, Transformator etc.) wird ein spezifisches ANN (DS-ANN, device specific ANN)

entwickelt, das mit topologieunabhängigen Datensätzen trainiert werden kann. Die Eingabeinformation für ein DS-ANN besteht aus Anrege- und Auslösemeldungen von Schutzgeräten, Schalterfallmeldungen, die sich auf den betrachteten Betriebsmitteltypen beziehen, und aus Diagnosen von DS-ANN benachbarter Betriebsmittel. Diagnosen, die von einem DS-ANN über ein Betriebsmittel ermittelt werden, sind z.B.:

- Betriebsmittel ist Fehlerort / nicht Fehlerort,
- Betriebsmittel gehört zu einem Fehlergebiet,
- Entfernung des Fehlers vom Betriebsmittel aus gesehen (Staffelzone),
- Zuordnung des Betriebsmittels zu einer Fehlerklasse.

Die Verschaltung der DS-ANN untereinander ergibt sich aus der aktuellen Topologie des zu überwachenden EES. Nach einer Topologieänderung des EES müssen lediglich die Verbindungen zwischen den DS-ANN neu angepaßt werden. Nach Fehlereintritt werden für jedes Betriebsmittel des EES die zugeordneten Meldungen vom entsprechenden DS-ANN ausgewertet und die Diagnosen gespeichert. Die einmalige Aktivierung eines DS-ANN für jedes Betriebsmittel bildet einen Iterationsschritt. Neben den Meldungen stehen in den nachfolgenden Iterationen auch die Diagnosen aus den vorherigen Iterationen zur Auswertung zur Verfügung. Die Auswertung wird abgebrochen nachdem sich die Diagnosen der einzelnen DS-ANN nicht mehr ändern oder eine vorgegebene Anzahl von Iterationen erreicht ist. Nach der Auswertung liegen für jedes Betriebsmittel Diagnosen vor.

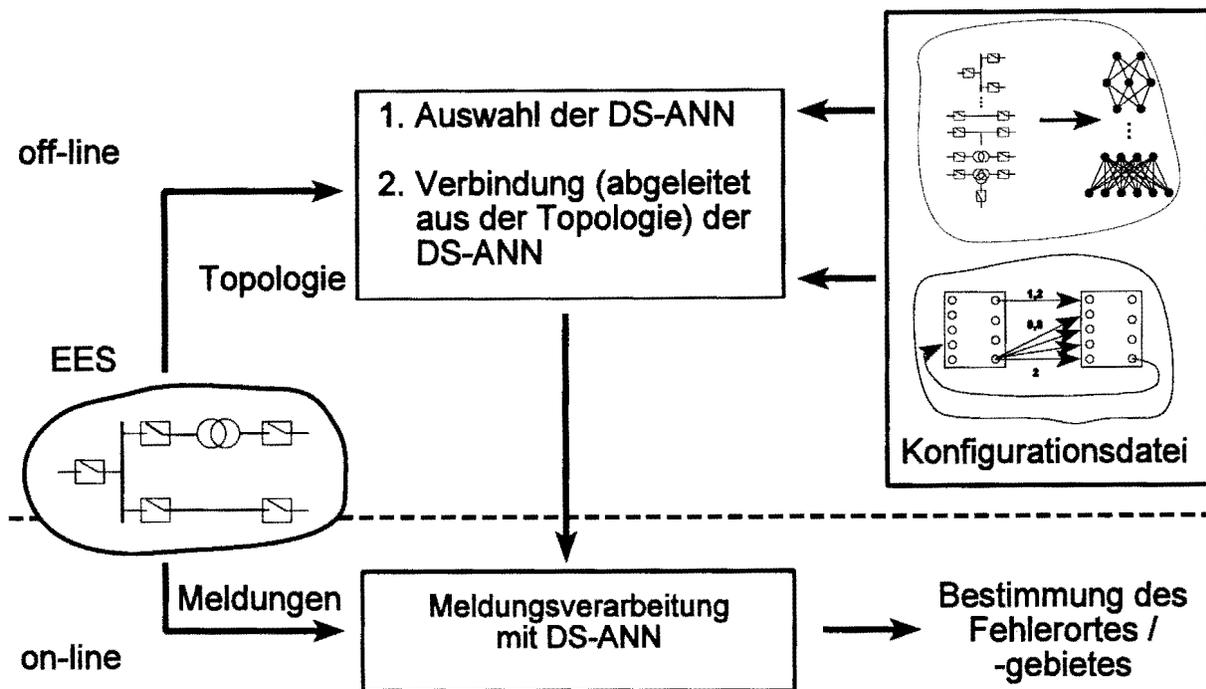
Nach Abschluß der Voruntersuchungen dieses Konzeptes mit Hilfe der mathematischen Simulationssprache MATLAB ist im Berichtszeitraum eine Test- und Trainingsumgebung für die DS-ANN entworfen und implementiert worden. Ein DS-ANN wird eindeutig beschrieben durch den Betriebsmitteltypen, die zu verwendenden zugeordneten Meldungen und Diagnosen von benachbarten DS-ANN, die Festlegung der Ausgänge, den ANN-Netztyp und die Strukturparameter des ANN (Bild 4.6).



**Bild 4.6:** Beschreibungsparameter eines DS-ANN

Die DS-ANN werden jeweils einzeln trainiert. Innerhalb der Entwicklungsumgebung sind Routinen zum Ein- und Auslesen von Trainings- und Testdaten, zur Ausgabe von Fehlerverläufen beim Trainieren der DS-ANN etc. entwickelt worden. Über eine Schnittstelle können unterschiedliche ANN-Typen und Trainingsalgorithmen eingebunden werden.

Die Programmstruktur zur Meldungsverarbeitung mit DS-ANN ist in Bild 4.7 dargestellt. Die Informationen aus der Konfigurationsdatei über die auszuwählenden DS-ANN und die potentielle Verschaltung der DS-ANN werden mit der aktuellen Topologie des EES verknüpft. Jedem Betriebsmittel des EES wird ein DS-ANN vom zugehörigen Betriebsmitteltypen zugeordnet. Nachdem das System an die aktuelle Topologie des EES angepaßt worden ist, können on-line Meldungen verarbeitet werden. Nach einer betriebsbedingten Topologieänderung des EES wird das System zur Meldungsverarbeitung off-line wieder angepaßt.



**Bild 4.7:** Konfigurierung des Systems zur Meldungsverarbeitung

Die Meldungsverarbeitung mit DS-ANN bietet die Möglichkeit, unterschiedliche EES mit verschiedenen Schutzkonzepten zu berücksichtigen, da die einzelnen DS-ANN topologieunabhängig und unter Berücksichtigung verschiedener Schutzkonzepte trainiert werden. Es werden vorab keine Informationen über die tatsächlich in einem EES installierten Schutzgeräte benötigt. Auch im Fall unvollständiger Meldungsschauer erlaubt der Austausch von Informationen zwischen den DS-ANN eine dem Informationsgehalt der Meldungen entsprechende Eingrenzung des möglichen Fehlerorts.

Die offene Architektur des Programms zur Meldungsverarbeitung mit DS-ANN ermöglicht die Anbindung unterschiedlicher ANN-Typen. Zur Zeit stehen neben den Trainings- und Ausführungsrouinen für ein Mehrschicht-Perzeptron Netz (MLP) die entsprechenden Routinen auch für ein ARTMAP (Adaptive Resonance Theory map) zur Verfügung.

Die Netze der Adaptive Resonance Theory (ART) sind rückgekoppelte Netze. Die Funktionsweise der ART-Netze basiert auf dem Aufstellen und Verwerfen von Hypothesen. Für ein neues angelegtes Eingangsmuster wird eine Hypothese über die Zugehörigkeit zu einer bereits gebildeten Klasse aufgestellt. Diese Hypothese wird in einem Ähnlichkeitstest entweder verifiziert oder verworfen. Falls die Annahme richtig

war, wird der Prototyp dieser Klasse an das Eingangsmuster angeglichen, anderenfalls wird eine neue Hypothese aufgestellt. Läßt sich keine Annahme verifizieren, wird für das Eingangsmuster eine neue Klasse angelegt. Ist die beim Entwurf des Netzes festgelegte Kapazität des Netzes erschöpft, wird das Muster ignoriert.

Die Vorteile der ART-Architektur liegen in der geringen Trainingszeit und der Fähigkeit, nach einem abgeschlossenen Trainingsvorgang neue zusätzliche Muster zu lernen ohne bisher gelernte Muster zu verdrängen. Das MLP-Netz muß grundsätzlich erneut trainiert werden, weil der Lernalgorithmus sich an dem Gesamtfehler über alle Trainingsmuster orientiert. Erste vergleichende Untersuchungen zwischen dem ARTMAP und dem MLP zeigen, daß die benötigte Zeit für die Auswertung eines Eingangsmusters bei vergleichbaren MLP-Netzen bei ca. 60% der Auswertezeit des ARTMAP-Netzes liegt. Die längere Auswertezeit des ARTMAP liegt in der komplexeren Struktur der ARTMAP-Architektur und den hierfür benötigten Berechnungen begründet.

Die vorgestellte Entwicklungsumgebung zum Trainieren und Testen der DS-ANN sowie zur Ausführung des iterativen Verarbeitungsalgorithmus zur Meldungsverarbeitung bietet die Grundlage für weiterführende Arbeiten zur Entwicklung geeigneter Trainingsszenarien für die einzelnen DS-ANN sowie zur Optimierung und Verifizierung des Gesamtsystems.

W. Hoffmann, D. Kuhlmann

EV 9431, EV 9447

Dieses Forschungsvorhaben wird im Rahmen des Verbundprojektes NEUPRO durch das Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) gefördert.

#### 4.1.4 An interior point method for state estimation with current measurements and inequality constraints

Power system state estimation for high voltage transmission networks is usually solved as a weighted least squares problem. Such a formulation enables the use of a steady-state power system model and the statistical information about measurement errors in order to produce a reliable data base for different network analysis functions. Recently an increasing interest to automation and, as a consequence, a trend to extend the state estimation function to lower voltage level networks can be observed. However, for the medium voltage networks the amount of the real-time information is very limited.

For subtransmission networks the measurement set basically consists of branch current and voltage magnitude measurements at the nodes. Also, current magnitude measurements are often made on transformers connecting loads to the transmission system. State estimation in such a situation is possible, if current and voltage measurements can be used to construct an observable network, supplying missing directional information as inequality constraints. For primary distribution systems only distribution substations (e.g. 110/10 kV) are equipped with remote measurements. At the 10 kV level, feeder currents are often the only on-line measurements. Other information can be extracted from historical data about energy consumption, customer loads and off-line current measurements, which are made by some utilities one or twice a season on distribution transformers. Limits for customers load can also be derived. For medium voltage level networks, using load modelling and prediction methods, it is possible to estimate the load (at least active) based on information about customers type and typical load curves for different types of loads. As a result, an important estimation problem for these networks is to combine various types of information, including operating limits, coming from different sources and having different level of accuracy in order to estimate the state of an electric network. In this case, the possibility to process current measurements is a necessary feature of a state estimation algorithm.

The purpose of this work is the development and investigation of the performance of a state estimation algorithm that can handle power, current and voltage measurements as well as inequality constraints, with the orientation to extend state estimation function to medium voltage level networks.

State estimation is possible, only if there are enough measurements and their placement satisfies the observability conditions. When parts of a network contain only branch current measurements, the unique solution of state estimation can be obtained, if additional information is given in one of the following ways: (i) the voltage magnitude measurements and the sign of the active power injections; (ii) the active power flow or injection measurements and the sign of the reactive power injections; (iii) the reactive power measurements and the sign of the active power injections. The difficulties concerned with lack of the directional information in current magnitude measurements restricted their use in a state estimation algorithm. Current measurements have been used primarily to increase the redundancy of the measurement system. In the case of observability extension, initialization procedure is needed to ensure proper power flow directions and to overcome gain singularity problems caused by zero currents at the flat start.

The incorporation of inequality constraints permits to avoid of most of the above mentioned problems and plays the deciding role in ensuring the unique solution of a state estimation problem with current measurements. Therefore the method permitting efficient solution of the inequality constrained estimation problem defines the basis of a state estimation algorithm that relies on current measurements. State estimation is formulated as a constrained optimization problem, and an estimation algorithm using the interior point optimization method is derived.

The main idea and features of the state estimation algorithm can be summarized as follows. The inequality constrained weighted least problem is transformed into the unconstrained optimization problem using the logarithmic barrier function. From Lagrangian of the transformed problem and the necessary conditions of the extremum the system of nonlinear equations is obtained. The solution of this system is performed using the Gauss-Newton method. The resulting state estimate is obtained by iterative solution of the system of linear equations with a positive definite matrix. Therefore, the ordering, factorization and solution can be implemented in a usual way as for conventional state estimation. However, the main difference from the conventional state estimation solution is that the weight matrix related to inequality constraints changes significantly during iterative process. Hence, the gain matrix must be re-evaluated or its factors updated every iteration.

The software implementing the inequality constrained state estimation method has been developed. The following features of the program can be mentioned: (i) it is written in C and runs on VAX and PC; (ii) full weighted least squares estimation algorithm in rectangular coordinates is implemented providing flexibility in processing different types of measurements and enabling state estimation for networks with high R/X ratio; (iii) the ability to process current measurements and inequality constraints on power injections and voltage magnitudes at the buses; (iv) the possibility to estimate transformer tap positions; (v) bad data detection and identification is based on sequential normalized residual tests. No state re-estimation is performed during bad data elimination. Directly residuals and gain factors are modified using sparse vector methods.

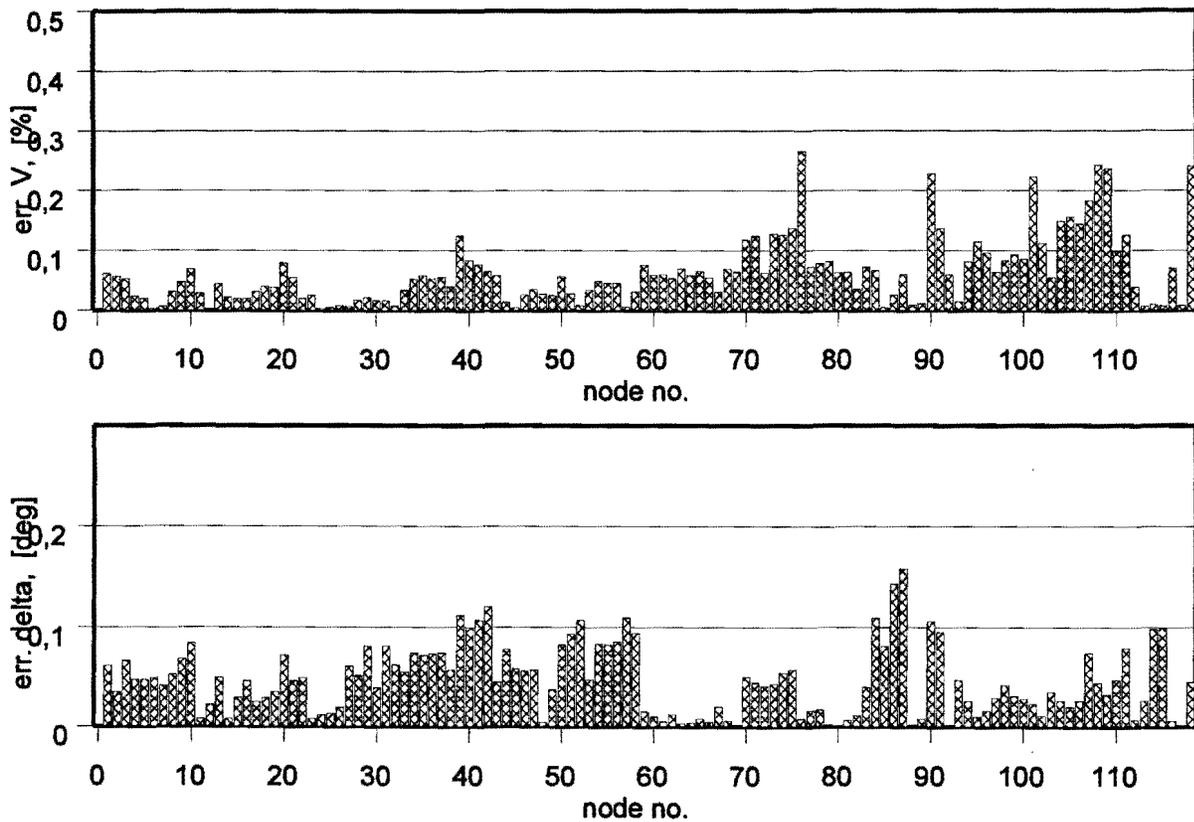


Fig. 4.8: Bus voltage estimation errors; usual measurement set: power and voltage measurements

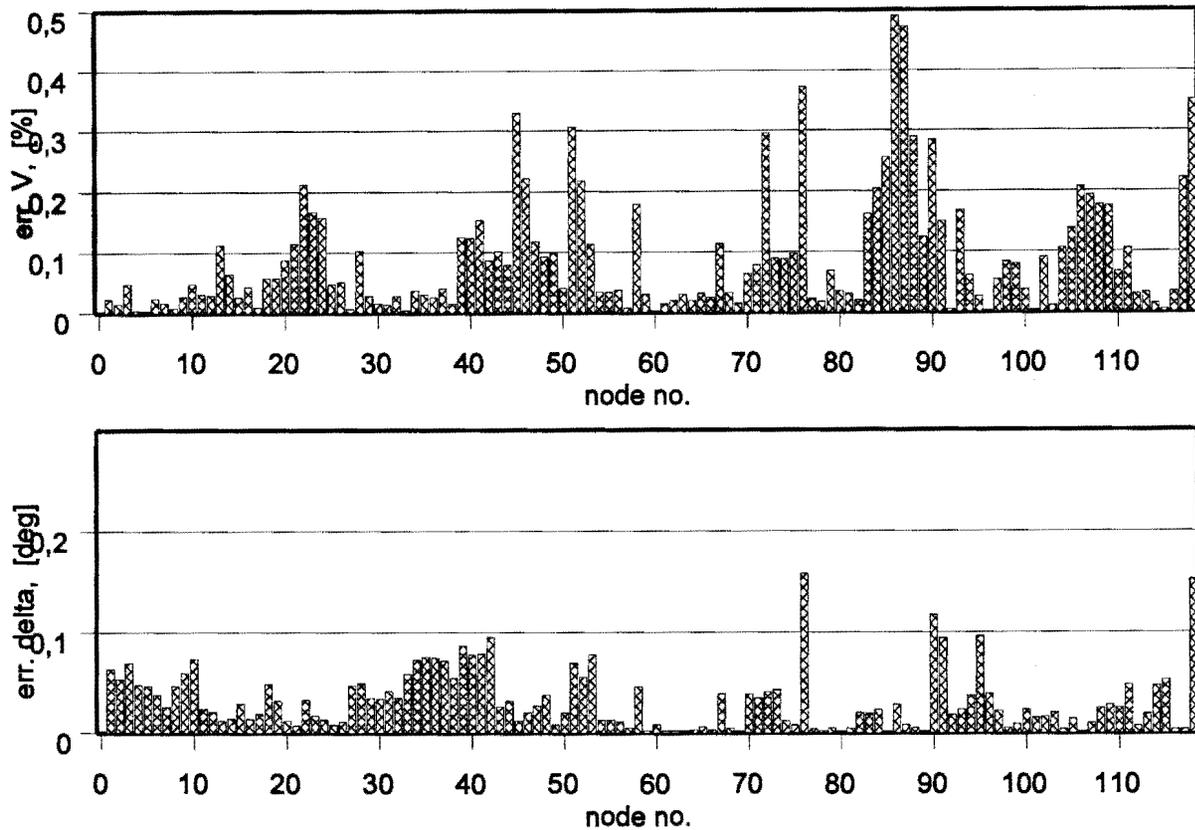


Fig. 4.9: Bus voltage estimation errors; branch current and node voltage measurements and inequality constraints

The state estimation results for the IEEE 118 system using usual measurement set and only branch current and voltage measurements at all buses are presented in fig. 4.8 and 4.9, respectively. The computational experience demonstrate that the interior point optimization algorithm is a useful numerical tool to compute the state of an electrical power system network, when inequality constraints play the essential role in ensuring the unique solution of the estimation problem. Although the current measurements are less informative than power flows or power injections, combined with voltage or power measurements and inequality constraints, they can be used to extend the observable network to lower voltage levels. The method can be used for state estimation in subtransmission and medium voltage distribution networks where on-line current magnitude measurements are available.

Also, it is expected that significant benefits could be gained from application of the constrained state estimation to external network solution. Industrial experience demonstrates the necessity to enforce the inequality constraints on some node power injections to obtain a reasonable estimate of the external network state.

#### 4.1.5 Steuerung speichernder Lasten

Elektrische Energie ist in technisch interessanten Größenordnungen kaum speicherbar. Daher ist im Energieversorgungssystem ein permanentes Gleichgewicht zwischen erzeugter und verbrauchter elektrischer Energie zwingende Voraussetzung für einen störungsfreien Betrieb. Grundsätzlich ist dieses Gleichgewicht durch Maßnahmen auf der Erzeuger- bzw. auf der Verbraucherseite herzustellen. Beide Möglichkeiten werden in der Praxis bereits erfolgreich eingesetzt. Für die Erzeugung wird der Kraftwerkseinsatzplan anhand von bekannten spezifischen Erzeugungskosten und einer Lastprognose aufgestellt. Die Steuerung der Verbraucher ist mittels der Rundsteuerung möglich.

Die Rundsteuertechnik erlaubt die Übertragung von Steuerinformationen mittels Oberschwingungen, die der Netzfrequenz überlagert werden. Dadurch kann die Steuerinformation den Kunden erreichen, ohne daß zusätzliche Steuerkabel zu installieren sind. Darüberhinaus ist es einfacher und preisgünstiger möglich, das System der Rundsteuerung auszuweiten, da die Steuerbarkeit einer Last durch einen Netzanschluß und ein geeignetes Empfangsgerät erreicht werden kann.

In vielen Energieversorgungsunternehmen wird die Optimierung zur Zeit jedoch nur auf den Kraftwerkseinsatz bezogen, d.h. man folgt mit einem Rundsteuerplan den aus der Erfahrung zu erwartenden Lastsituationen im Tagesverlauf. Die Lastführung erfolgt im wesentlichen nur aufgrund einer relativ statischen Tarifsteuerung. Üblich sind konstante Freigabedauern für einzelne Lasten, die oft nur innerhalb eines geringen zeitlichen Rahmens variieren können. Dies führt zu verhältnismäßig konstanten Steuerplänen, die oftmals auch durch moderne, leistungsfähige Zeitschaltuhren kontrolliert werden könnten. Diese Situation hat im wesentlichen zwei Ursachen. Zum einen sind die Tarifverträge in der Vergangenheit vor dem Hintergrund eines ausgeprägten Nachttals so formuliert worden, daß für den Energieverbrauch in der Nacht besondere Vergünstigungen eingeräumt wurden. Zum anderen birgt die Modellbildung und Fernsteuerung der Verbraucher nach wie vor eine gewisse Unsicherheit, da bei den vergleichsweise statischen Steuerverfahren und der geringen Anzahl an Messungen nur schwer abzuschätzen ist, welche Auswirkung die zeitliche Verschiebung einer Schalthandlung tatsächlich mit sich bringt.

Durch die wenig dynamische Nutzung der installierten Rundsteuertechnik als "hochpräzise Zeitschaltuhr" bleibt die Kapazität dieser Technik nur unzureichend ausgeschöpft. Im Rahmen des vorliegenden Projektes wird untersucht, inwieweit durch ein flexibleres Steuerverfahren bei den bereits installierten Anlagen Möglichkeiten zur Kostenoptimierung gefunden werden können. Gleichzeitig ist in die Überlegungen mit einzubeziehen, welche Probleme ein solcherart verändertes Verfahren entstehen läßt. Um die heute weitgehend von Hand vorgenommenen Optimierungen der Steuerpläne für die einzelnen Lasten zu automatisieren, soll hier ein Ansatz aus dem Bereich der "künstlichen Intelligenz" zum Einsatz kommen. Es wird mit Hilfe von genetischen Algorithmen vollautomatisch ein, bezüglich vorzugebender Kriterien, optimaler Steuerplan für eine vorgegebene Anzahl von Lasten erstellt. Hierbei wird vorausgesetzt, daß der Verlauf der nicht beeinflussbaren Lastanteile  $P_N(t)$  im Zeitbereich bekannt ist. Desweiteren wird für jede einzusetzende Last ein Modell im Form eines Kennfeldes im Zeitbereich  $P_{Lx}(t)$  angenommen. Der Gesamtlastverlauf ergibt sich hieraus wie folgt:

$$P_G(t) = P_N(t) + \sum_{x=1}^n P_{Lx}(t - t_{ein,x})$$

Hierin bezeichnet  $t$  den betrachteten Zeitpunkt und  $t_{ein,x}$  den Einschaltzeitpunkt der betreffenden Last. Für die Lasten  $P_{Lx}$  werden zu Beginn der Optimierung mit Hilfe der Monte-Carlo-Methode Ein- und Ausschaltzeiten bestimmt. Für jeden zu optimierenden Tag werden 100 verschiedene Ansätze gewählt, um den Lösungsraum möglichst umfassend abzudecken. Von dieser Population ausgehend werden Generationen und Mutationen gebildet. Dieses der Biologie nachempfundene Vorgehen gibt dem Verfahren seinen Namen (genetischer Algorithmus). Die 100 Datensätze mit den Ansätzen für einen Tag werden hierbei zuerst selektiert. Für diese Selektion werden die Tageslastganglinien gemäß obiger Formel berechnet und bewertet.

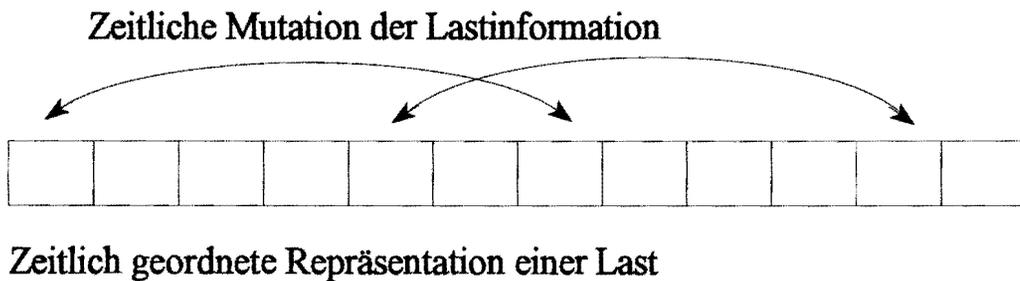
Für die Bewertung der Lastganglinien werden folgende Gütekriterien berücksichtigt:

- möglichst kleine Lastsprünge von Zeitschritt zu Zeitschritt,
- möglichst kleine Abweichung der Momentanleistung vom Tagesmittel,
- Einhaltung der Sperrzeiten,
- Einhaltung der Energiebedingung.

Die besten der so bewerteten Ansätze werden dann durch Mutations- und Generations-

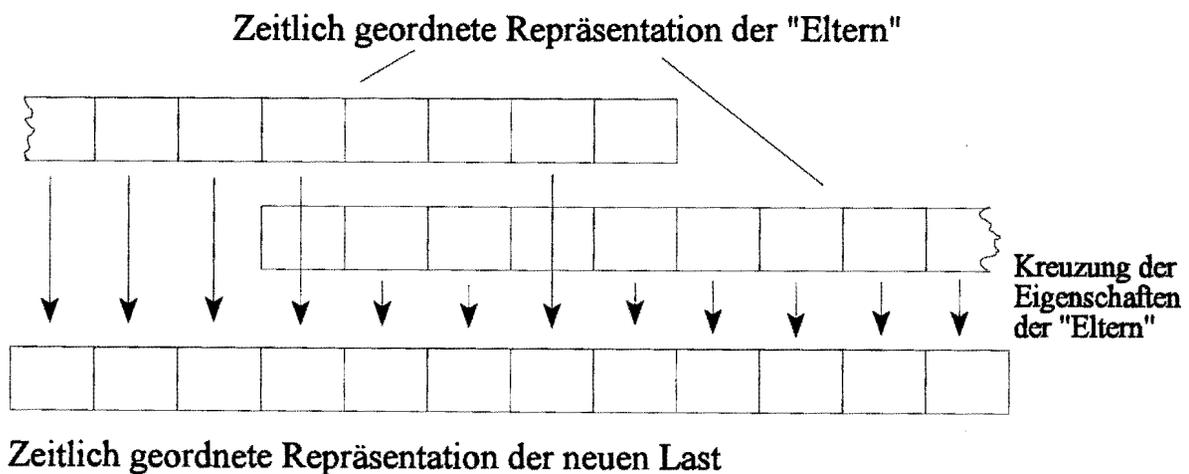
Operatoren modifiziert. Sobald sich eine Verbesserung der Güte ergibt, wird ein schlechterer Ansatz durch den verbesserten Ansatz ersetzt. Ansätze, die keine Verbesserung liefern, werden verworfen.

Die Mutationsoperation stellt eine Veränderung einer einzelnen Ansatzfunktion ohne Betrachtung einer weiteren Funktion dar. Die Parameter der Funktion werden verändert, und die Veränderung wird im Fall einer Verbesserung angewendet. Bild 4.10 zeigt eine solche Mutation.



**Bild 4.10:** Mutation

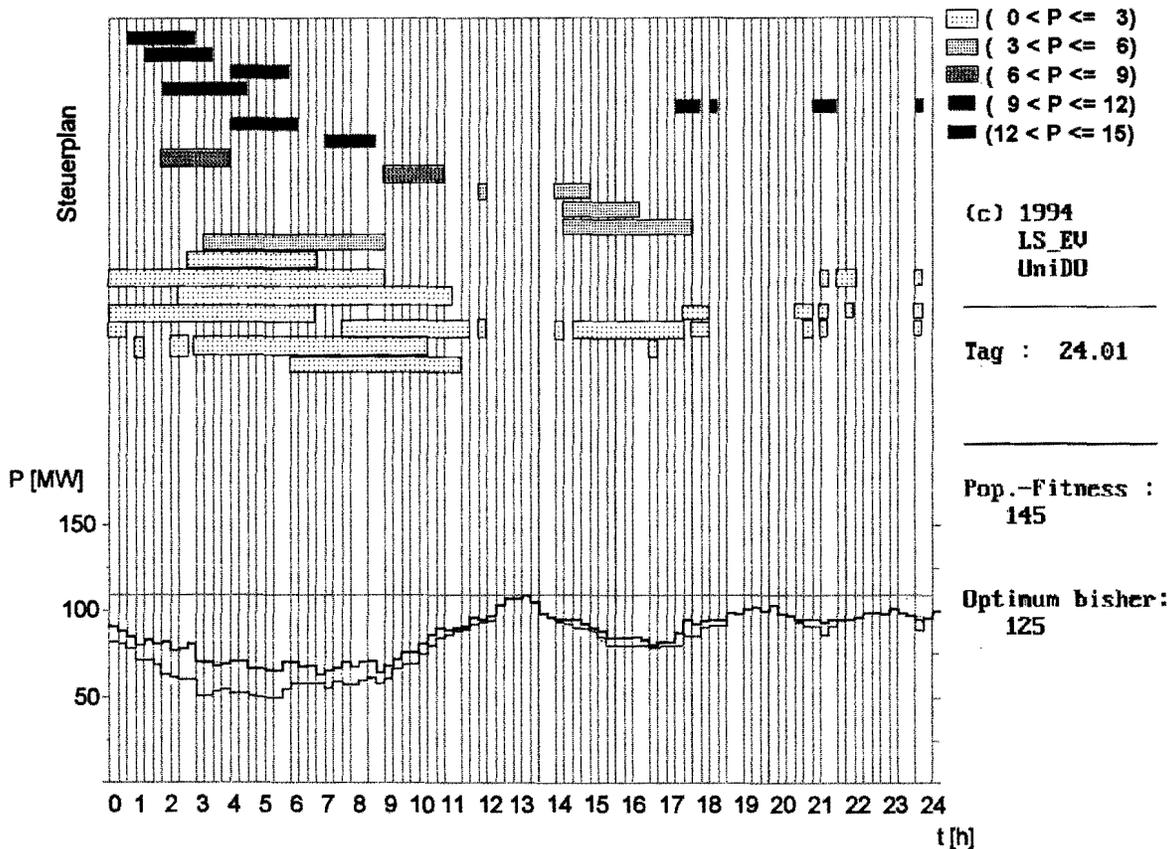
Die Generation stellt im Gegensatz dazu eine Kreuzung (Rekombination) der Information zweier Ansätze dar. Einige Parameter des einen Ansatzes werden mit Parametern des anderen Ansatzes so kombiniert, daß ein gültiger (keine Randbedingungen verletzender) neuer Ansatz entsteht. Dieser ersetzt gegebenenfalls einen schlechteren Ansatz der Population. Bild 4.11 zeigt eine Generation.



**Bild 4.11:** Generation

Im Bild 4.12 ist exemplarisch ein Tag mit seiner verteilten Last gezeigt. Die untere Kurve symbolisiert die Last  $P_N$ , die von der Lastführung z.B. durch eine Rundsteuer-

anlage nicht zu beeinflussen ist. Die darüberliegende Kurve zeigt den Lastgang  $P_G$ , der sich ergibt, wenn die fernsteuerbaren Lasten zu bestimmten Zeiten ein- und ausgeschaltet werden. Im oberen Bereich des Bildes ist der zugrundeliegende Steuerplan für die im Programm modellierten Lasten  $P_{Lx}$  gezeigt, der durch das Programm automatisch erstellt worden ist. Die nebenstehend abgebildete Legende liefert die Leistung der jeweiligen Last in MW.



**Bild 4.12:** Programm zur Verteilung steuerbarer Lasten

Der oben beschriebene Optimierungsansatz wurde auf seine Eignung zur Lösung des Lastverteilungssystems überprüft. Hierbei wurden unterschiedliche Lastmodelle zugrunde gelegt. Es hat sich gezeigt, daß die Konvergenzgeschwindigkeit und die Güte nur gering von den verwendeten Lastmodellen beeinflusst wird. Das Programm neigt jedoch auf Grund seiner Implementation dazu, die Einschaltzeiträume einzelner Lasten durch häufiges Schalten zu zergliedern. Um diesen Effekt, der je nach Anwendung erwünscht oder unerwünscht sein kann, zu kontrollieren, wurde ein Alternativansatz erarbeitet. Dieser soll als nächstes realisiert werden und in Bezug auf seine Konvergenzgeschwindigkeit und Zergliederungstendenzen mit dem bestehenden verglichen

werden. Verschiedene Bewertungskriterien werden auf ihre Eignung zur Vergleichmäßigung des Lastgangs und zur Spitzenlastreduktion überprüft.

A. J. Gaul, W. Hoffmann

EV 9418, EV 9455

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

#### 4.1.6 Optimierung der Spitzenlastanmeldung unter Berücksichtigung von betrieblichen und technischen Randbedingungen

Betriebe, die einen großen Leistungsbedarf haben, müssen in der Regel dem für sie zuständigen Elektrizitätsversorgungsunternehmen (EVU) melden, wie hoch die Maximalleistung ist, die sie in der nächsten Abrechnungsperiode beziehen wollen. Ausgegangen wird hierbei nicht von einem Momentanwert, sondern von dem Mittelwert der Leistung in 15 Minuten, dem sogenannten Viertelstundenmaximum. Je höher dieses angemeldete Leistungsmaximum ist, umso höhere Kosten entstehen dem Betrieb, da diese Leistung ständig vom EVU bereitgehalten wird. Wird das Viertelstundenmaximum nun aber zu niedrig angemeldet und überschritten, muß eine Strafzahlung geleistet werden.

In großen Industriebetrieben ist ein Maximumsrechner im Einsatz, der ständig die Leistungen der Einzelbetriebe erfaßt und den Summenmittelwert am Ende einer Viertelstunde prognostiziert. Ist dieser Wert größer als das angemeldete Viertelstundenmaximum, so erzielt der Rechner eine Reduzierung der Leistung, indem er gezielt einzelne Verbraucher abschaltet. Diese Verbraucher müssen jedoch immer so gewählt werden, daß die Abschaltung den Produktionsablauf nicht nachhaltig beeinträchtigt.

Es liegt also im Interesse des Betriebes, seinen Leistungsbedarf und damit den Maschineneinsatz in der nächsten Abrechnungsperiode so zu planen, daß einerseits keine übermäßigen Leistungsspitzen auftreten, damit eine Abschaltung vermieden werden kann. Andererseits muß aber gewährleistet sein, daß das Produktionssoll erfüllt wird. Weiterhin müssen Anforderungen an die eingesetzten Maschinen berücksichtigt

werden, wie beispielsweise minimale und maximale Betriebsdauern. Das Programmsystem PPL (Prognose und Planung des Leistungsbedarfs) gestattet es, den wahrscheinlichen Leistungsbedarf in einem Monat zu prognostizieren. Grundlage ist ein vom Benutzer einzugebender Arbeitsplan, der für jede Schicht eines Monats die Fahrweise der Verbraucher des Betriebes angibt.

### ARBEITSPLAN AUGUST 1944A

Meßstelle	MO	DI	MI	DO	FR	SA	SO	MO	DI	MI	DO	FR	SA	SO	MO	DI	MI	DO	FR	SA	SO	MO	DI	MI	DO	FR	SA	SO	MO	DI	MI	DO	FR	SA	SO
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31				
Erzeugung	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
Elektro-Ofen	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555
Hochofen 1	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
Hochofen 2	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
Hochofen 3	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
Gießhalle 1	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
Gießhalle 2	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
Mischerhalle 1	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
Mischerhalle 2	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
Verzinnung	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
Formgiesserei	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
Presswerk	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
Graugießerei		444	444	444	444	444	444	444	444	444	444	444	444	444	444	444	444	444	444	444	444	444	444	444	444	444	444	444	444	444	444	444	444	444	444
Walzwerk 1	333	223	333	333	333	333	333	333	333	333	333	333	333	333	333	333	333	333	333	333	333	333	333	333	333	333	333	333	333	333	333	333	333	333	333
Walzwerk 2	333	333	223	333	333	333	333	333	333	333	333	333	333	333	333	333	333	333	333	333	333	333	333	333	333	333	333	333	333	333	333	333	333	333	333

Bild 4.13: Beispiel für einen Arbeitsplan

Das Bild 4.13 zeigt ein Beispiel für einen Arbeitsplan. In horizontaler Richtung sind die Tage des Monats mit jeweils Fröhschicht, Spätschicht und Nachtschicht aufgetragen; in vertikaler Richtung sind die Betriebsmittel dargestellt. Im Arbeitsfeld selbst sind, durch Ziffern symbolisiert, die Betriebsmodi oder Fahrweisen der Betriebsmittel zu jeder Schicht dargestellt. Denkbare Betriebsmodi sind beispielsweise Ein- und Ausschaltzustände oder auch unterschiedliche Lastsituationen wie Vollast, Teillast oder Stillstand. Mit den einzelnen Modi sind in der Regel unterschiedliche Lastsituationen verbunden, die durch Histogramme charakterisiert werden. Sie geben an, mit welcher Wahrscheinlichkeit eine bestimmte Leistung in einem Modus aufgenommen wird. Um die in einer Schicht wahrscheinlich aufgenommene Leistung zu ermitteln, werden aus dem Arbeitsplan die für diese Schicht angegebenen Fahrweisen der Verbraucher herangezogen und die zugehörigen Histogramme mittels der diskreten Faltung miteinander verknüpft. Das resultierende Histogramm gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit eine bestimmte Leistung aufgenommen wird, wenn alle Betriebsmittel entsprechend dem Arbeitsplan betrieben werden. Aus dem Ergebnishistogramm läßt sich auch die Leistung ermitteln, die in der Schicht statistisch gesehen nicht überschritten wird. Berechnet man diese Leistungen für alle Schichten eines Monats, erhält man die Monats-

prognose, die für jede Schicht die wahrscheinliche Leistungsaufnahme angibt. In der Regel zeigt sich in dem Prognoseergebnis, daß in manchen Schichten große Leistungsreserven vorhanden sind, während in anderen Schichten eine hohe Leistung bezogen wird. Die erforderliche Anmeldung wird aber durch die Schichten mit einer hohen Leistungsaufnahme bestimmt. Aufbauend auf dem Prognosesystem PPL ist ein Verfahren entwickelt worden, welches einen gegebenen Arbeitsplan unter der Zielsetzung eines gleichmäßigen Leistungsbezugs optimiert. Eine Verbesserung soll durch das Vertauschen der in dem Arbeitsplan vorgegebenen Betriebsmodi erreicht werden. Für die Optimierung des Arbeitsplans muß demnach die Voraussetzung erfüllt sein, daß die Betriebsmodi zeitlich verschiebbar sind. Für die einzelnen Betriebsmittel und für einzelne Schichten können die folgende Randbedingungen berücksichtigt werden.

*Betriebsmittelbezogene Randbedingungen:*

- |                                    |   |
|------------------------------------|---|
| Festgelegte Schichten              | Manche Betriebsmittel müssen zu bestimmten Zeiten in dem im Arbeitsplan festgelegten Modus betrieben werden, diese Modi dürfen also nicht getauscht werden. Denkbar sind Stillstandszeiten einzelner Betriebsmittel am Wochenende.  |
| Mindest- und Maximalbetriebsdauern | Oft müssen Betriebsmittel, wenn sie in einem bestimmten Modus gefahren werden, diesen für eine gewisse Anzahl an Schichten beibehalten. Ein Beispiel hierfür wäre die Wartung einer Maschine, die sich über mindestens zwei Schichten erstreckt. Vorstellbar ist auch ein Verbraucher, der nur für die Dauer von wenigen Schichten unter Vollast betrieben werden darf. |
| Betriebsintervalle                 | Manche Betriebsmittel müssen in zeitlich festgelegten Abständen in einen bestimmten Modus versetzt werden, z.B. Maschinen, die im wöchentlichen Rhythmus zu warten sind.  |

*Schichtbezogene Randbedingungen:*

- |                                      |   |
|--------------------------------------|---|
| Vorgebbare Maximalleistungsaufnahmen | Da während der Hochtarifzeit ein höherer Strompreis zu zahlen ist, ist es wünschenswert, daß in diesen Schichten eine geringere Leistung aufgenommen wird. Für einzelne Schichten lassen sich die Leistungswerte vorgeben, die maximal bezogen werden sollen. |
|--------------------------------------|---|

Leistungsreserven Um auch Verbraucher berücksichtigen zu können, die nicht im Arbeitsplan erfaßt wurden, können für einzelne Schichten Leistungsreserven festgelegt werden. Das Optimierungsverfahren würde dann versuchen, die Modi für die betreffende Schicht so auszuwählen, daß zwischen der für die Schicht prognostizierten und der angemeldeten Leistung die genannte Reserve verfügbar ist.

Zur Vergleichmäßigung des Leistungsbezugs wurden hier zwei Verfahren entwickelt, die die Optimierung des Arbeitsplans gestatten. Beiden Verfahren gemeinsam ist, daß sie durch Neuordnen der Betriebsmodi eine bestimmte Leistungsaufnahme in einer Schicht erreichen.

Bei dem Verfahren *Routen durch Vertauschen* werden Vertauschungen von Betriebsmodi zwischen einer Schicht, in der die Leistungsaufnahme unter dem Durchschnitt liegt, und einer Schicht mit einem hohen Leistungsbezug durchgeführt. Im Bild 4.14 ist ein Ausschnitt von zehn Schichten und fünf Meßstellen aus einem Arbeitsplan gezeigt. Eine Vertauschung von Betriebsmodi soll zwischen den Schichten vier und fünf durchgeführt werden. Die Betriebsmodi der Meßstelle 1 sind in beiden Schichten gleich, hier macht eine Vertauschung keinen Sinn. Bei der zweiten Meßstelle kann jedoch der Betriebsmodus 3 der vierten Schicht mit dem Modus 1 der fünften Schicht getauscht werden. Anschließend werden die zugehörigen Histogramme herangezogen und die

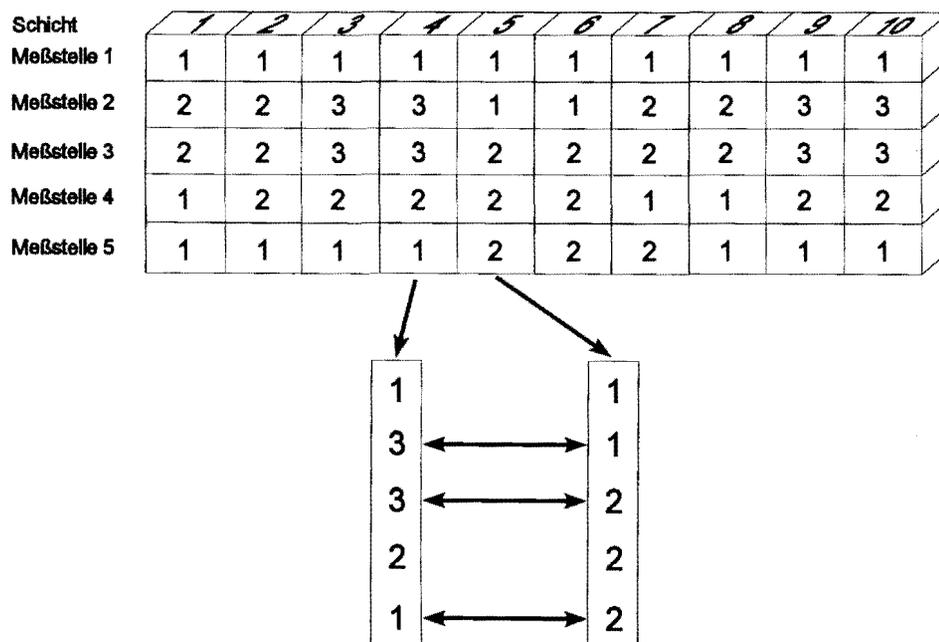


Bild 4.14: Routen durch Vertauschen

wahrscheinlichen Leistungsaufnahmen in beiden Schichten berechnet. Hat sich in beiden Schichten eine Annäherung an den Durchschnittswert ergeben, wird diese Schichtenkombination gespeichert. Auf diese Weise können alle möglichen Vertauschungen getestet werden. Das bestmögliche Ergebnis wird anschließend in den Arbeitsplan eingetragen. Führt man dieses Verfahren für alle Schichten durch, kann insgesamt eine Verringerung des Leistungsmaximums erzielt werden.

Es ist bei dieser Vorgehensweise möglich, die schichtbezogenen Randbedingungen zu berücksichtigen, da auch Leistungsannäherungen an beliebige andere Werte als den Leistungsdurchschnitt möglich sind. Es hat sich jedoch gezeigt, daß das Einbringen von Betriebsdauern und -intervallen nicht möglich ist.

Bei dem Verfahren *Routen durch Kombinieren* wird ein Arbeitsplan komplett neu erstellt, aus dem originären Arbeitsplan werden lediglich für jedes Betriebsmittel die Häufung der Modi ermittelt. Diese sind in der Tabelle 4.1 für den Arbeitsplan aus Bild 4.14 aufgetragen.

Tabelle 4.1: Häufigkeiten der Betriebsmodi bezogen auf Bild 4.14

	<b>Modus 1</b>	<b>Modus 2</b>	<b>Modus 3</b>
<b>Meßstelle 1</b>	10	0	0
<b>Meßstelle 2</b>	2	4	4
<b>Meßstelle 3</b>	0	6	4
<b>Meßstelle 4</b>	3	7	0
<b>Meßstelle 5</b>	7	3	0

Zunächst werden für jedes Betriebsmittel die links in der Tabelle stehenden Modi als erste Kombination verwendet; für die Meßstelle 3 existiert der Modus 1 nicht, daher wird Modus 2 verwendet. Es ergibt sich der folgende Vektor von Betriebsmodi: [1, 1, 2, 1, 1]. Für diesen wird jetzt die wahrscheinliche Leistungsaufnahme berechnet. Liegt sie in einem akzeptablen Intervall um die durchschnittliche Leistungsaufnahme, wird der Vektor in den Arbeitsplan eingetragen. Ist dies nicht der Fall, wird ein zweiter Vektor erstellt. Anstatt des Modus 1 der fünften Meßstelle wird jetzt der Modus 2 verwendet: [1, 1, 2, 1, 2]. Soll ein weiterer Vektor bestimmt werden, muß nun der Modus der vierten Meßstelle variiert werden: [1, 1, 2, 2, 1]. Im nächsten Schritt wird

wieder der Modus 2 der letzten Meßstelle verwendet. Ist ein Vektor gefunden worden, für den die Leistungsaufnahme in einem vorgegebenen Bereich um den Leistungsmittelwert liegt, werden die gefundenen Betriebsmodi in den Arbeitsplan eingetragen und die Tabelle dahingehend korrigiert, daß die Anzahl der noch zu vergebenden Modi vorliegt. Man erkennt, daß bei der Suche nach geeigneten Anordnungen von Betriebsmodi in jedem zweiten Schritt die Modi der letzten Meßstelle variiert werden, während die Modi der vorderen Meßstellen erst relativ spät geändert werden. Ist also ein Vektor mit einer passenden Leistungsaufnahme gefunden worden, ist die Wahrscheinlichkeit recht groß, daß die Modi der ersten Meßstellen im Suchvorgang gar nicht variiert wurden. Dieser Effekt läßt sich für die Einbeziehung betriebsmittelbezogener Randbedingungen nutzen. Möchte man, daß eine Meßstelle einen Modus bevorzugt erhält, kann man dies dadurch erreichen, daß die Positionen der Meßstellen in Tabelle 4.1 auf der Grundlage einer Prioritätsermittlung variiert werden.

Mit diesem Verfahren ist sowohl die Berücksichtigung betriebsmittelbezogener als auch schichtbezogener Randbedingungen möglich. Gute Ergebnisse im Hinblick auf eine Optimierung eines Arbeitsplanes lassen sich dadurch erzielen, daß zunächst mit dem Verfahren "Routen durch Kombinieren" beide Arten von Randbedingungen berücksichtigt werden und in einer Nachoptimierung mit dem Verfahren "Routen durch Vertauschen" die Spitzenlast weiter verringert wird.

U. Schlücking

EV 9435

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

### 4.2.1 Einsatz von FACTS für die Betriebsführung elektrischer Energieversorgungssysteme

Durch fehlende Möglichkeiten in der Bereitstellung von zusätzlichen Übertragungskapazitäten in bestehenden elektrischen Energieübertragungssystemen (EES) und die Forderung nach einem liberalisierten Netzbetrieb entsteht der Bedarf einer flexibleren Auslastung bestehender EES.

Diese neuen Aufgaben der Netzbetriebsführung können durch innovative Betriebsmittel im Bereich der Leistungselektronik (Flexible AC Transmission Systems, FACTS) erfüllt werden. FACTS zeichnen sich vor allem dadurch aus, daß durch den Einsatz von Leistungselektronik Regeleinriffe im Bereich der Netzregelung flexibler ausgeführt werden können als durch den Einsatz konventioneller Betriebsmittel. Bild 4.15 gibt einen kurzen Überblick über die Anwendungsgebiete verschiedener Typen von FACTS.

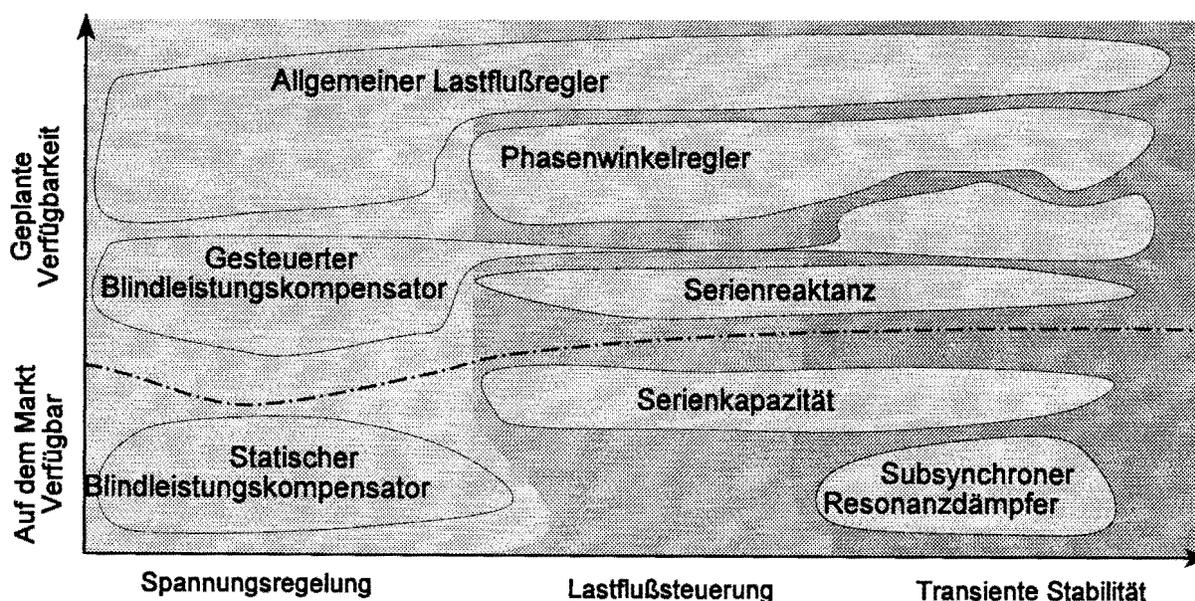


Bild 4.15: Einsatzgebiete von FACTS

Durch FACTS können gezielte Eingriffe im Netz vorgenommen werden, die sich auf die physikalischen Eigenschaften von Betriebsmitteln ebenso beziehen, wie auf die Veränderung von betrieblichen Größen. Dabei entstehen durch Änderung von Phasenwinkeln und Blindleistungseinspeisung und -abnahme im wesentlichen die Möglich-

keiten, Kreisströme auf Übertragungsleitungen zu kompensieren, das Spannungsprofil zu verändern sowie die statische und die dynamische Stabilität zu verbessern. Darüberhinaus kann durch den Einsatz unterschiedlicher FACTS ein Netzbetrieb näher an der Kapazitätsgrenze des EES sowie eine flexiblere Netzbetriebsführung in Systemen mit stark schwankenden Lastanforderungen realisiert werden.

Durch den Einsatz von FACTS entsteht der Bedarf nach komplexeren Regelkonzepten, da durch das schnelle Regelvermögen dieser Betriebsmittel eine dezentrale Steuerung erforderlich wird, die durch eine zentrale Netzführungsstrategie zu koordinieren ist. In vielen Studien sind zentrale Regelungskonzepte eines Netzes mit konventionellen Betriebsmitteln untersucht worden. Hier ist gerade bei großen Verbundsystemen die Frage zu stellen, ob derartige Konzepte aus informationstechnischen Gründen realisiert werden können (synchronisierte Regleraktion, Signallaufzeiten).

Da durch den Einsatz von FACTS die Steuerbarkeit der EES größer wird, sind bisherige Netzregelungskonzepte auszuweiten. Durch eine größere Anzahl von Eingriffsmöglichkeiten werden im Bereich der Leittechnik Koordinationskonzepte für FACTS erforderlich, die von technischen Randbedingungen ebenso beeinflusst werden, wie von wirtschaftlichen Aspekten. Im Rahmen dieses Forschungsprojekts werden basierend auf den bislang klassifizierten Einsatzgebieten von FACTS Untersuchungen bezüglich der Steuerungsmöglichkeit durchgeführt, um Aussagen über den Koordinationsbedarf von FACTS treffen zu können.

Dirk Westermann

EV 9460

#### 4.2.2 Möglichkeiten zur Verbesserung der Spannungsstabilität durch den Einsatz eines SMES

Neben der wirtschaftlichen Anwendung eines supraleitenden magnetischen Energiespeichers (SMES) zur Bereitstellung von Wirkleistungssekundenreserve ergibt sich ein weiteres Einsatzgebiet in der spannungsstabilisierenden Kombination von Wirk- und Blindleistungsbereitstellung. Ziel ist es, einen aktuellen Arbeitspunkt als spannungs-

kritisch zu identifizieren, daraufhin einen unkritischen zu ermitteln und mit Hilfe der SMES-Leistung den aktuellen Arbeitspunkt in den neu gefundenen zu überführen.

Ein kritischer Systemzustand bezüglich der Spannungsstabilität läßt sich anhand von Indikatoren, die auf der Jacobi-Matrix der Lastflußgleichungen beruhen, identifizieren. Es läßt sich nachweisen, daß bei steigender Systemauslastung ein kritischer Systemzustand erreicht wird, der durch die Singularität der Jacobi-Matrix gekennzeichnet ist. Nach der Überschreitung dieses kritischen Punktes erfolgt ein Ablauf dynamischer Vorgänge, die zu einem Spannungskollaps führen. Der Gradient der Determinanten der Jacobi-Matrix zeigt in Richtung der kürzesten Entfernung zwischen der Jacobi-Matrix des aktuellen Systemzustands und der nächstliegenden Jacobi-Matrix eines kritischen Zustands. Der minimale Abstand  $d_{\min}$  der aktuellen Jacobi-Matrix  $J$  von der Gruppe der zugehörigen singulären Jacobi-Matrizen, bei denen ein Spannungskollaps eintritt, kann als Spannungsindikator verwendet werden. Die Bestimmung des minimalen Abstandes erfolgt nach folgender Formel und entspricht dem Inversen der Konditionszahl  $K$ :

$$d_{\min}(J) = \frac{1}{\|J\| \|J^{-1}\|} = K(J)^{-1}$$

Hierbei können verschiedene Matrixnormen  $\|\cdot\|$  Verwendung finden. Der Wert von  $d_{\min}$  liegt zwischen null und eins. Wird als Matrixnorm die  $L_2$ -Norm verwendet, so heißt  $K_2$  spektrale Konditionszahl. Falls bei der Verwendung der Spektralnorm ( $L_2$ -Norm) durch Multiplikation der Systemgleichungen  $\|J\|_2 = 1$  erreicht wird, so ergibt die folgende Formel, daß der vorgestellte Indikator in diesem Falle mit dem minimalen singulären Wert bzw. dem minimalen Eigenwert identisch ist.

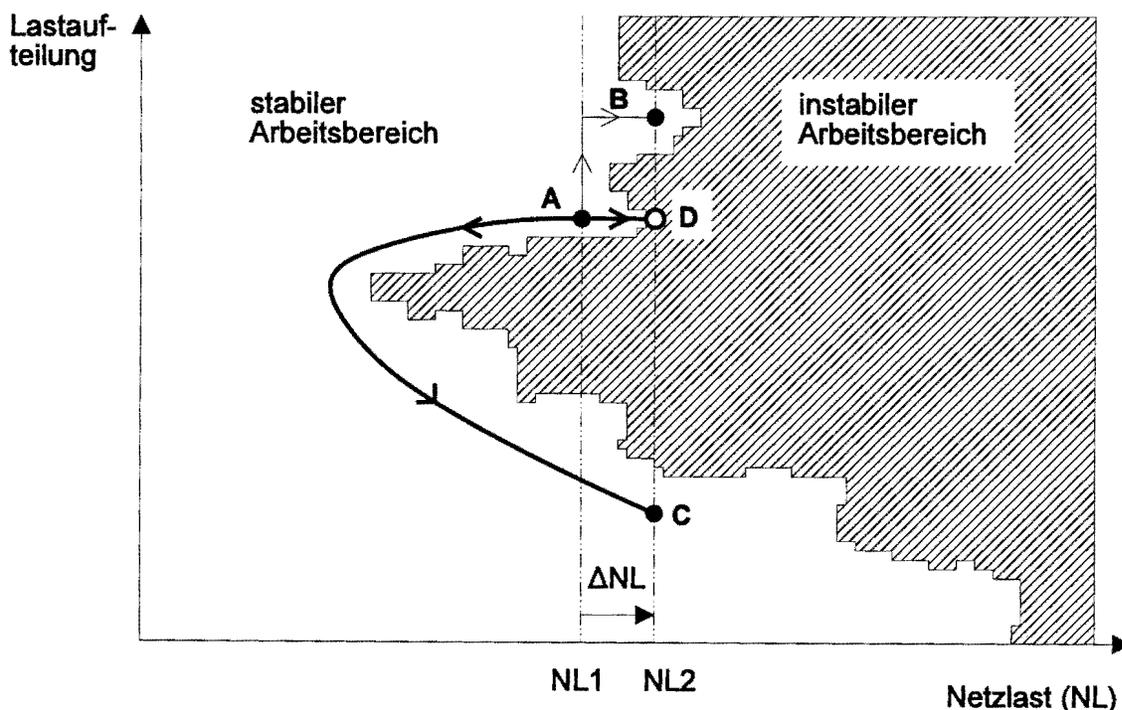
$$d_{\min} = \frac{1}{\|J^{-1}\|_2} = \sigma_{\min} = |\lambda|_{\min}$$

Durch die Verwendung verschiedener Matrixnormen wird eine flexible Wahl des Spannungsindikators bezüglich der Genauigkeit und der Rechenzeit und damit eine Verwendung innerhalb von Regelalgorithmen zur Stabilitätsverbesserung ermöglicht. Der Nachteil dieses Verfahrens ist, daß von dem aktuellen Systemzustand ausgegangen wird, so daß Nichtlinearitäten wie Generatorleistungsgrenzen oder Transformatorstufungen nicht berücksichtigt werden und diese Nichtlinearitäten in Form von Sprün-

gen im Verlauf des Indikators bei Erhöhung der Systemlast auftreten. Es lassen sich somit keine absoluten Werte über eine mögliche Erhöhung der Systemlast ermitteln.

Anhand dieses Indikators lassen sich Aussagen über Arbeitspunkte innerhalb des Zustandsraumes treffen. Hierbei ergeben sich Abhängigkeiten von verschiedenen Lastaufteilungen der Kraftwerke und der aktuellen Netztopologie. Für große Netze läßt sich der Zustandsraum mittels stochastischer Verfahren ergänzt durch Optimierungsprozesse untersuchen, so daß ausgehend von einem aktuellen Arbeitspunkt ein neuer spannungsstabilerer Arbeitspunkt gefunden werden kann. Diese Untersuchung läßt sich mittels stationärer Berechnung durchführen.

Für den Übergang zwischen Arbeitspunkten, der dynamisch zu untersuchen ist, kann sich sowohl durch den Verlauf der Stabilitätsgrenze als auch aufgrund von großen Kraftwerkszeitkonstanten ein Bedarf an schnell zur Verfügung stehender Leistung ergeben, die durch einen SMES bereitgestellt werden kann. Das folgende Bild veranschaulicht den Übergang zwischen verschiedenen Arbeitspunkten unter Berücksichtigung einer angenommenen Stabilitätsgrenze.



**Bild 4.16:** Arbeitspunktüberführung in spannungsstabilere Bereiche

Ausgehend von Arbeitspunkt A, der durch eine bestimmte Lastaufteilung bei einer Netzlast NL1 gegeben ist, ergibt sich bei einer Netzlasterrhöhung auf NL2 eine Überschreitung der Stabilitätsgrenze. Lokal kann ein Arbeitspunkt B gefunden werden, der zwar spannungstabil ist, aber eine geringe Reserve als Abstand zwischen Arbeitspunkt und Stabilitätsgrenze aufweist. Denkbar wäre auch ein Arbeitspunkt C mit größerer Reserve, der allerdings nur dann bei veränderter Lastaufteilung eingenommen werden kann, wenn für die Übergangsphase ein Teil der Leistung z.B. durch einen SMES gedeckt wird.

Über diesen Anwendungsfall hinaus müssen bei der Verwendung eines Speichers zur Verbesserung der Spannungsstabilität auch kurzzeitig auftretende Netzstörungen, die zu Instabilitäten führen können, berücksichtigt werden. Hierbei muß der SMES für einen

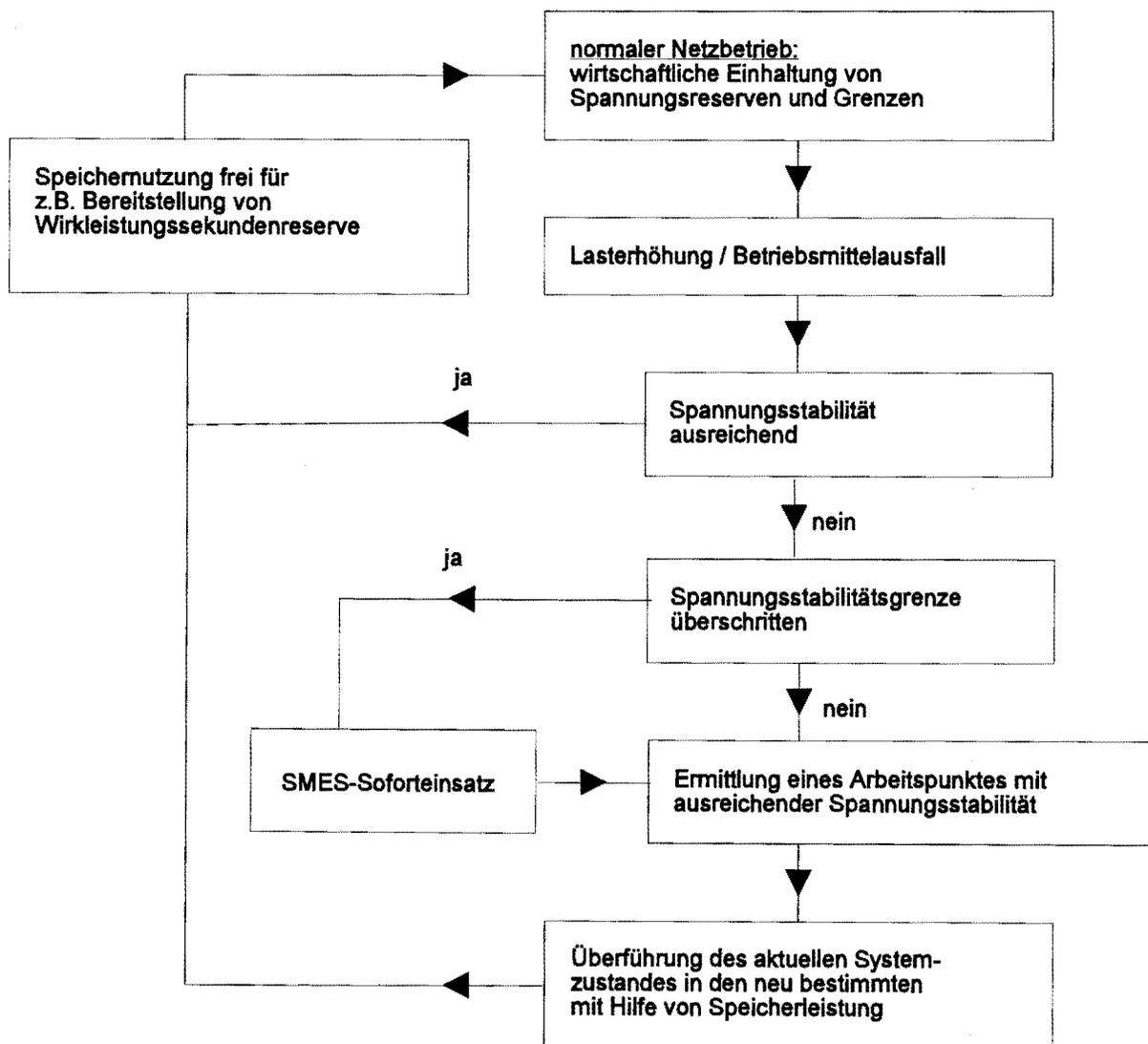


Bild 4.17: Ablaufplan für den SMES-Einsatz

Soforteinsatz zur Verfügung stehen. Der Ablaufplan eines zu realisierenden SMES-Einsatzes ist im Bild 4.17 dargestellt, wobei von einem normalen wirtschaftlichen Netzbetrieb ausgegangen wird, der durch eine starke Lasterhöhung oder einen Betriebsmittelausfall gestört und durch einen Spannungsindikator beobachtet wird. Ist die Spannungsstabilitätsgrenze überschritten, wird der Soforteinsatz des SMES angeregt. Ist **die kritische Grenze** noch nicht erreicht, wird ein spannungsstabilerer Arbeitspunkt ermittelt und mit Hilfe der SMES-Leistung angefahren. Da es sich hier um einen Grenzfall des Systembetriebs handelt, tritt die Wirtschaftlichkeit in den Hintergrund. Sind die auslösenden Kriterien für die kritische Situation nicht mehr gegeben, erfolgt eine Rückführung in den wirtschaftlichsten Arbeitspunkt.

Ch. Rehtanz, C. Damschen

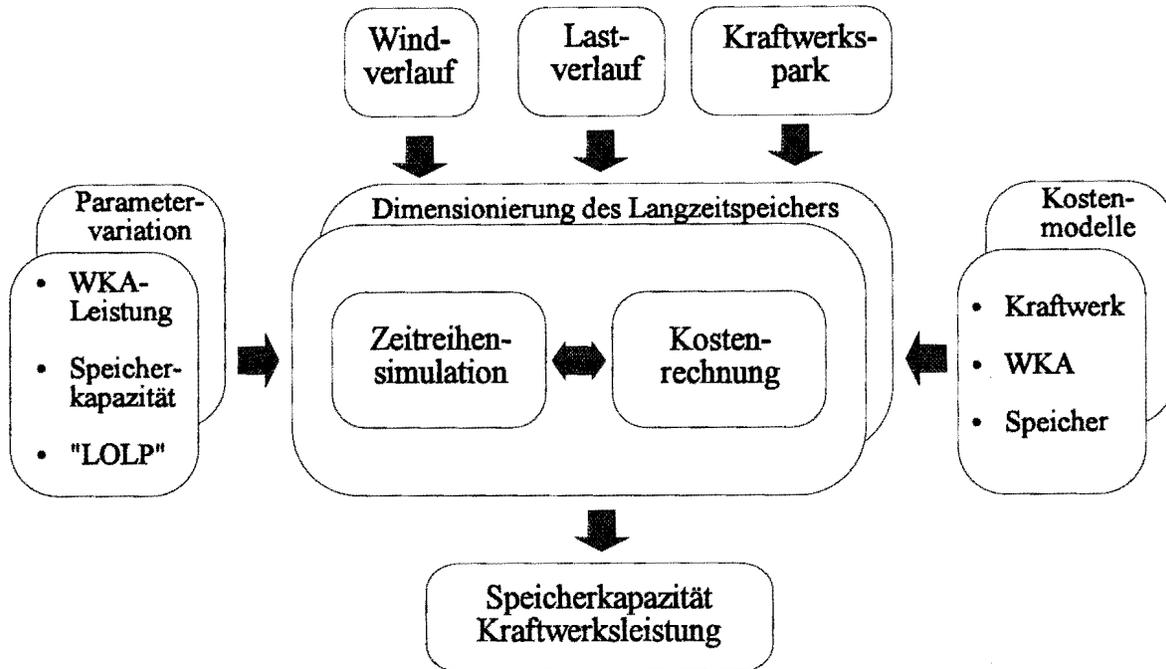
Dieses Forschungsvorhaben wird durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert.

#### 4.2.3 Technisch-wirtschaftliche Dimensionierung von Hybridspeichern zur Integration von Windkraftanlagen in elektrische Energieversorgungssysteme

Die ungleichmäßige Leistungsabgabe von Windkraftanlagen (WKA) kann bei nennenswerter Penetration zu einer Verschlechterung der Versorgungsqualität in elektrischen Energieversorgungssystemen führen. Ein Ausgleich dieser Leistungsschwankungen ist durch den Einsatz von Energiespeichern, z.B. Batteriespeicheranlagen oder Schwungradspeichersystemen, möglich. Die Änderungen der Windgeschwindigkeit, die zu den Leistungsschwankungen von WKA führen, werden durch meteorologische Effekte im Kurz- und Langzeitbereich verursacht. Wie die bisherigen Untersuchungen zeigen, sind Kombinationen aus einem Kurz- und einem Langzeitspeicher, auch als Hybridspeicher bezeichnet, mit einer übergeordneten Regelung und Betriebsführung besonders für die Integration von WKA in elektrische Energieversorgungssysteme geeignet.

Basierend auf den im letzten Jahr vorgestellten Verfahren zur technischen Auslegung von Hybridspeichern wurde der Algorithmus für den Langzeitspeicherentwurf in diesem Jahr mit dem Ziel einer ökonomischen Bewertung des Speichereinsatzes mit einer

Kostenrechnung gekoppelt. Der prinzipielle Ablauf des resultierenden Entwurfsverfahrens ist in Bild 4.18 dargestellt.



**Bild 4.18:** Technisch-wirtschaftlicher Langzeitspeicherentwurf

Zur Dimensionierung des Langzeitspeichers werden wechselseitig eine Zeitreihensimulation und eine Kostenrechnung durchgeführt. Die Eingangsgrößen für die Zeitreihensimulation sind über 10 Minuten gemittelte Werte der Windgeschwindigkeit und der Last. Bei jedem Simulationsschritt werden zunächst aus den Leistungscharakteristiken der WKA deren Wirkleistungseinspeisungen ermittelt. Daran anschließend erfolgt mit Hilfe eines erweiterten Lastflußprogramms die Berechnung der resultierenden Wirkleistungseinspeisungen der Kraftwerke und der Speicherleistungen sowie der Änderung der Speicherenergien. Als Simulationszeitraum wird ein Jahr gewählt, um auch saisonale Einflüsse zu berücksichtigen.

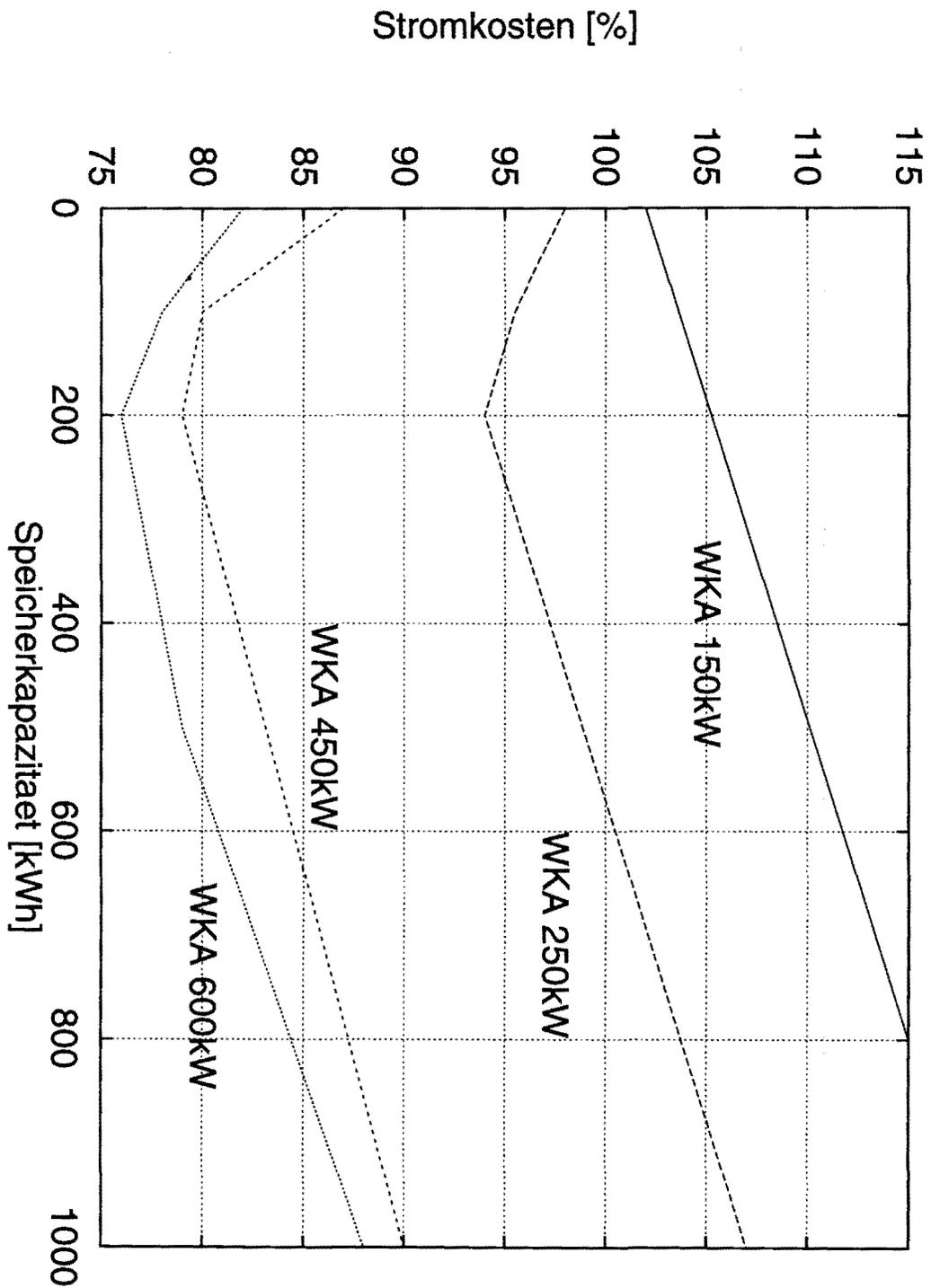
Als Basis für die Kostenrechnung dienen detaillierte Kostenmodelle für die im Netz vorhandenen Kraftwerke, WKA und Speicher. Die Kosten werden mit Hilfe dynamischer Kostenrechnungsverfahren ermittelt, bei denen die Preissteigerung und die Diskontierung Berücksichtigung finden. Hierbei kommen die Kapitalwertmethode, die Barwertmethode und die Annuitätenmethode zur Anwendung.

Mit Hilfe der Kapitalwertmethode wird der zu erwartende Gewinn und die Amortisationszeit für eine Investition aus der Differenz zwischen den Erlösen und den Kosten über die gesamte Laufzeit berechnet. Für eine vergleichende Bewertung unterschiedlicher Investitionsmaßnahmen eignet sich die Barwertmethode, bei der im Gegensatz zur Kapitalwertmethode die Erlöse vernachlässigt werden. Der mit diesem Verfahren ermittelte Barwert dient als Eingangsgröße für die Annuitätenmethode, mit der die Stromkosten bestimmt werden.

Die Speicherauslegung wird durch eine Parametervariation gesteuert, mit der unterschiedliche Kombinationen von WKA-Leistung und Speicherkapazität deterministisch vorgegeben werden können, aus denen dann die wirtschaftlichste mit Hilfe der Kostenrechnung ermittelt wird. Als weitere Größe findet die angestrebte Versorgungssicherheit Berücksichtigung, die durch die Versorgungsverlustwahrscheinlichkeit ("Loss of Load Probability", LOLP) beschrieben wird. Die LOLP ist dabei definiert als der Zeitanteil im betrachteten Untersuchungszeitraum, in der die Versorgung der Verbraucher nicht erfolgen kann. Neben der Speicherkapazität wird mit dem beschriebenen Entwurfsverfahren ermittelt, ob für eine vorgegebene Versorgungssicherheit die installierte Kraftwerksleistung durch den Speichereinsatz verringert werden kann.

Als Beispiel für das Entwurfsverfahren eines Langzeitspeichers wird der Speichereinsatz in einem Inselnetz untersucht. Für die Langzeitspeicherung kommt eine Batteriespeicheranlage mit Bleiakkumulatoren zum Einsatz. Die installierte Kraftwerksleistung wird von einem Dieselgenerator bereitgestellt und beträgt 550 kW. Die Spitzenlast ist in dem betrachteten Untersuchungszeitraum von einem Jahr 513 kW.

Bild 4.19 zeigt als ein Ergebnis der Untersuchungen die Abhängigkeit der Stromkosten des Gesamtsystems Dieselgenerator/WKA/Batteriespeicheranlage - bezogen auf den Fall, in dem die Last nur durch den Dieselgenerator versorgt wird (100%) - von der Speicherkapazität der BSA. Die Kosten für die WKA mit Nennleistungen zwischen 150 und 600 kW sind Angeboten unterschiedlicher Hersteller vom Juni 1994 entnommen. Die Speicherleistung entspricht jeweils der installierten WKA-Leistung.



**Bild 4.19:** Abhängigkeit der Stromkosten von der Speicherkapazität bei unterschiedlichen WKA-Leistungen

Aus den dargestellten Verläufen lassen sich zwei grundsätzliche Schlußfolgerungen ziehen. Einerseits existiert eine minimale WKA-Leistung, ab der ein Speichereinsatz wirtschaftlich sinnvoll ist, in diesem Fall 250 kW. Andererseits gibt es für Anlagen mit einer Nennleistung von 250 kW und mehr ein Kostenminimum, das relativ flach verläuft und ungefähr konstant bei 200 kWh liegt. Entscheidend für die Lage des Minimums und damit für die Wirtschaftlichkeit eines Speichereinsatzes ist neben der Brennstoffkostensparnis die deutliche Reduzierung der Anlaßvorgänge des Dieselgenerators, die bereits durch einen kleinen Speicher bewirkt werden kann. An dieser Stelle muß allerdings darauf hingewiesen werden, daß die Ergebnisse stark von den für die Kostenrechnung zugrunde gelegten Parametern abhängen und somit nicht auf jedes beliebige Versorgungsszenarium übertragbar sind.

Mit den in diesem Bericht vorgestellten Verfahren zur technisch-wirtschaftlichen Optimierung des Langzeitspeichers und den im letzten Jahr entwickelten Algorithmen zur Kurzzeitspeicherauslegung ist nun die systematische Dimensionierung eines Hybridspeichers für den Einsatz in elektrischen Energieversorgungssystemen mit hohem Anteil an Energieerzeugung durch WKA möglich. Gegenstand weiterer Untersuchungen ist eine Optimierung des Langzeitspeichermanagements sowie die Prüfung der Eignung ereignisorientierter Konzepte für die Regelung und Betriebsführung, die eine Erweiterung der Einsatzmöglichkeiten des Speichers und damit zusätzliche Kostenvorteile ermöglichen sollen.

Th. Fabian

EV 9410, EV 9446, EV 9451, EV 9452

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

#### 4.2.4 Entwicklung von Lastmodellen für einen Trainingssimulator zum Anlernen künstlicher neuronaler Netze

Da künstliche neuronale Netze (Artificial Neural Networks, ANN) zur Betriebsführung nicht am Zielprozeß, einem elektrischen Energieversorgungssystem, angeleitet werden

können, wird im Rahmen des Projekts NEUPRO ein Echtzeittrainingssimulator für das Training und die Erprobung der ANN entwickelt. Dabei ist anzustreben, daß bei der Prozeßankopplung der ANN keine Unterschiede zwischen simuliertem und realem Prozeß erkennbar werden. Der Unterschied zwischen einem Dispatcher Trainingssimulator (DTS) und einem Echtzeittrainingssimulator (ETS) besteht dabei in der Durchführung der Wissensvermittlung. Während beim DTS Wartenpersonal (Schüler) von einem Ausbilder (Trainer) geschult wird, werden beim ETS künstliche neuronale Netze (Schüler) von Entwicklern (Trainer) angeleitet. In der Trainingsphase besteht daher keine Echtzeitanforderung an den Simulator, ein Training mit geraffter Systemzeit führt jedoch zu einem beschleunigten Anlernen der ANN. Während der Ausführungsphase der ANN arbeitet der ETS im Echtzeitmodus, da hier der reale Betrieb eines Energieversorgungssystems simuliert wird.

Die Struktur des Gesamtsystems ist so gewählt, daß die ANN über die Prozeßdatenakquisition und -visualisierung des Leitsystems von dem realen Prozeß entkoppelt sind. Wird anstelle des realen Prozesses der ETS angekoppelt, können die ANN praxisgerecht trainiert und erprobt werden (Bild 4.20). Das Prozeßabbild wird im wesentlichen durch Anforderungen aus dem Bereich des Trainings der ANN bestimmt.

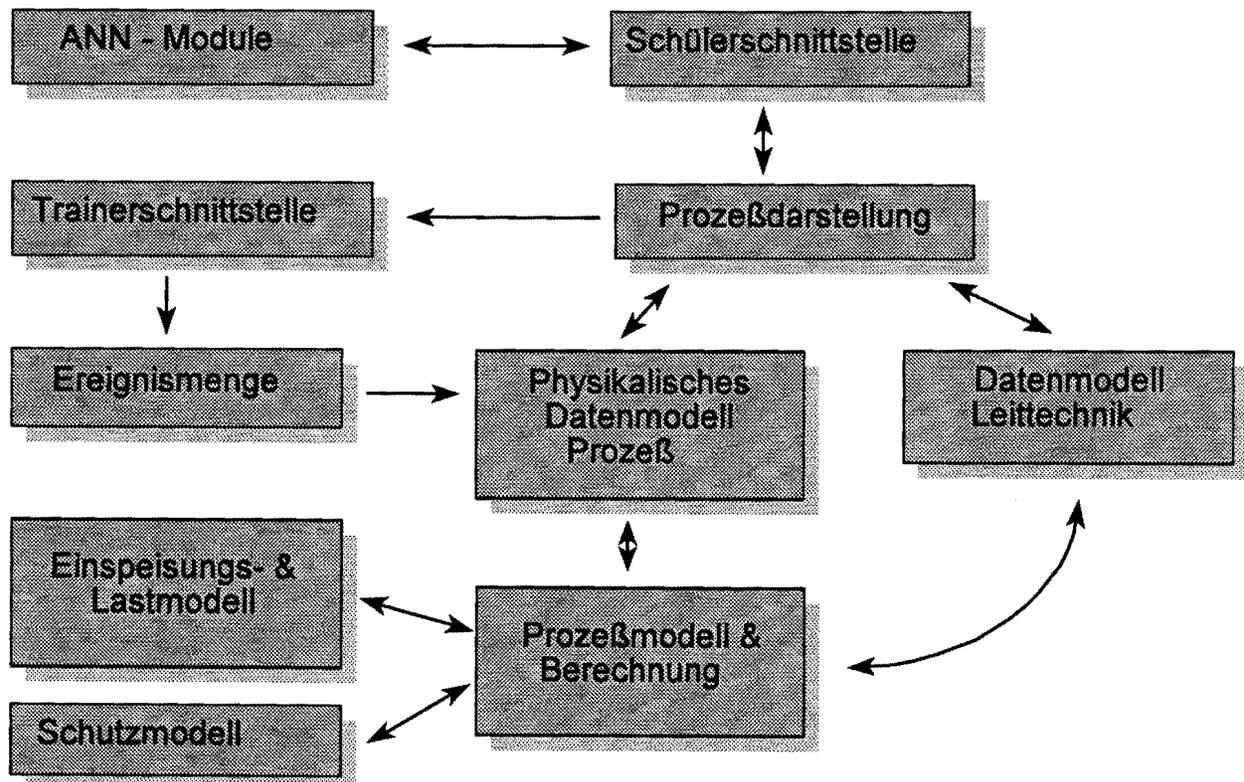


Bild 4.20: Struktur des Trainingssystems für das Anlernen von ANN

Der Trainingssimulator bildet das ungestörte Energieversorgungssystem einphasig stationär ab während der gestörte Betrieb unsymmetrisch dreiphasig nachgebildet wird. Zu diesem Zweck sind die Charakteristika der Lasten in Abhängigkeit von den Zustandsgrößen des elektrischen Energieversorgungssystems sowie in Abhängigkeit von der Zeit nachzubilden. Dazu wird das Verhalten von Verbrauchergruppen kategorisiert und über typische Verbraucherkurven (TVK), die in einer Datenbasis definiert sind, berechnet. Für die gezielte Beeinflussung der Lastgänge sind in einer zweiten Datenbasis frei definierbare Verbraucherkurven (FDVK) abgelegt. Sowohl die TVK als auch die FDVK umfassen Wirklast- und Lastwinkelverläufe. Alle Verknüpfungsinformationen zur Bestimmung eines Knotendatensatzes sind in einer Knotendatenbasis gespeichert.

Tritt zu einem Zeitpunkt ein Ereignis auf, das z.B. eine Lastflußrechnung erfordert, wird die gesamte Schnittstelleninformation an das Lastmodell übergeben. Dort werden aus den TVK die Lastvektoren bestimmt. Diese Lastvektoren beinhalten für alle Knoten des betrachteten Energieversorgungsnetzes die Wirk- und Blindlast zu einem Zeitpunkt. Die Berechnung des Blindleistungsvektors erfolgt dabei aus den Wirklastinformationen und den Lastwinkelinformationen. Im Rahmen des Simulatorkonzeptes wird über die FDVK eine gezielte Beeinflussung der Lastgänge ermöglicht. Hier kann durch einen ereignisgesteuerten Eingriff unmittelbar das Systemverhalten verändert werden.

Zur Modellierung der Einspeisungen wird im Simulator ein stationäres Modell verwendet. Die Verteilung der Systemlast auf die Einspeisungen wird über Partizipationsfaktoren in der Sollwertvorgabe der Kraftwerksblöcke erzielt.

Vor dem Hintergrund des Trainings von ANN können die Daten der Last- und Einspeisungsmodelle durch eine Ereignissteuerung gezielt beeinflußt werden. Dies betrifft:

- Veränderungen an der Knotendatenbasis, der TVK-Datenbasis und der FDVK-Datenbasis;
- topologische Veränderungen im Energieversorgungsnetz;
- Veränderungen an der Kraftwerksdatenbasis;
- Veränderungen an der Einspeisungssituation.

Durch zyklisches Auslesen der jeweiligen Datenbasen können somit Änderungen in der Lastzusammensetzung sowie Änderungen im Betrieb aller Einspeisungen berücksichtigt werden und in die Simulation einfließen.

D. Westermann

EV 9447

Dieses Forschungsvorhaben wird im Rahmen des Verbundprojektes NEUPRO durch das Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) gefördert.

#### 4.2.5 Analyse und Modellierung des Wirk- und Blindleistungsbedarfs in Mittel- und Niederspannungsnetzen

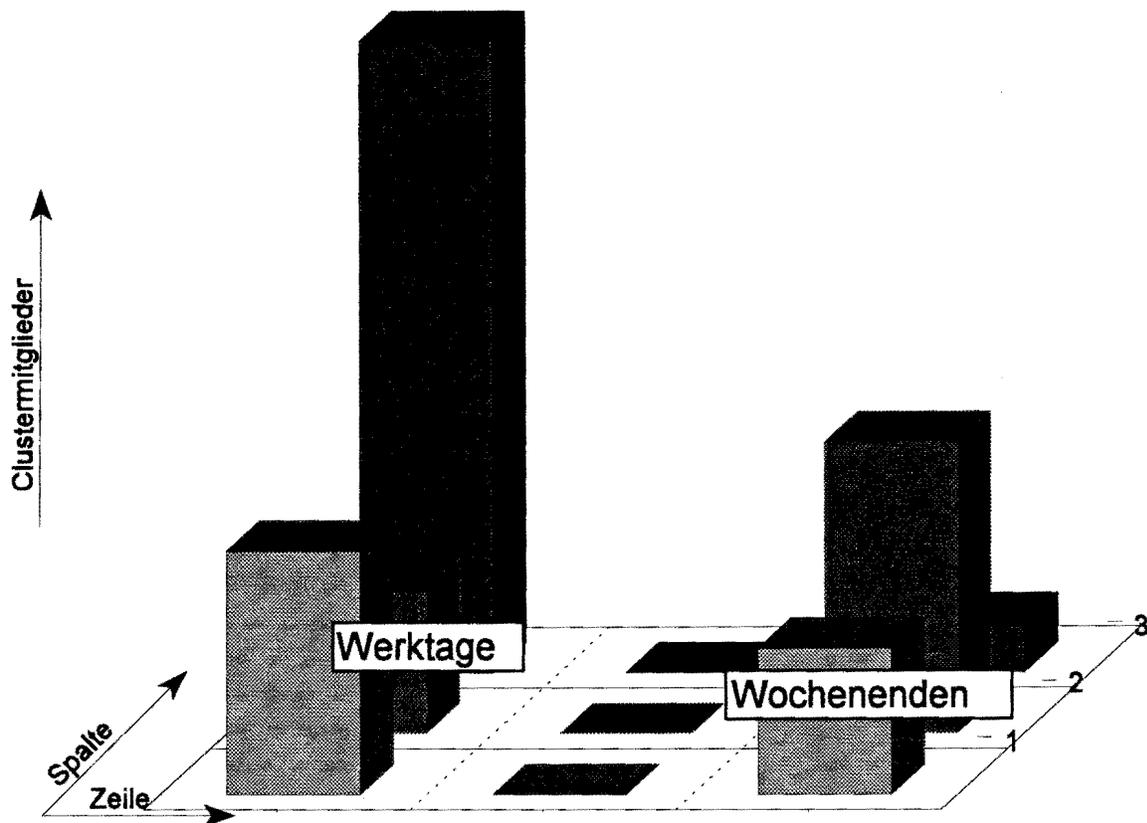
Die Beschreibung des Wirk- und Blindleistungsverhaltens in elektrischen Energieversorgungsnetzen ist für verschiedene Aufgabenstellungen der Netzplanung und des Netzbetriebs von Bedeutung. Zu nennen sind hierbei insbesondere Lastmodelle für Netztrainingssimulatoren oder Prognoseansätze, Basislastmodelle für die Optimierung steuerbarer Lasten, die Zustands-Estimation in Verteilungsnetzen sowie Untersuchungen zum optimalen Einsatzort von Blindleistungskompensationsanlagen. Das Wirkleistungsverhalten in Verteilungsnetzen kann auf der Basis von typischen Verbraucherkurven (TVK) beschrieben werden. Die TVK können jeweils für Verbraucher mit ähnlichem Verhalten bestimmt werden, z.B. Haushalte, Speicherheizungen, Handel, Industrie usw. Diese Verbrauchergruppen korrelieren mit den Tarifgruppenschlüsseln der Energieversorgungsunternehmen. Die Blindleistung in Verteilungsnetzen wird durch die Sondervertragskunden (SVK) bestimmt. Durch den hohen Stellenwert der SVK für die Blindleistung ist es notwendig, diese über die Tarifschlüssel hinaus nach ihrem Verbraucherverhalten weiter zu differenzieren.

Ein Ansatz zur Unterteilung der verschiedenen SVK in Gruppen ähnlichen Verhaltens ist die Clusteranalyse mittels Neuronaler Netze. Für diese Anwendung eignet sich insbesondere ein Kohonennetz; dieses Neuronale Netz gehört zur Klasse der selbstorganisierenden Netze. Ein Kohonennetz bildet ein Eingabeelement aus einem hoch-

dimensionalen stetigen Raum auf einen zweidimensionalen diskreten Raum ab. Ein Eingabeelement wird repräsentiert durch ein  $n$ -Tupel von reellen Zahlen, welches die Eigenschaften dieses Elementes widerspiegelt. Der niederdimensionale Raum wird durch die einzelnen Neuronen des Kohonennetzes gebildet und durch eine Nachbarschaftsbeziehung zwischen den Neuronen strukturiert. Für eine zweidimensionale Anordnung der Neuronen auf einem äquidistanten Raster kann die Ordnung der Nachbarschaft z.B. durch den euklidischen Abstand in diesem Raster definiert werden. Nach dem Abschluß des Trainingsprozesses ordnet das Kohonennetz jedem Eingabetupel ein Neuron mit seinem entsprechenden Ausgabebetupel zu. Dabei bleiben Strukturen im Eingaberaum im Ausgaberaum erhalten, d.h. "ähnliche" Eingabetupel werden auf das gleiche Neuron abgebildet, "sehr verschiedene" Eingabetupel werden auf weit voneinander getrennte Neuronen abgebildet. Als Kriterium für die "Ähnlichkeit" bietet sich das Skalarprodukt zwischen den  $n$ -dimensionalen Elementen an.

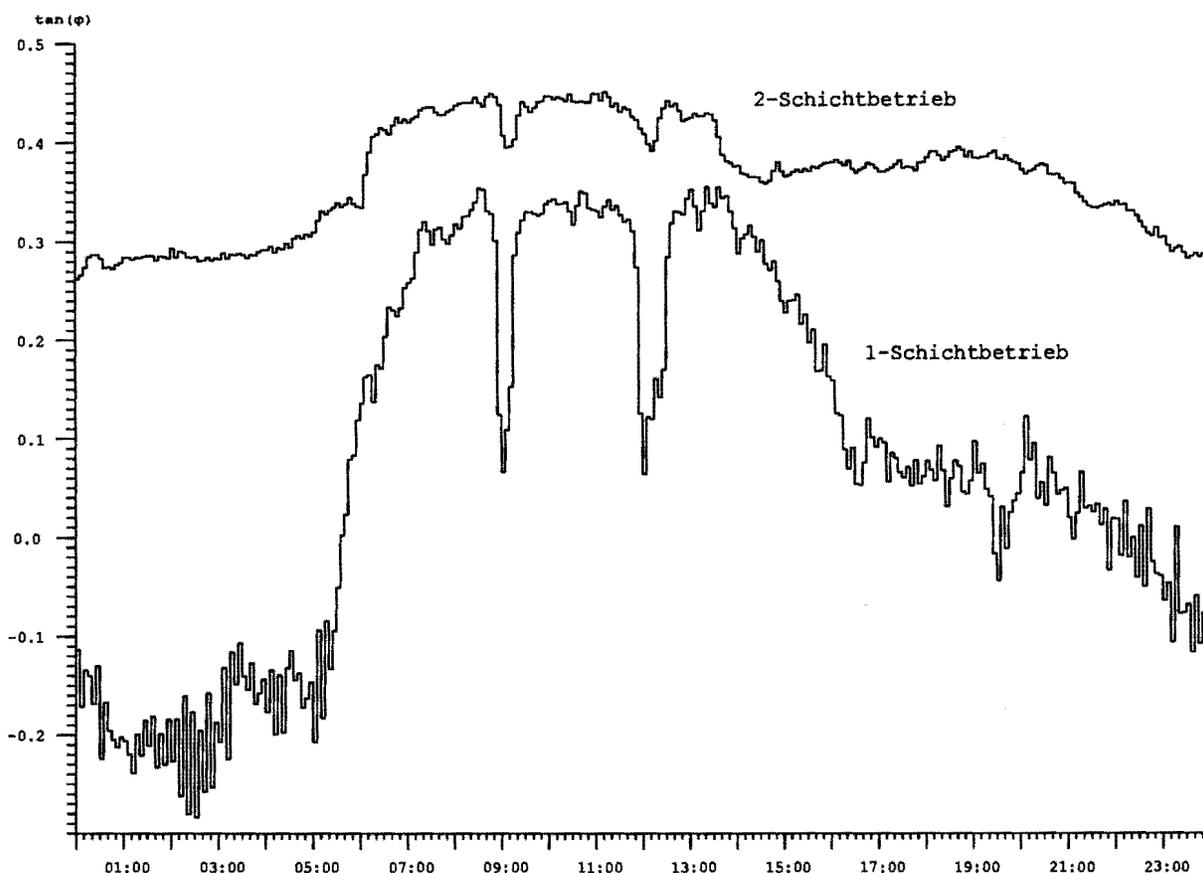
Aufgrund dieser Eigenschaften kann ein solches Kohonennetz für die Lösung des Clusterproblems bezüglich der Lastanalyse verwendet werden. Ein wesentlicher Vorteil dieses Ansatzes gegenüber anderen Clusteranalyseverfahren besteht darin, daß bei der Zuordnung der Eingabemuster zu den einzelnen Neuronen des Kohonennetzes nicht alle Neuronen ausgenutzt werden. Das Neuronale Netz bestimmt damit selbständig im Rahmen der vorgegebenen Netzgröße die Anzahl der benötigten Gruppen. Für die Lastanalyse werden die Lastganglinien der verschiedenen SVK für verschiedene Tage als die zu untersuchenden Elemente verwendet. Die Ganglinien werden in Cluster entsprechend der Zuordnung auf die verschiedenen Neuronen des Kohonennetzes aufgeteilt. In Bild 4.21 ist die Aufteilung der Tagesganglinien eines Monats für einen Verbraucher auf die Neuronen eines zweidimensionalen Kohonennetz mit neun Neuronen dargestellt.

Für die Clusteranalyse nach der Blindleistung ist es sinnvoll, den  $\tan\varphi$  als das Verhältnis von Blind- zu Wirkleistung zu verwenden, da dieser im Gegensatz zum  $\cos\varphi$  das Vorzeichen der Blindleistung wiedergibt.



**Bild 4.21:** Clusteranalyse der Lastgänge eines Verbrauchers mittels eines Kohonennetzes

Bei der Untersuchung des Verbraucherverhaltens verschiedener SVK der gleichen Branche zeigt sich, daß deren Verhalten stark von der Arbeitsorganisation im Schichtbetrieb beeinflusst wird. Bei der Clusterung der Lastgänge verschiedener metallverarbeitender Industriebetriebe ergeben sich für die im Rahmen des Projektes durchgeführten Messungen zwei Hauptcluster entsprechend den im Datenmaterial vorhandenen Ein- und Zweischichtbetrieben. In Bild 4.22 sind die Verläufe des  $\tan\phi$  für die entsprechenden Schwerpunktanglinien dargestellt.



**Bild 4.22:** Schwerpunktganglinien  $\tan\varphi = Q/P$ , Metallverarbeitung 1- bzw. 2-Schichtbetrieb

Im Rahmen des Projektes werden, aufbauend auf der Bestimmung der Verbraucherstruktur, durch die Clusteranalyse Estimationsalgorithmen zur Bestimmung der TVK für die Wirkleistung und den  $\tan\varphi$  verschiedener Verbrauchergruppen auf der Basis von durchmischten Verbrauchsmessungen entwickelt.

M. Langer

EV 9426, EV 9427

Dieses Forschungsvorhaben wird gemeinsam mit der FGH Mannheim durchgeführt und von der AIF gefördert.

#### 4.2.6 Genetic Algorithm Based Parameter Estimation of a Nonlinear Dynamic System with Application to Load Modelling

There are mainly three kinds of approaches to parameter estimation of nonlinear dynamic system (NLDMs):

- (1) analytical approach,
- (2) stochastic approach
- (3) optimization based approach (OBA).

The analytical approaches derive the parameters deterministically according to the test results. This kind of approaches may be limited to the test type, and sensitive to measurement errors. The stochastic approaches are limited to the assumptions about the noise. The main procedure of an optimization based approach is to search a set of parameters, which minimizes the errors between the observed (or 'true') outputs and simulated ones. Traditional search algorithms are applied in this kind of approaches. Generally speaking, they require, that the initial guess of parameters lies closer to the real values. Otherwise, they may converge to local optimal values or even diverge.

Genetic algorithms are search algorithms based on the mechanics of natural selection and natural genetics. They combine survival of the fittest among string structures with a structured yet randomized information exchange to form a search algorithm with some of the innovative flair of human search. The underlying concepts of genetic algorithms were developed by John Holland in 1962. The most attractive performance of GAs is their robustness in complex search spaces.

Based on genetic algorithms, a novel approach - GABPE (genetic algorithm based parameter estimation) - to parameter estimation of nonlinear dynamic systems is developed and then applied to load modelling. The case studies show that the proposed approach is simple yet powerful.

Genetic algorithms are different from common optimization and search procedures in four ways:

- (1) GAs work with a coding of the parameter set, not the parameter themselves;
- (2) GAs search from a population of points, not a single point;
- (3) GAs use objective function (biologist call this function the fitness function) information, not derivatives or other auxiliary knowledge;

(4) GAs use probabilistic transition rules, not deterministic rules.

Taken together, these four differences contribute to a genetic algorithm's robustness and resulting advantage over other more commonly used techniques.

The mechanics of a simple genetic algorithm are surprisingly simple, involving nothing more complex than copying strings and swapping partial strings. A simple genetic algorithm that yields good results in many practical problems is composed of three operators:

- (1) Reproduction,
- (2) Crossover,
- (3) Mutation.

Reproduction is a process in which individual strings are copied according to their objective function values. The reproduction operator may be implemented in a number of ways. After reproduction, simple crossover may proceed in two steps. First, members of the newly reproduced strings in the mating pool are mated at random (with large probability  $p_c$ ). Second, each pair of strings undergoes crossing over as follows: an integer position  $k$  along the string is selected uniformly at random between 1 and the string length less one, i.e.  $[1, L-1]$ . Two new strings are created by swapping all characters between position  $k+1$  and  $L$  inclusively. In the simple GA, mutation is the occasional (with small probability  $p_m$ ) random alteration of the value of a string position. In the binary coding case, this simply means changing a **1** to a **0** and vice versa.

Let us suppose that a priori knowledge of a physical, engineering, biological, etc., process leads us to use a state space model of the form:

$$\begin{aligned}\dot{X} &= F(X, U, \dot{U}, t, \theta, Z) \\ Y &= G(X, U, \dot{U}, t, \theta, Z)\end{aligned}$$

where,  $\theta$  -- dependent parameter vector of dimension  $m$ ;  $Z$  -- independent parameter vector of dimension  $w$ . As the steady-state values of input and output variables, i.e.  $U_0$  and  $Y_0$ , are measurable and known,  $X_0$  and  $\theta$  are therefore dependent on  $Z$  according to steady-state equations. This means that the dynamic equation is solvable after  $Z$  being estimated.

The major procedure of a traditional optimization algorithm based parameter estimation

method is to search a 'best' (or 'optimal') parameter vector  $Z^*$  in the search space  $S$ , which minimizes an error cost function  $E$ , i.e.

$$E^* = \min_{Z \in S} E(Z), \quad Z \in S$$

The error cost function  $E$  is usually taken as a nonnegative and monotonously increasing function of the output errors:

$$E = \int_{t_0}^T J(\|Y_m(t) - Y_c(t)\|) dt, \quad \text{for continuous time}$$

$$E = \sum_{k=0}^N J(\|Y_m(k) - Y_c(k)\|), \quad \text{for discrete time}$$

where,  $( )_m$  -- measured (or desired) values;  $( )_c$  -- computed values.

Better parameters generally result in less error cost function. In GAs, larger fitness would reproduce more offsprings. This will hopefully lead to better parameter estimation. Noting that the error function is always positive, fitness  $f$  is therefore chosen as an inverse of the error function, i.e.

$$f = 1 / E$$

To keep approximate levels of competition throughout a simulation, scaling of fitness values is usually necessary in GAs. A simple linear formula is applied in this paper. The binary codes dealt in GAs should be converted to decimal parameters used in models and fitness computations. The decimal integer  $Z^{(10)}$  of a binary code  $Z^{(2)}$  with length  $L$  can be easily obtained:

$$Z^{(2)} = a_1 a_2 \dots a_L, \quad Z^{(10)} = \sum_{l=0}^L a_l 2^l$$

where,  $a_l$  -- a single binary feature or detector;  $( )^{(2)}$  -- a number in binary form;  $( )^{(10)}$  -- a number in decimal form. But generally speaking, the parameters are not integer. And different parameters may have different search range:

$$S_j \triangleq \{ Z_j \mid Z_j \in [ Z_{jmin}, Z_{jmax} ] \}$$

It is recommended that all parameters have the same binary code length  $L$  and thus the same search range in binary form. With the code converter designed as:

$$Z_j = Z_{jmin} + (Z_{jmax} - Z_{jmin}) (Z_j^{(10)} / Z_{max}^{(10)})$$

the uniform binary search space can be mapped into the decimal search space. It should be noted that a too large search space requires enormous computations, and a too small search space may reduce the possibility to find the best results. Proper search space could be determined with the help of knowledge about the studied problem.

As mentioned before, GAs use objective function information only, not the derivatives or other auxiliary knowledge. This characteristic makes a GA a more canonical method than many search schemes. Theoretically speaking, GABPE is applicable to nonlinear or linear systems, dynamic or static systems, time delay systems and distributed parameter systems. Of course, the parameters must be observable. In fact, GABPE has been successfully applied to all nonlinear dynamic load models that we know. The applications prove that GABPE is indeed a powerful tool of load modelling. Owing to the limited space, only the results of applying GABPE to composite induction motor load are given below.

A new third-order dynamic model of polar form is used to represent induction motor. Instead of constant impedance used in many reference, an exponential function is applied to model the static part of a composite load. The independency of load voltage is also discussed. It is pointed that more attention should be paid to the effects of phase angle change.

Two field tests (A1 and A2) are used as examples. The fitness function increases quickly as shown in Fig. 4.23. It can be seen that GABPE has a good convergence performance. Desirable parameters can be obtained (even beginning with bad initial values) as shown in Fig. 4.24. This proves the robustness of GABPE. The developed models are then used to simulate the responses of both tests. The simulation results are very close to the measured ones.

P. Ju

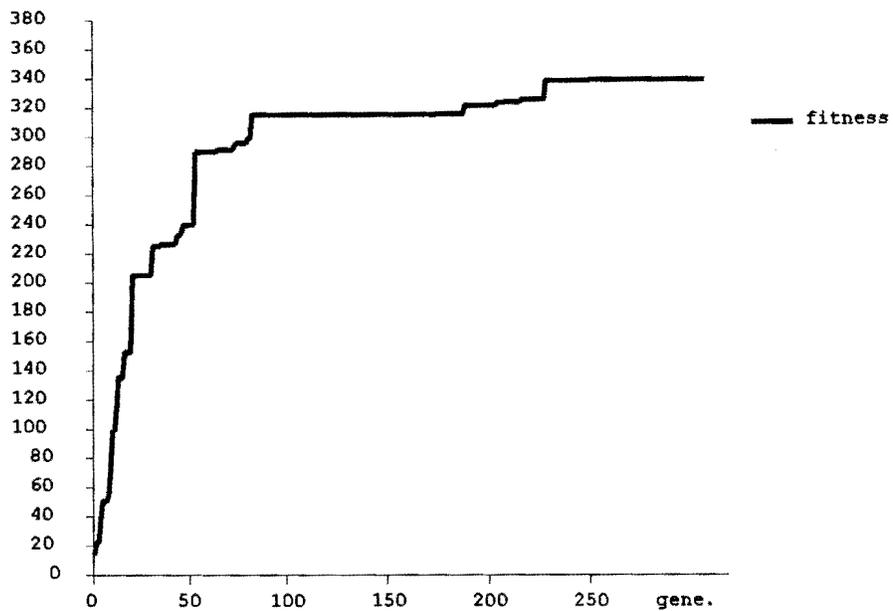


Fig. 4.23: Fitness (A1)

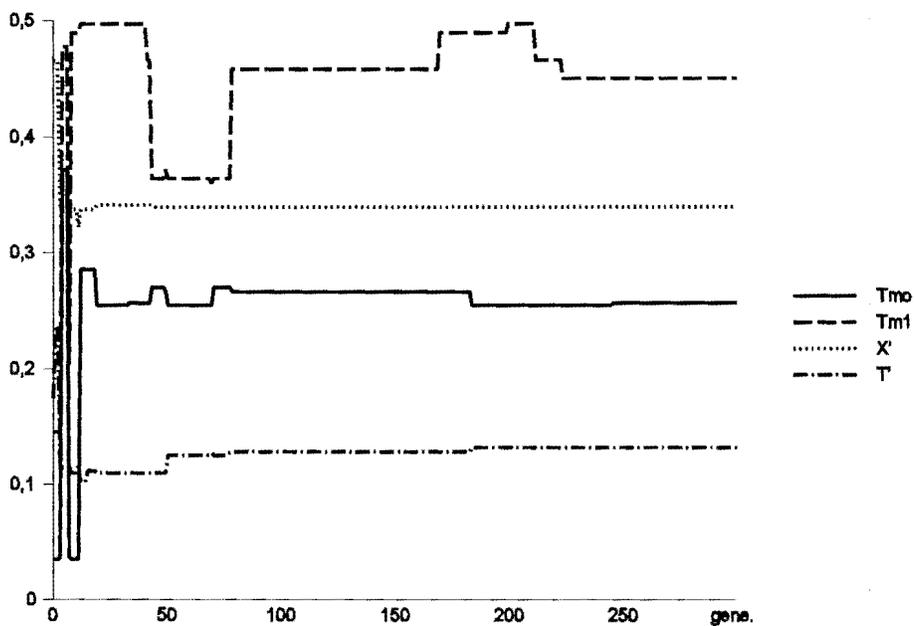


Fig. 4.24: Parameter estimation (A1)

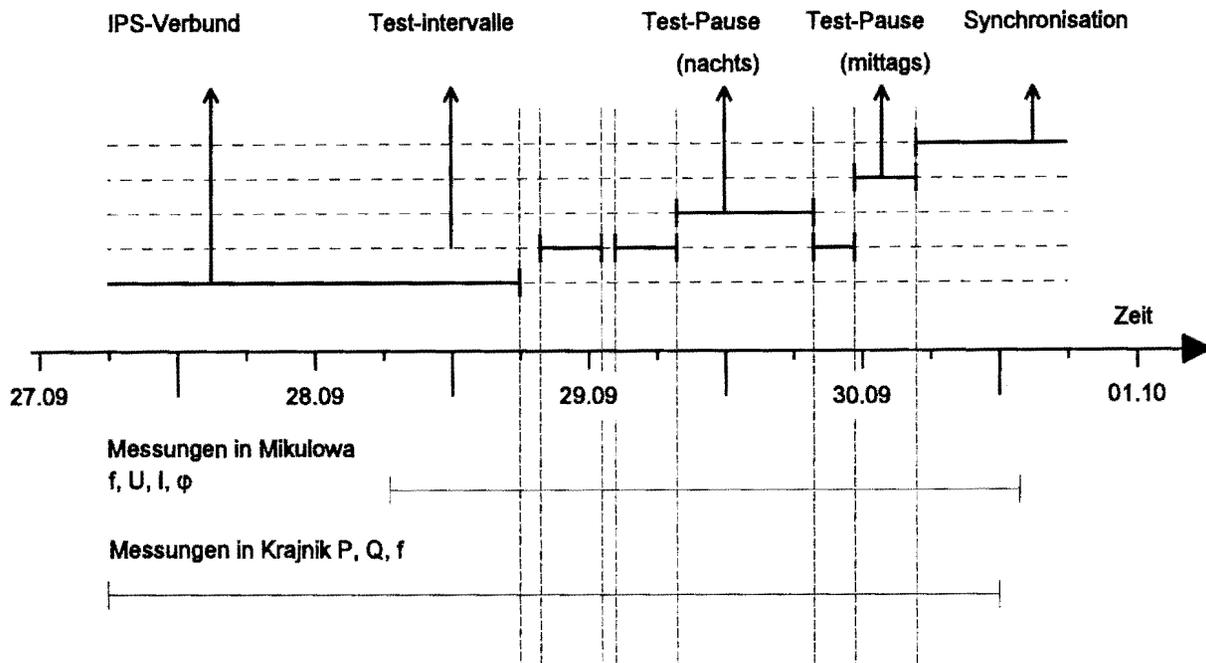
### 4.3 Schutz- und Leittechnik

#### 4.3.1 Auswertung von Netzversuchen im CENTREL-Verbund

Nach dem Wandel der politischen Verhältnisse in Osteuropa besteht bei den dortigen Energieversorgungsunternehmen (EVU) der Wunsch, in das westeuropäische Verbundsystem der UCPTÉ aufgenommen zu werden. Eine Aufnahme in dieses Verbundsystem setzt jedoch voraus, daß die Anforderungen, die die UCPTÉ an ihre Mitglieder stellt, von den osteuropäischen Energieversorgungsunternehmen eingehalten werden. Zum Nachweis, daß sie in der Lage sind, diese Anforderungen zu erfüllen, haben sich die osteuropäischen Länder Polen, Ungarn, die Tschechische Republik und die Slowakische Republik sowie der ostdeutsche Netzbetreiber VEAG zum CENTREL-Verbund zusammengeschlossen und gemeinsam verschiedene Netzversuche durchgeführt. Ende September 1993, im Verlaufe eines dieser Netzversuche, wurden in Polen an verschiedenen Punkten im dortigen Energieversorgungsnetz Messungen durchgeführt und anschließend ausgewertet.

Ziel dieses Netzversuches war der Nachweis der Leistungsfähigkeit der Spannungs- und Frequenzregelung im CENTREL-Verbundnetz. Zu diesem Zweck wurden mehrere Verbraucher und Erzeuger mit einer Leistung von jeweils ca. 400 MW (1% der installierten Kraftwerksleistung) abgeschaltet. Der Versuchsablauf gliederte sich in die Phasen:

IPS-Verbund:	Energieverbund im Normalzustand ohne Primärregelung
Test-Intervalle:	3 Abschnitte, in denen geschaltet wurde
Test-Pause (nachts):	Ungestörter Zustand des CENTREL-Netzes mit Primär- und Sekundärregelung
Test-Pause(mittags):	Ungestörter Zustand des CENTREL-Netzes mit Primär- und Sekundärregelung
Synchronisation:	Phase, innerhalb der die Wiederankopplung des CENTREL-Verbundes an das IPS-Verbundnetz stattfand

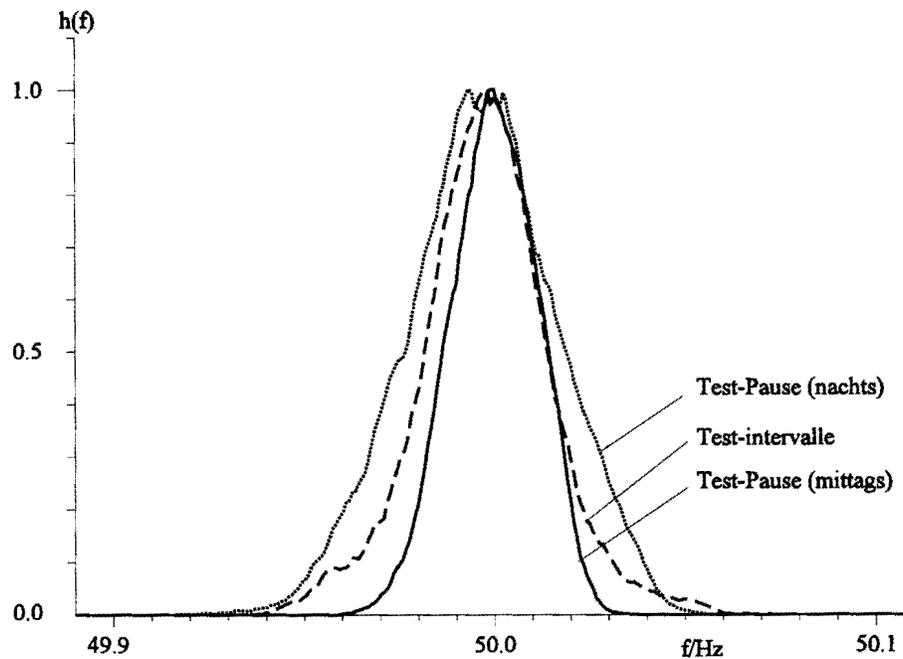


**Bild 4.25:** Zeitphasen des Versuchablaufes mit den Meßzeiträumen

In Bild 4.25 ist die Abfolge dieser Phasen graphisch dargestellt. Zusätzlich wurde der Zeitraum eingetragen, in dem in der Schaltstation Mikulowa Spannung, Strom, Frequenz und Phasenwinkel und in der Schaltstation Krajnik Frequenz, Wirk- und Blindleistung gemessen wurden. Im Anschluß an die Messungen wurden die aufgezeichneten Meßdaten nach den drei Gesichtspunkten Spannungs- und Blindleistungsregelung, Wirkleistung und Frequenz und Primär- und Sekundärregelung ausgewertet.

Das Ziel, die Spannung in den Netzknoten innerhalb eines Spannungsbandes von +5% und -10% zu halten, wurde an den Meßstellen erfolgreich erfüllt. Weiterhin zeigte sich, daß Abschaltungen in der näheren Umgebung keine Spannungs- und Blindleistungssprünge unzulässiger Höhe verursachten. Insgesamt ist die Spannungs- und Blindleistungsregelung in den gemessenen Schaltstationen als ausreichend und zufriedenstellend zu bewerten.

Die Frequenz und deren Verlauf ist ein Maß für das Wirkleistungsgleichgewicht und ein Kriterium für die Wirkleistungsregelung im Energieversorgungssystem. Deswegen wurden aus den gemessenen Daten die relative Häufigkeitsverteilung der Frequenz, wie sie in Bild 4.26 wiedergeben ist, für die unterschiedlichen Testphasen ermittelt.



**Bild 4.26:** Relative Häufigkeit der Frequenz für die verschiedenen Test-Phasen

Für die Phase der Test-Pause (mittags) erkennt man ein Toleranzband von  $\pm 40$  mHz um den Wert von 50 Hz, wohingegen das Toleranzband für die Test-Pause (nachts) mit  $\pm 70$  mHz entgegen den Erwartungen wesentlich breiter ist. Eine Erklärung für dieses ungewöhnliche Verhalten ergibt sich aus dem Tageslastgang in Polen, der für die Abendstunden (bis ca. 21.00 Uhr) ein zweites Spitzenlast-Niveau aufweist und aus dem Einsatz der Pumpspeicher-Kraftwerke während dieser Periode. Zusammenfassend läßt sich sagen, daß der Mittelwert und das Toleranzband der Frequenz ähnlich den entsprechenden Größen im UCPTE-Verbund sind.

Eine leistungsfähige Primär- und Sekundär-Regelung ist eine Voraussetzung für einen reibungslosen Verbundbetrieb. Zur Analyse und Beurteilung der Primär- und Sekundär-Regelung im CENTREL-Verbundnetz wurden aus den aufgezeichneten Meßdaten einige charakteristische Parameter bestimmt. Für die Anlaufzeitkonstante des CENTREL-Netzes  $T_a$  konnte ein Wert von  $9 \text{ s} \pm 1.8 \text{ s}$  ermittelt werden und für den auf die Spitzenlast bezogenen Last-Frequenz-Parameter  $K$  der Wert  $25^{\text{‰}}/\text{Hz}$ . Die Werte für

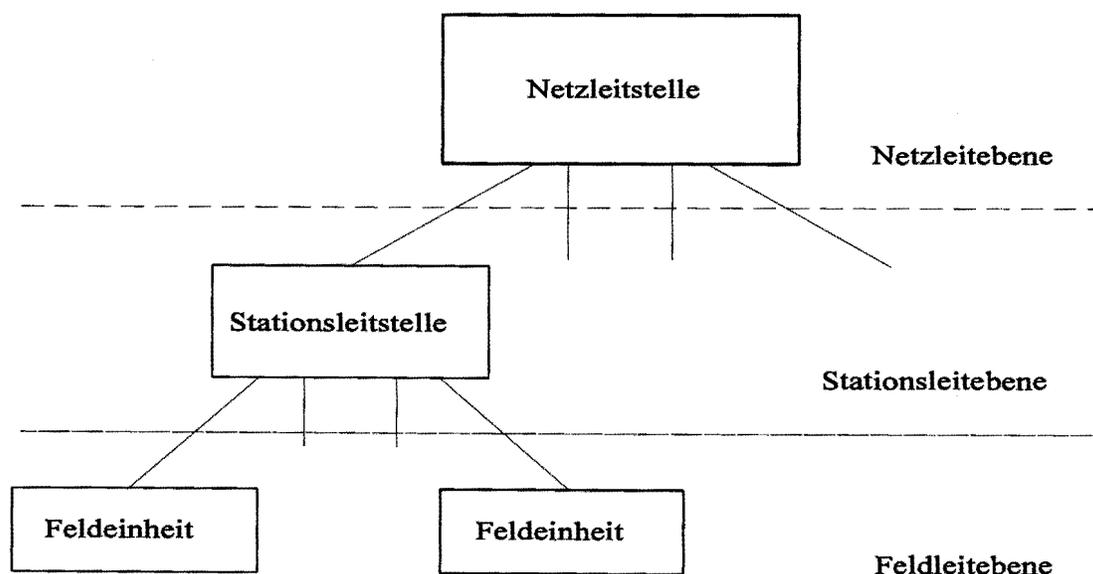
das UCPTE-Verbundnetz werden mit  $T_a$  von ca. 11-14 s und einem  $K$  von  $6.5\%/_{\text{Hz}}$  angegeben. Der wesentlich größere Last-Frequenz-Parameter läßt auf eine größere Bedeutung frequenzabhängiger Lasten im CENTREL-Verbundnetz schließen. Als Fazit dieser Analyse kann festgehalten werden, daß die Primär- und Sekundär-Regelung im CENTREL-Verbundnetz ausreichend ist für die Ausregelung größerer Störungen.

A. Koel, M. Langer, Chr. Rehtanz

EV9407, EV9408, EV9419

#### 4.3.2 Intelligente Stationsleittechnik in Verteilungsnetzen

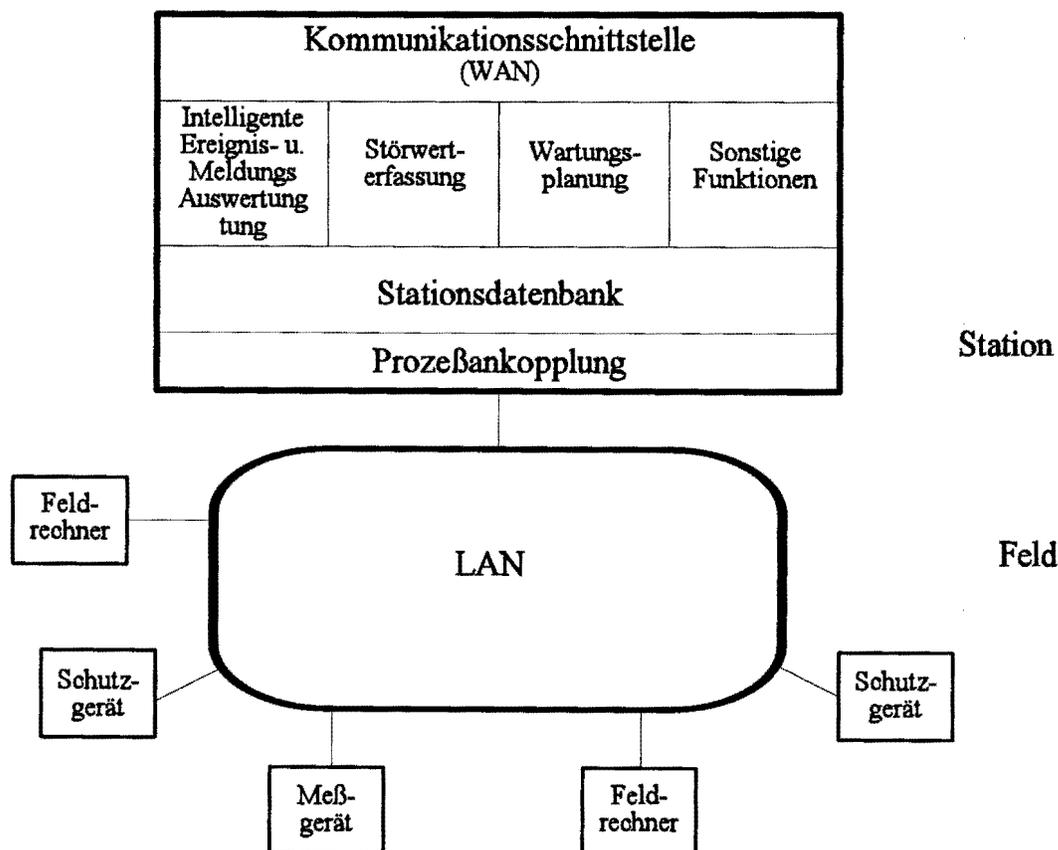
Nachdem in den vergangenen Jahren die Automatisierung der Stationen durch den Einsatz der integrierten Stationsleittechnik auf der Ebene des Transportnetzes durchgeführt wurde, dehnen sich diese Automatisierungsbestrebungen inzwischen auch auf die Verteilungsnetze aus. Erzeugt die integrierte Stationsleittechnik im Transportnetz in den Netzleitzentralen bereits eine Fülle an Informationen, so wird diese in den Netzleitzentralen des Verteilungsnetzes noch erheblich zunehmen, da die Anzahl überwachter Stationen hier im allgemeinen wesentlich größer ist. Die vollständige Übertragung, die korrekte Auswertung und Verarbeitung dieser Informationen gestaltet sich aufgrund



**Bild 4.27:** Hierarchische Struktur der Leittechnik in der Energieversorgung

dieser Menge schwierig, wenn die gesamten Informationen zur sicheren und wirtschaftlichen Betriebsführung genutzt werden sollen. Ziel muß es daher sein, die anfallenden Informationen und Daten möglichst nahe am Ort der Entstehung zu verarbeiten und an die übergeordnete Stelle gefilterte Informationen und Diagnosen weiterzuleiten. Diese Vorverarbeitung der Informationen erfordert den Einsatz intelligenter Systeme in der Stationsleittechnik und läßt sich mit dem Schlagwort "Intelligente Stationsleittechnik" beschreiben.

In Bild 4.27 ist die derzeitige Organisationsform der Leittechnik in Energieversorgungsnetzen dargestellt. Aufgrund der streng hierarchisch aufgebauten Organisation mit einer zentralen Datenhaltung in der Netzleitstelle und keiner Kopplung zwischen den Stationen bildet diese Netzleitstelle den Engpaß für die Übertragung, Verarbeitung und Auswertung der Informationen und Daten aus dem zugeordneten Netzbezirk. Dieser Engpaß ist für diese Organisationsform systeminhärent. Aus diesem Grunde wird für die intelligente Stationsleittechnik eine dezentrale Organisationsform untersucht. Bild 4.28 skizziert den konzeptionellen Aufbau einer Station.



**Bild 4.28:** Stationskonzept der intelligenten Stationsleittechnik

In jeder Station befindet sich eine Datenbank, die alle Daten, die für die betreffende Station anfallen, verwaltet. Diese Datenbank wird über die Prozeßankopplung, die auch die Aufgaben der Fernsteuerung beinhaltet, mit den Daten aus den Felder aktualisiert. Alle datenliefernden und ferngesteuerten Geräte der Felder (z.B. Schutzgeräte, Feldrechner, Meßgeräte etc. ) kommunizieren über ein Local Area Network (LAN) mit der Station. Auf die Daten dieser Stationsdatenbank greifen verschiedene leittechnische Funktionen zu (Intelligente Ereignis- und Meldungsverarbeitung, Störwerterfassung, zustandsabhängige Wartungsplanung etc. ). Diese Funktionen führen die beschriebene intelligente Informationsverarbeitung durch und schreiben ihre Ergebnisse in die Stationsdatenbank zurück.

Die Stationen und die zugeordnete Netzleitstelle eines Netzbezirks sind durch ein Wide Area Network (WAN) verbunden. Die Kommunikation einer Station wird vollständig durch die Kommunikationsschnittstelle abgewickelt. Über dieses WAN sendet die Netzleitstelle die Steuerbefehle zu den Stationen und hat Zugriff auf die gerade benötigten Daten, Informationen und Diagnosen, die in einer Station vorliegen. Darüberhinaus ergibt sich durch diese Vernetzung für die Stationen die Möglichkeit, miteinander zu kommunizieren und Informationen (z.B. im Falle einer Störung) von benachbarten Stationen abzufragen. Auf diese Weise kann die intelligente Informationsverarbeitung in den Stationen noch erweitert und verfeinert werden.

Für dieses Stationskonzept ist ein streng modularer Aufbau, der sich an den verschiedenen Aufgaben und Funktionen orientiert, vorgesehen, so daß es nach dem Baukastenprinzip an die unterschiedlichen Anforderungen an eine Station im Verteilungsnetz angepaßt werden kann. In einer großen und wichtigen Station, in der sehr viele Informationen anfallen, können für die beschriebenen Aufgaben und Funktionen jeweils eigene vernetzte Rechner eingesetzt werden. In kleineren Stationen kann dagegen nur ein Teil der beschriebenen Aufgaben und Funktionen realisiert werden, für die in diesem Fall die Leistungsfähigkeit eines einzigen kleinen Rechners auf PC-Basis ausreichend sein kann.

Durch den Verzicht auf speziell für die Energieversorgung entwickelte Standards und durch die Verwendung der im Bereich der Telekommunikationstechnik entwickelten Standards (IEC-870 etc.) für den Aufbau und Betrieb des WAN bzw. LAN, ergibt sich

die Möglichkeit preisgünstige standardisierte Hard- und Software einzusetzen und von den enormen Entwicklungen in diesem Bereich auch in Zukunft zu profitieren. Darüberhinaus besteht dann die Möglichkeit die freien Kapazitäten des WAN nach Freigabe des Telekommunikationsmonopols der Bundespost an andere Interessenten zu vermieten.

Die Daten und Informationen über eine Station müssen dem zuständigen Personal in der Netzleitzentrale sowie dem mobilen Personal vor Ort in der Station in einer geeigneten Form klar und übersichtlich präsentiert und visualisiert werden. Zur Erfüllung dieser Anforderungen bietet sich die Multimedia-Technik an. Der Gewinn durch den Einsatz dieser Technik ist hierbei nicht allein in der Visualisierung der Daten und Informationen begründet, sie bietet dem Personal eine intuitive Benutzerführung, da die dargestellten Objekte in ihrer Darstellung sehr stark den realen Objekten angepaßt sind. Durch die Integration verschiedenster Kommunikationsmedien (Telefon, Papier-Ordner, Video-Überwachung, Schalttafel, Übersichtstafel etc.) in ein Medium, dem Rechner und Monitor des Bedieners, wird deren Nutzung für den Bediener wesentlich vereinfacht und schnellere Entscheidungen in kritischen Situationen werden ermöglicht.

A. Koel

#### 4.3.3 Standardfehler-Analyse für ein Störwerterfassungssystem

Störwerterfassungsgeräte (SWE-Geräte) bieten die Möglichkeit einer detaillierten Aufklärung von Störungsabläufen durch die Auswertung von Momentanwertverläufen. Die Integration einer SWE-Zentrale in einem unternehmensweiten Rechnernetzwerk und die Kopplung der Störwerterfassung mit einer Betriebsmitteldatenbank und einem graphischen Netzdokumentationssystem (CAD/CAE) führt zu einem SWE-System, mit dem die Parametrierung der Datenerfassung, die Auswertung der Meßdaten und das Berichtswesen wesentlich erleichtert werden.

Störwerterfassungsgeräte erzeugen typischerweise ein großes Datenvolumen. Die Realisierung eines Störwerterfassungssystems mit einer in Formaten und Inhalten einheitlichen Datenbasis ermöglicht eine automatisierte Analyse der Meßdaten aus einer

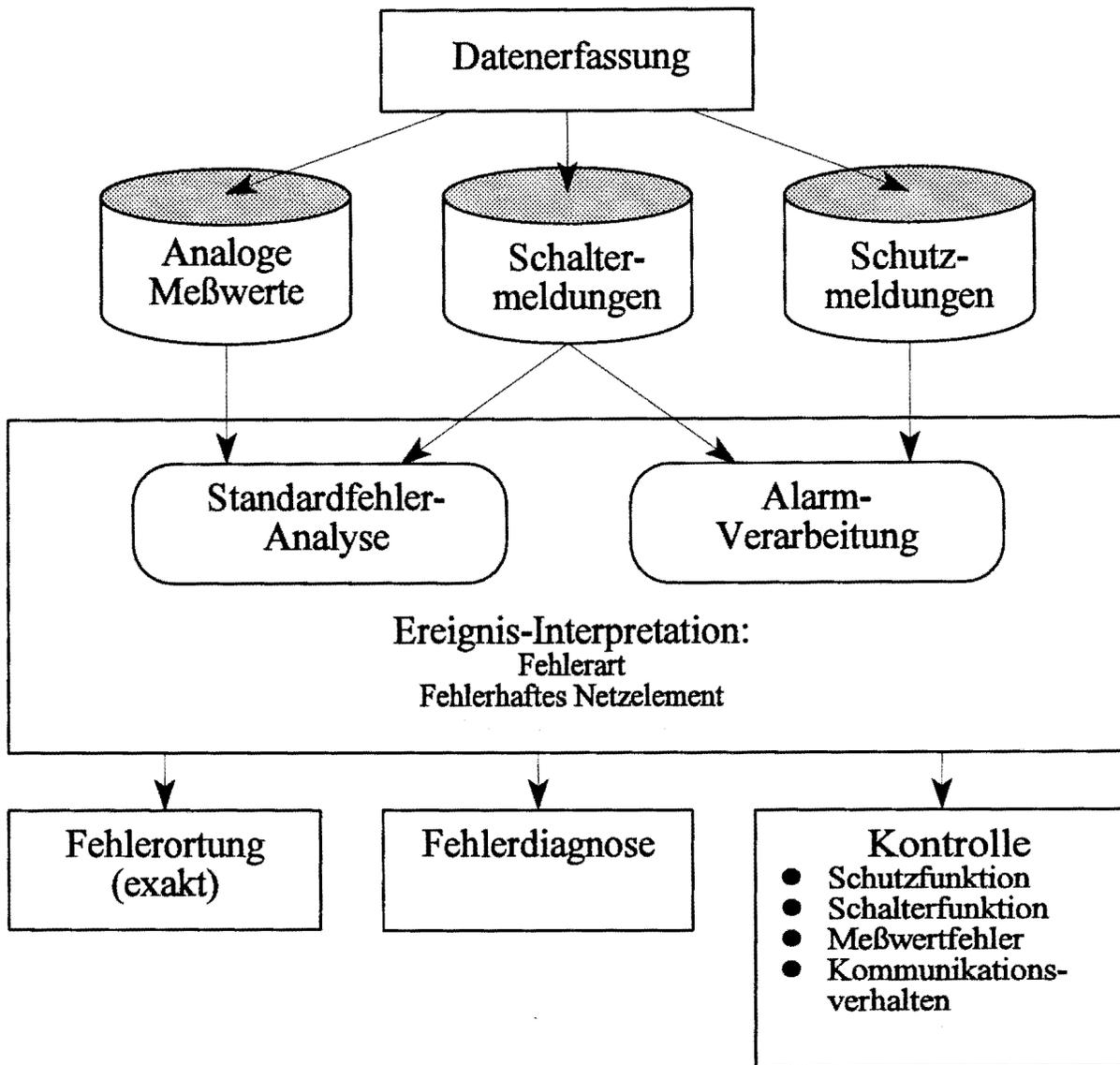
netzübergreifenden Sicht. Im Vordergrund der Analyse der Meßdaten steht nicht eine einfache Reduzierung der Rohdaten, sondern eine Daten-Klassifizierung, die aus den Meßdaten die darin enthaltene Information selektiert. Damit ergibt sich eine verbesserte Sicht auf die Rohdaten, die unverändert für eine detaillierte Auswertung benutzt werden können.

Von besonderer Bedeutung für die Auswertung der Meßdaten von Störwerterfassungsgeräten ist die Fehleranalyse. Im Gegensatz zu den üblicherweise eingesetzten binären Schutzmeldungen sind die von den SWE-Geräten aufgezeichneten analogen Meßdaten Primärdaten und stellen eine mächtige Informationsbasis dar, die auch Aussagen über ein elektrisch fernes Gebiet erlaubt. Sie ermöglichen eine verbesserte Fehlerortung auch bei unvollständiger Eingangsinformation und einen Konsistenztest der Binärmeldungen. Der Störwerterfassung kommt aufgrund der Aufzeichnung von Primärdaten eine Kontrollfunktion des Leitsystems bezüglich Schutz-, Schalter- und Kommunikationsverhalten und der zugrundegelegten Netzmodellierung zu. Die automatisierte Auswertung der analogen Meßdaten der Störwerterfassung sollte durch Nutzung anderer Algorithmen diversitär redundant zum Leitsystem sein. In Bild 4.29 ist die getrennte Analyse der analogen Meßwerte und der Schutzmeldungen dargestellt, deren Ergebnisse sich im Rahmen der Ereignis-Interpretation kontrollieren und ergänzen.

Zur Analyse der analogen Meßwerte wird ein als Standardfehler-Analyse bezeichnetes Verfahren entwickelt, dem folgende Prinzipien zugrundeliegen:

- Verwendung von möglichst viel Prozeßinformation (Meßwerte),
- Nutzung von Redundanzen zur Meßfehlerkorrektur,
- Berücksichtigung der Unsicherheit von Netzparametern,
- Analyse der quasistationären Zustände der Meßwerte,
- diversitäre Redundanz gegenüber der Auswertung der Binärmeldungen,
- Selbstbewertung der Güte der Diagnose.

Durch die Einbeziehung aller verfügbaren analogen Meßwerte in die Analyse wird eine robuste Fehlerzustandsbestimmung erreicht. Es sollen nur stark ausgeprägte Standardfehler analysiert werden; damit kann ein vereinfachtes Netzmodell verwendet werden. Das Ziel der Standardfehler-Analyse ist die Ermittlung eines geprüften, konsistenten Datensatzes mit Angabe der Fehlerart, des fehlerbehafteten Netzelements, der aktuellen Topologie, grober Meßfehler und aller Meßorte, die vom Fehler beeinflusst werden.



**Bild 4.29:** Auswertung der analogen Meßwerte im Rahmen der Fehleranalyse

Basierend auf diesen Angaben können weiterführende Analysen, wie beispielsweise die Analyse des Schutzsystemverhaltens, durchgeführt werden. Die Standardfehler-Analyse wird unter Verwendung von Methoden der Künstlichen Intelligenz realisiert. Eine explizite Verarbeitung unsicherer Daten und Modellansätze ist dabei unumgänglich, um angeben zu können, wann die Standardfehler-Analyse auf unzureichender Grundlage operiert und somit die Aufgabe der Auswertung der Daten dem Anwender übertragen werden muß.

Im Rahmen der Standardfehler-Analyse müssen verschiedene Hypothesen über den Systemzustand anhand der analogen Meßwerte bewertet werden. Um die Forderungen nach einer Verarbeitung von Unsicherheiten und einer Selbstbewertung des Systems

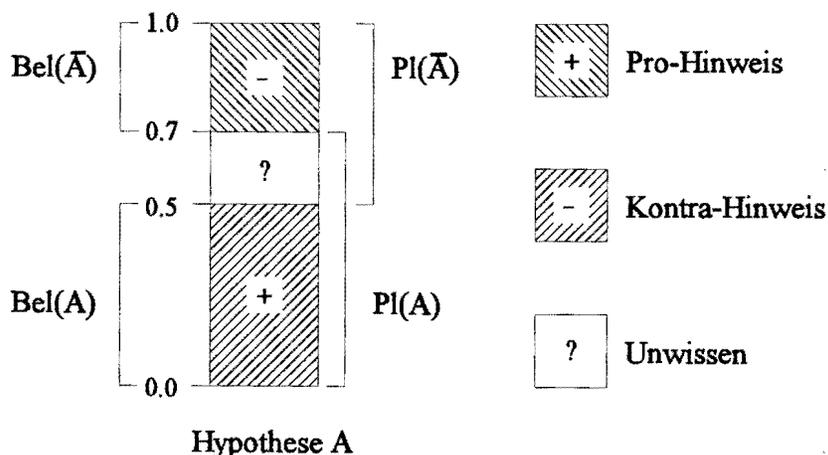
erfüllen zu können, wird die Evidenztheorie verwendet. Die Evidenztheorie ermöglicht die Auswertung unterschiedlicher, eventuell sogar widersprüchlicher Angaben und eine explizite Modellierung unbekannter Fakten. Es werden zwei Typen von Glaubensmaßen zur Bewertung der Hypothesen verwendet:

- das "Sicherheitsmaß" *Bel* (degree of **B**elief) stellt ein positives Verdachtsmoment dar, das nur unmittelbar belastende Fakten berücksichtigt,
- das "Plausibilitätsmaß" *Pl* repräsentiert ein mögliches Verdachtsmoment, das alle Hinweise einbezieht, die der betrachteten Hypothese nicht widersprechen.

Unter Verwendung dieser beiden Größen wird die Bewertung einer Hypothese auf die Angabe eines "Plausibilitätsintervalls" erweitert, das als minimales Glaubensmaß das Sicherheitsmaß *Bel* und als maximales Glaubensmaß das Plausibilitätsmaß *Pl* enthält. Zwischen den dualen Größen *Bel* und *Pl* gilt in bezug auf eine bestimmte Hypothese *A* folgende Beziehung:

$$Bel(A) = 1 - Pl(\bar{A}); \quad Pl(A) = 1 - Bel(\bar{A})$$

Damit ist es möglich, die für viele praktische Anwendungen wichtige Trennung von Aussagen über eine Hypothese *A* und über deren Komplement  $\bar{A}$  zu vollziehen. Anschaulich wird durch die Differenz zwischen *Pl(A)* und *Bel(A)* der Grad der Unsicherheit der Bewertung dargestellt. Die totale Unwissenheit wird durch ein Sicherheitsmaß  $Bel(A) = 0$  und ein Plausibilitätsmaß  $Pl(A) = 1$  repräsentiert. Die Evidenztheorie bietet den mathematischen Rahmen für die Kombination der Bewertung unterschiedli-



**Bild 4.30:** Bewertung einer Hypothese mit der Evidenz-Theorie

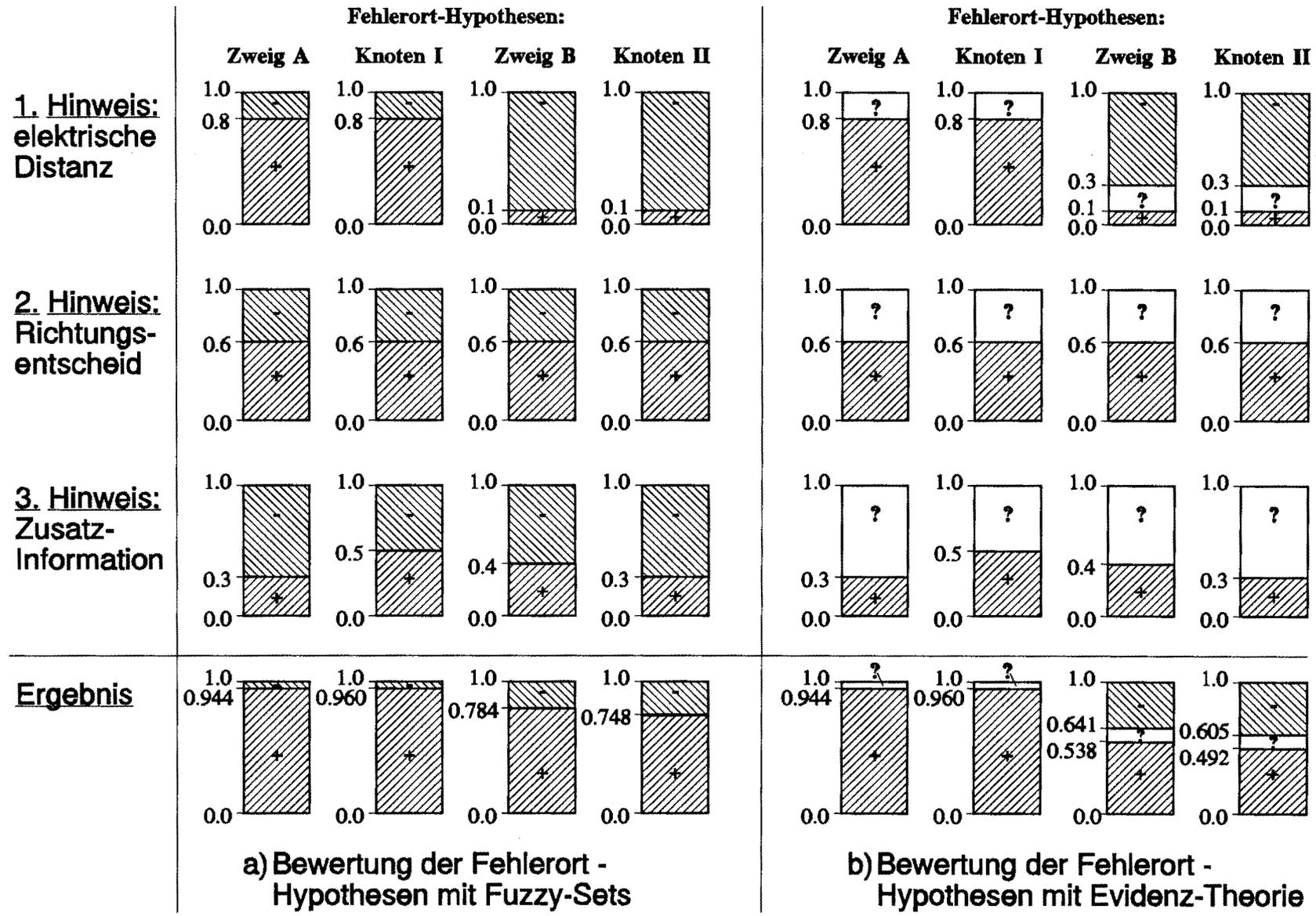
cher Hinweise. Anschaulich läßt sich die Bewertung einer Hypothese wie in Bild 4.30 darstellen. Es werden Maßzahlen für Pro-Hinweise, Kontra-Hinweise und Unwissen vergeben, die sich zu 1 addieren. Darauf aufbauend lassen sich die Größen  $Bel(A)$ ,  $Pl(A)$ ,  $Bel(\bar{A})$  und  $Pl(\bar{A})$  bestimmen.

Im Rahmen der Standardfehler-Analyse wird eine Bewertung einer Menge von Fehler-Hypothesen mit Sicherheits- und Plausibilitätsmaßen entsprechend der Evidenztheorie durchgeführt. Eine Fehler-Hypothese umfaßt dabei Angaben über die Fehlerart, den Fehlerort und grob falsche Meßwerte. Die Fehleranalyse verwendet Betrags- und Phaseninformationen der quasistationären Zustände der Spannungen und Ströme und Schaltermeldungen. Die Fehleranalyse wird in drei Schritten vorgenommen, wobei in jedem Schritt die Fehler-Hypothesen unter Hinzuziehung erweiterter Eingangsinformationen weiter eingegrenzt werden. Im ersten Schritt, der Fehlerartbestimmung, wird die Fehlerart mit Hilfe von Fuzzy-Regeln, die auf einfachen Fehlermustern basieren, aus den Knotenspannungen erkannt. Der zweite Schritt, die Grobdiagnose, bestimmt auf Basis der Knotenspannungen, der Stromrichtungen und der Netztopologie unter Verwendung eines autonomen Systems eine Gruppe möglicherweise fehlerbehafteter Elemente. Im letzten Schritt, der Feindiagnose, wird der Fehlerort unter Verwendung der Netzparameter und der Betrags- und Phaseninformation der Spannungen und Ströme weiter eingegrenzt.

Zum Abschluß soll noch einmal der Einsatz der Evidenztheorie bei der Bewertung von Hypothesen bezüglich des Fehlerorts an einem Beispiel dargestellt werden. Hierzu werden drei Hinweise ausgewertet:

- Auswertung der elektrischen Distanz,
- Nutzung von Richtungshinweisen (Stromrichtung),
- Zusatzinformationen über eine erhöhte Fehlerwahrscheinlichkeit an bestimmten Orten (beispielsweise durch Gewitterhäufigkeit).

In Bild 4.31 a) wird zunächst die Bewertung von vier Fehlerort-Hypothesen mit Hilfe der Fuzzy-Set-Theorie gezeigt. In diesem Fall wird festgelegt, zu welchem Grad die Hypothese angenommen oder abgelehnt wird. Als Ergebnis können die Fehlerort-Hypothesen entsprechend der Größe der Bewertungen geordnet werden.



a) Bewertung der Fehlerort - Hypothesen mit Fuzzy-Sets

b) Bewertung der Fehlerort - Hypothesen mit Evidenz-Theorie

Bild 4.31: Beispiel zur Bewertung von Fehlerort-Hypothesen

Eine Entscheidung, welches Element als Fehlerort auszuschließen ist, kann nur durch die Festlegung einer absoluten Grenze ( $\alpha$ -cut) für die Bewertung erreicht werden. Somit ergeben sich bei einer Grenze von 0.8 der Zweig A und der Knoten I als Fehlerort. Im Fall der Bewertung der Hypothesen mit der Evidenztheorie nach Bild 4.31 b) ergibt sich ein zusätzlicher Freiheitsgrad, da die Unsicherheit bei der Bewertung der Hypothese modelliert werden kann. Im Beispiel werden die Maßzahlen für die Annahme der Hypothese aus den Fuzzy-Sets übernommen. Für den ersten Hinweis (elektrische Distanz) gilt näherungsweise, daß die Maßzahl zur Ablehnung der Hypothese bei Abnahme der Maßzahl zu ihrer Annahme ansteigt. Im Fall der anderen Hinweise wird angenommen, daß aufgrund des Charakters der Hinweise aus ihnen keine Ablehnung der Hypothese abgeleitet werden kann. Als Ergebnis erhält man bei Betrachtung von *Bel* die gleiche Ordnung der Fehlerort-Hypothesen wie im Beispiel der Fuzzy-Sets. Betrachtet man jedoch die Plausibilitäts-Intervalle, so zeigt sich, daß Zweig B und Knoten II als Fehlerort ausgeschlossen werden können und daß Zweig A und Knoten I als möglicher Fehlerort nahezu gleichwertig sind. Insbesondere kann auf die Festlegung eines Grenzwertes zur Differenzierung der Hypothesen verzichtet werden.

F. Reyer

EV 9406, EV 9449, EV 9453

#### 4.3.4 Diagnose und Schädigungsprognose von Betriebsmitteln für die zustandsbezogene Instandhaltungsplanung

Die Strategie der zustandsbezogenen Instandhaltung sieht vor, Instandhaltungsmaßnahmen nicht nach einem festen Zeitplan durchzuführen, sondern in Abhängigkeit vom tatsächlichen Zustand der Betriebsmittel. Eine Kenntnis des aktuellen Zustandes sowie eine Prognose über die weitere Entwicklung des Zustandes ist somit Voraussetzung für die Realisierung dieser Strategie. Hieraus entsteht die Idee einer kontinuierlichen Zustandserfassung mittels technischer Diagnoseeinrichtungen. Zu diesem Zweck wäre jedoch eine sehr hohe Anzahl von Sensoren notwendig, die sämtliche Zustandsgrößen der Betriebsmittel on-line erfassen und auswerten müßten. Diese Vorgehensweise ist somit aus wirtschaftlichen und technischen Überlegungen nicht durchführbar. Es

müssen vielmehr die entscheidenden Parameter gefunden werden, die die Schädigung der Betriebsmittel umfassend repräsentieren und die mit vergleichsweise wenig Aufwand meßtechnisch erfaßt werden können. Diese Parameter werden im folgenden als Schädigungsparameter bezeichnet. Mit Schädigung soll hier jede Verschlechterung des Zustandes des Betriebsmittels verstanden werden. Die Abnutzung nach DIN 31051 ist demnach als ein konkreter Fall von Schädigung aufzufassen. Bild 4.32 zeigt die Vorgehensweise bei der Auswahl der Schädigungsparameter.

Es werden nur die Schädigungsparameter betrachtet, die für die Funktionsweise des Betriebsmittels von großer Bedeutung sind. Eine Überwachung weiterer Parameter lieferte keine neuen relevanten Informationen für die zustandsbezogene Instandhaltungsplanung. Falls die zeitlichen Veränderungen der ausgewählten Parameter vorhersehbar sind und somit eine Prognose möglich erscheint, kommen diese Parameter für eine Zustandsüberwachung näher in Betracht. Für den Fall, daß die nicht prognostizierbaren Parameter häufig auftretende Schädigungen repräsentieren, können diese nur durch konstruktive Verbesserungen der Betriebsmittel vermieden werden.

Die möglichen Fehler in den Betriebsmitteln können verschiedene Ursachen haben, so daß ihnen unterschiedlich schnelle Schädigungsvorgänge vorhergehen können. Der SF<sub>6</sub>-Verlust bei gasisolierten Leistungsschaltern wird sich z. B. langsamer entwickeln als ein Riß in der Schaltstange. Es ist daher wichtig, zunächst die Parameter zu messen, die den schnellsten Schädigungsverlauf aufweisen, so daß die anderen Parameter erst im Rahmen einer anfallenden Wartung überprüft werden müssen. Sind die Parameter mit der höchsten Schädigungsgeschwindigkeit kontinuierlich on-line überwachbar, ist eine zustandsbezogene Instandhaltungsplanung möglich. Ansonsten müssen weiterhin regelmäßige Inspektionen und Wartungen durchgeführt werden. Die Intervalle werden dabei durch einen statistisch gemittelten Zeitraum festgelegt, der die Dauer bis zum Erreichen eines Grenzwerts der Schädigung widerspiegelt.

Unter Berücksichtigung der oben angegebenen Vorgehensweise wurden Studien zur Überwachbarkeit von Leistungsschaltern und Transformatoren durchgeführt. Bei den Leistungsschaltern standen die SF<sub>6</sub>-Schalter im Vordergrund, da ein Nachrüsten älterer Druckluftschalter nicht wirtschaftlich ist. Ein Einbau von Sensorik rentiert sich in der Regel nur, falls sie bei der Konstruktion der Schalter vorgesehen wird. Das Ergebnis

dieser Studien zeigt, daß wichtige Baugruppen der Betriebsmittel on-line überwachbar sind. Zum heutigen Zeitpunkt können jedoch bei weitem nicht alle notwendigen Schädigungsparameter mit vertretbarem Aufwand überwacht werden. In die Betriebsmittel eingebaute Sensoren können folglich nicht die einzige Informationsquelle für eine Diagnose darstellen.

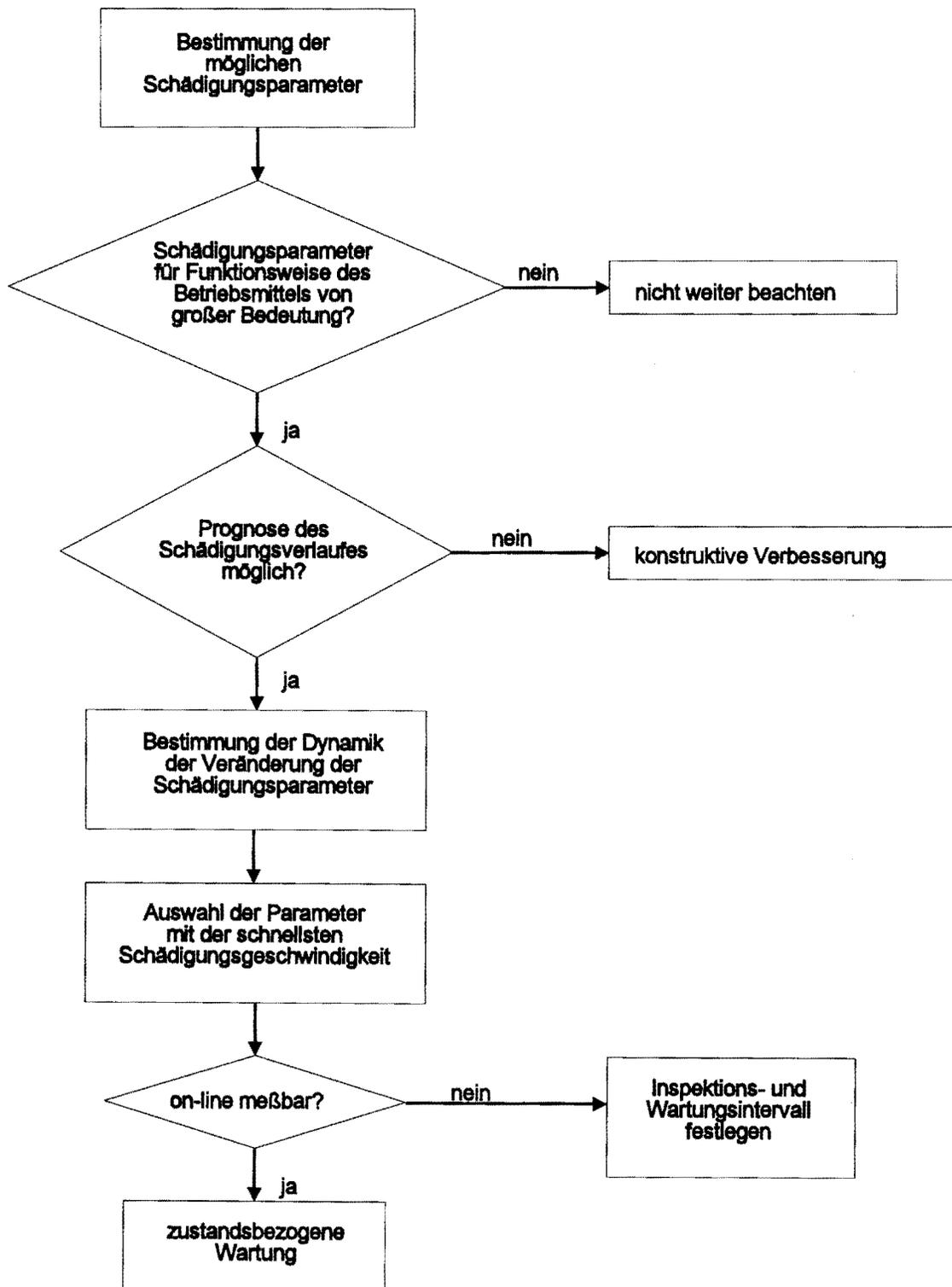
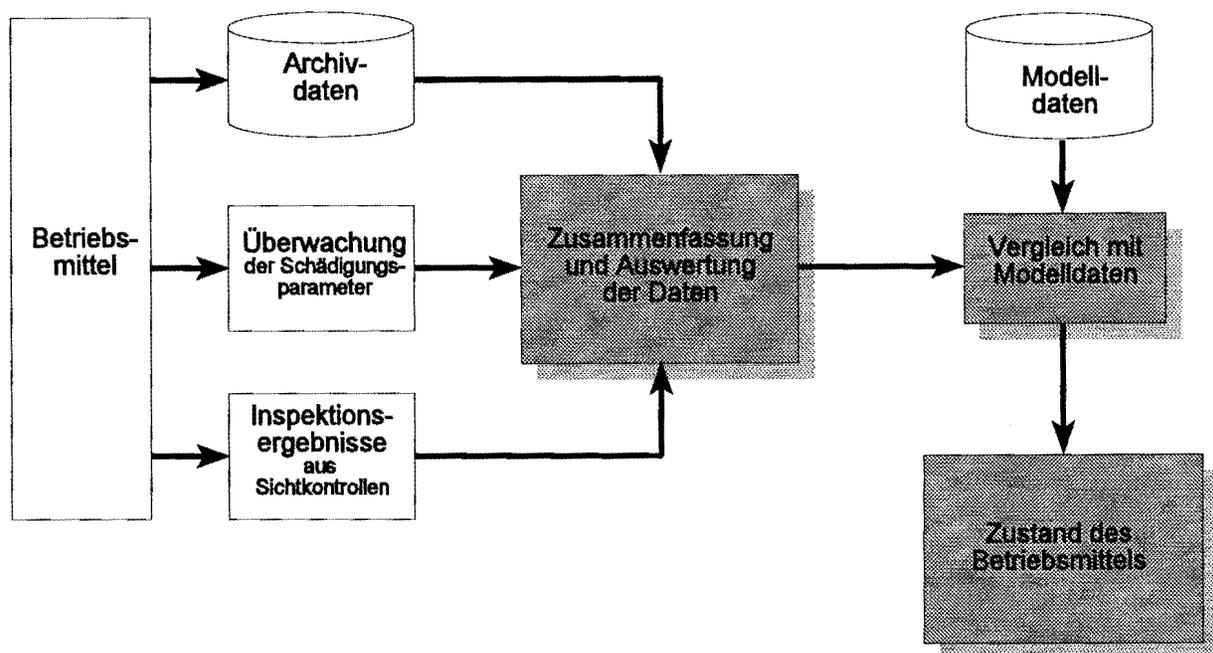


Bild 4.32: Auswahl der Schädigungsparameter

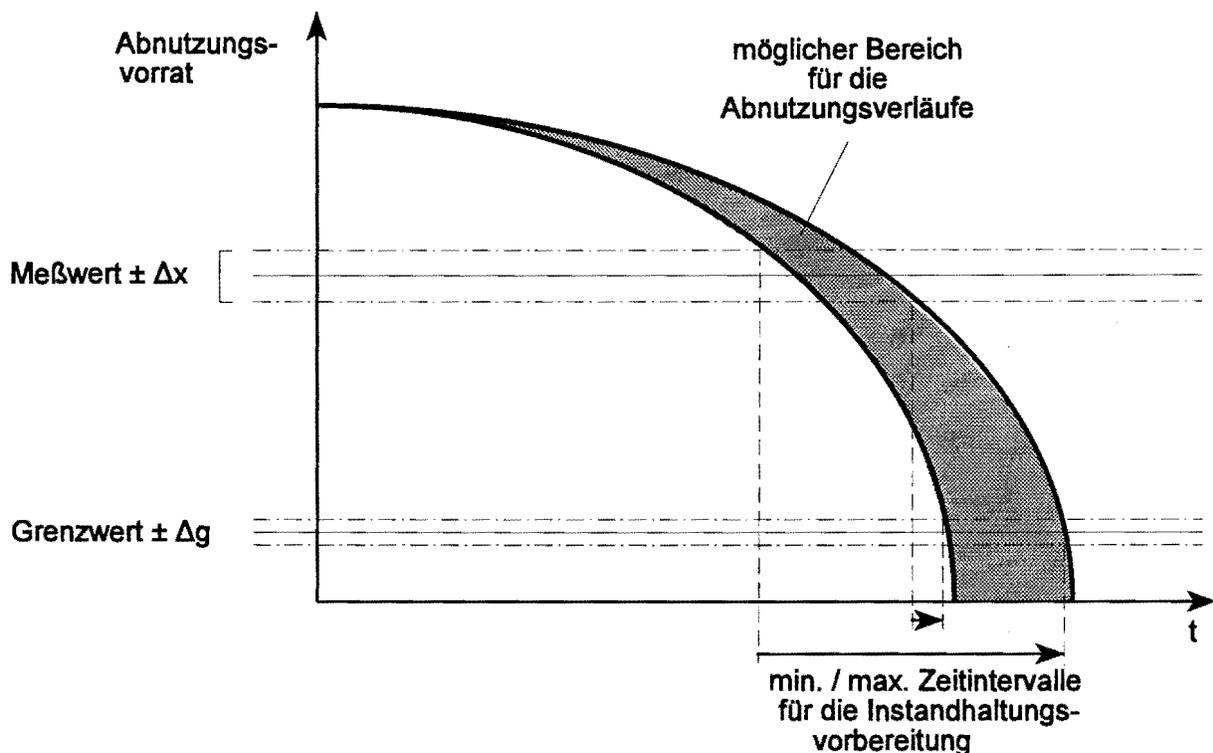
Trotz Überwachung der Schädigungsparameter kann daher nicht auf Sichtkontrollen und die Erfahrung von Betriebspersonal verzichtet werden. Fehlerstatistiken sowie Herstellerangaben stellen weitere Informationsquellen zur Planung von Instandhaltungsmaßnahmen dar. Bild 4.33 zeigt, welche Informationsquellen folglich für eine Zustandsbestimmung berücksichtigt werden müssen. Nach Zusammenfassung und Auswertung der vorliegenden Information muß der daraus ermittelte Zustand mit Modelldaten verglichen werden, um den aktuellen Zustand in den prognostizierten Schädigungsverlauf einordnen zu können.



**Bild 4.33:** Zustandsbestimmung eines Betriebsmittels

Neben der Messung der Parameter und Bestimmung des aktuellen Zustands ist die Prognose des zukünftigen Zustandsverlaufs der Schädigungsparameter von zentraler Bedeutung für die zustandsbezogene Instandhaltungsplanung. Für eine Prognose ist ein mathematisches oder heuristisches Modell erforderlich. Da ein mathematisches Modell des zeitlichen Verlaufs der Schädigung in der Regel nicht vorliegt, müssen sich die erforderlichen Daten auf die Erfahrungen der Hersteller stützen sowie auf Daten und Modelle vergleichbarer Betriebsmittel älterer Baureihen. An dieser Stelle wird deutlich, daß i. a. für eine Prognose nur Modelle mit großen Unsicherheitsfaktoren zur Verfügung stehen. Für eine automatisierte Prognose ist die Quantifizierung der Unsicherheiten

notwendig. Hierfür bieten sich sowohl klassische als auch innovative Methoden der Informationsverarbeitung wie z. B. die Statistik, die Fuzzy-Set-Theorie, Künstliche Neuronale Netze oder die Evidenztheorie (Dempster-Shafer-Theorie) an. Ein möglicher prognostizierter Verlauf des Abnutzungsvorrats als Beispiel für eine Schädigung ist in Bild 4.34 dargestellt. Es zeigt sich, daß die Unsicherheiten nicht nur im Schädigungsmodell selbst liegen, sondern ebenfalls in der Ungenauigkeit der Messung und in der Festlegung des zulässigen Grenzwerts.



**Bild 4.34:** Unsicherheitsfaktoren bei der Prognose des Schädigungsverlaufs

Für die Prognosen der zukünftigen Verläufe der Schädigungsparameter sind nur Bereiche angebar, die mit einer noch zu quantifizierenden Unsicherheit behaftet sind. Hieraus ergeben sich minimale sowie maximale Zeitintervalle für die Vorbereitung von notwendigen Instandhaltungsmaßnahmen, die zur Vermeidung einer sich abzeichnenden Störung zur Verfügung stehen.

Die Fortsetzung des Projektes sieht vor, die o. g. Methoden der Informationsverarbeitung im Hinblick auf die Möglichkeit einer Prognose der Schädigung zu untersuchen, um daraus den Instandhaltungsbedarf der Betriebsmittel abzuleiten. Aus dem Instand-

haltungsbedarf muß im folgenden ein Instandhaltungsplan erstellt werden, der nach ausgewählten Kriterien optimiert wird.

W. Hoffmann, U. Neumann

EV 9428

Dieses Forschungsprojekt wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert und in Kooperation mit der Bergakademie Freiberg sowie der Fraunhofer Einrichtung IITB, Dresden, bearbeitet.

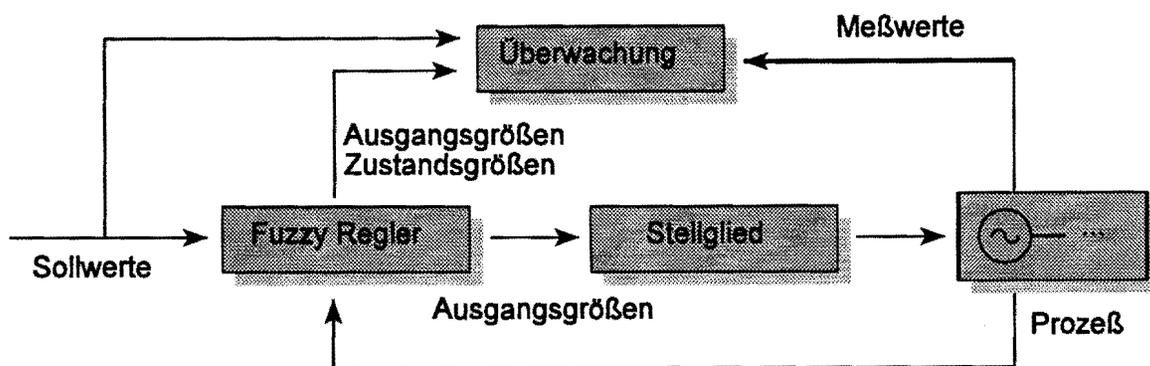
#### 4.3.5 Eine Überwachungskomponente für Fuzzy Regler in der Kraftwerkstechnik

Im Hinblick auf eine Verbesserung der dynamischen Stabilität elektrischer Energieversorgungssysteme sind für die konventionelle Erregungsregelung von Synchrongeneratoren ergänzende Komponenten entwickelt worden. Durch die Nichtlinearität eines elektrischen Energieversorgungssystems begründet sind viele dieser Regeleinrichtungen für um einen bestimmten Betriebspunkt linearisierte Modelle optimiert. Diese linearen Regeleinrichtungen weisen den Nachteil auf, daß sie unter Umständen für bestimmte Betriebszustände nicht den Anforderungen entsprechend wirken können, da der Arbeitspunkt, für den das Betriebsverhalten optimiert wurde, nicht mehr gültig ist.

Ein alternatives Konzept der Erregungsregelung, das diesen Ansprüchen gerecht werden kann, ist basierend auf der Fuzzy Set Theorie als Fuzzy Regler realisiert worden. Dieser Fuzzy Regler übernimmt dabei in einer Komponente die Aufgabe der Erregungsregelung, sowie die Dämpfung von Polradpendelungen.

Um die Funktionalität eines Fuzzy Reglers zu gewährleisten und basierend auf seinem Betriebsverhalten eine Nachoptimierung durchführen zu können, ist eine Überwachungseinheit erforderlich, die gegebenenfalls Parameteränderungen und Modifikationen der Ausgangsgröße realisiert und archiviert. Eine Überwachungskomponente muß dabei Fehler im Rahmen von Hardwareausfall und Fehlerreaktion der Reglersoftware erkennen.

Entsprechend der Vielzahl der möglichen Fehlerquellen und äußeren Einflüsse existieren problembezogene Ansätze, Störungen zu erkennen und deren Einfluß auf den Prozeß zu bewerten. Eine Überwachungskomponente arbeitet mit den selben Meßdaten, die auch dem zu überwachenden Regler zur Verfügung gestellt werden. Weitere Informationen über die Funktionalität können aus internen -wenn verfügbaren- Zustandsgrößen und Ausgangsgrößen des Reglers gewonnen werden (Bild 4.35).



**Bild 4.35:** Fuzzy Regler und Überwachungskomponente

Eine Möglichkeit der Realisierung einer Überwachungskomponente zur Gewährleistung der Reglerfunktionalität im Gesamtsystem ist die Bereitstellung zusätzlicher (redundanter) Hardware, auf der jeweils parallel zum zu überwachenden Regler eine Reglersoftware mitläuft, die zusammen mit einer Auswerteinheit die Möglichkeit bietet, zu unterscheiden, ob der installierte Regler plausible Ausgangsgrößen bereitstellt. Eine Auswerteeinheit, die diese Aufgabe wahrnimmt, kann durch Heuristiken ein multikriterielles Entscheidungsproblem im Rahmen der Funktionalitätsprüfung und -überwachung lösen.

Dieses Verfahren kann sowohl auf der Ebene der Meßwertempfänger, als auch für die vollständige Reglerhardware konstruiert werden. Dabei können hardwareseitige Fehler im Bereich der Meßwertumformer ebenso detektiert werden, wie Fehler in der Softwaresteuerung der Reglerhardware. Der apparative Aufwand dieser Lösung ist beträchtlich und nicht zuletzt kostenintensiv, da hier sorgfältig geprüft werden muß, wie viele redundante Hardwarekomponenten erforderlich sind.

In der Nachbildung des Prozesses durch einen Beobachter besteht eine weitere Möglichkeit, eine Überwachungseinrichtung zu realisieren. Aus einem Vergleich zwischen Prozeß und Modell können dabei Kriterien bezüglich der Funktionalität des Reglers abgeleitet werden. Ein Abbild des Prozesses ist aufgrund der Komplexität eines elektrischen Energieversorgungssystems nur eingeschränkt und vereinfachend möglich, so daß die hieraus abgeleiteten Kriterien im Hinblick auf ihre Aussagekraft grundsätzlich hinterfragt werden müssen.

Die Kombination von Teilaspekten beider Ansätze zur Realisierung einer Überwachungskomponente bietet hier die Möglichkeit, durch redundante Reglerhardware die grundlegende Funktionalität im Bereich der Erregungsregelung zu überprüfen. Die Bestimmung der Eingangsgrößen des Fuzzy Reglers kann anhand eines Modells überprüft werden. Zur Ableitung von Maßnahmen aus dem Verlauf der Stellgröße können Heuristiken verwendet werden, anhand derer nach einer Systemanregung beurteilt werden kann, ob der installierte Regler im Sinne einer Systemstabilisierung arbeitet.

Es ist zunächst eine Teillösung entwickelt worden, die im Rahmen von Funktionalitätsstudien eines bestehenden Fuzzy Reglers für die Erregungsregelung eingesetzt werden kann, um zu überprüfen, ob und welche Ergänzungen bzgl. dieser Einrichtung gemacht werden müssen. Die Überwachungskomponente ist in den Reglerzyklus integriert. Als Hardwareplattform wurde ein 80386 Industrie-PC gewählt. Da der Fuzzy Regler auf dynamische Vorgänge im Netz reagieren soll, wird bei der Meßdatenerfassung ein Frequenzbereich von 47 Hz bis 53 Hz berücksichtigt, was zu einer maximalen Abtastdauer von 21.3 ms führt.

Dirk Westermann

#### 4.3.6 Steuerung und Prozeßvisualisierung für ein Drehstromnetzmodell

Bei der Entwicklung und Überprüfung von Regel- und Schutzeinrichtungen ist der Einsatz eines analogen Netzmodells sinnvoll. Hierzu steht ein Drehstromnetzmodell mit 3 Kraftwerkseinheiten, 1 Netzeinspeisung, 7 Leitungen und 3 Verbrauchernachbildungen zur Verfügung. Um die Steuerung des Modells flexibler und leichter den jeweiligen Er-

fordernissen anzupassen, wurden die Steuer- und Regeleinrichtungen durch Rechnersteuerungen ersetzt. Für die Implementierung neuer Reglerkonzepte, zum Beispiel Fuzzy-Regler für die Erregelungsregelung von Synchronmaschinen, sind entsprechende Hard- und Softwareschnittstellen vorhanden.

Eine weitere Aufgabenstellung ist die Prozeßvisualisierung und -steuerung des Modells in Verbindung mit lokalen Rechnernetzwerken Bild 4.36. Für diese Aufgaben werden zur Zeit die Leistungsfähigkeit und die Einsatzmöglichkeiten kommerzieller Softwarepakete untersucht. Ein wichtiger Aspekt ist in diesem Zusammenhang die Vernetzung der Betriebsmittel, wobei die für elektrische Energieversorgungssysteme bestehenden Hierarchiestrukturen berücksichtigt werden. Das Drehstromnetzmodell kann zum Beispiel als Ergänzung zu digitalen Netztrainingssimulatoren eingesetzt werden.

W. Horenkamp

EV 9432, EV 9433

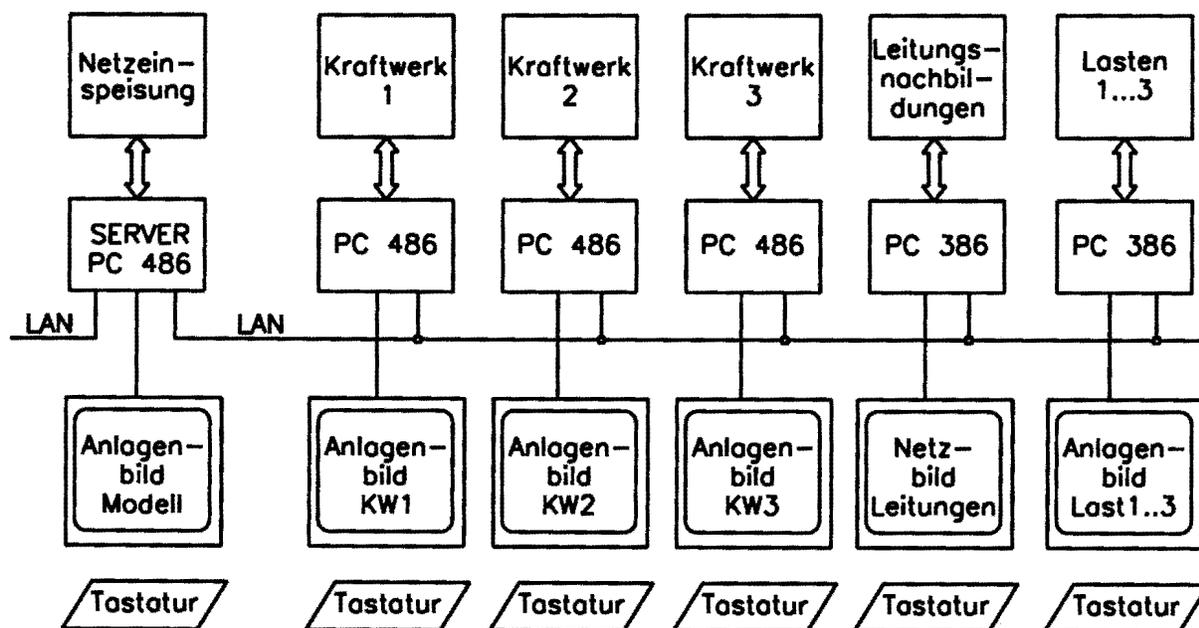


Bild 4.36: Struktur der Netzmodellsteuerung und Vernetzung

## 5. VORTRÄGE

### 5.1 Beiträge für das Kolloquium

- 26.01.1994 Frau Dr. Dagmar Niebur, EPF Lausanne  
"Neurocomputer für den Betrieb elektrischer Energieversorgungssysteme"
- 10.05.1994 Dipl.-Ing. Thomas Stephanblome, Universität Dortmund  
"Integration eines supraleitenden magnetischen Energiespeichers (SMES) in die Netzregelung"
- 31.05.1994 Dipl.-Ing. Ulrich Schlücking, Universität Dortmund  
"Parallelrechnergestützte Simulation elektrischer Energieübertragungssysteme"
- 21.06.1994 Dipl.-Ing. Jochen Handke, Universität Dortmund  
"Koordination zwischen Mittelfrist- und Langfristoptimierung"
- 05.07.1994 Dipl.-Ing. Dirk Blume, Universität Dortmund  
"Integriertes System zur Beurteilung von Netzzrückwirkungen"
- 06.09.1994 Prof. Newton Bretas, Universität Sao Carlos, Brasilien  
"Real time instability prediction through adaptive time series coefficients"
- 24.11.1994 Prof. Dr. A. Gamm, Siberian Energy Institute, Irkutsk  
"Some new methods for real-time control of EPS"
- 14.12.1994 Dr. E.L. Schüppstuhl, Degussa AG Frankfurt  
"Eine Perspektive für eine kostengünstige Elektrizitätsversorgung"

## 5.2 Vorträge von Lehrstuhlmitgliedern

- 8.02.1994 W. Hoffmann  
"Einsatzmöglichkeiten Künstlicher Neuronaler Netze in der elektrischen Energieversorgung", Vortrag im Rahmen eines Workshops im Hause Siemens, Nürnberg
- 24.02.1994 D. Westermann  
"Last- und Einspeisungsmodul für einen Trainingsimulator für Künstliche Neuronale Netze", Vortrag im Rahmen der NEUPRO Projekt Evaluierung in Bremen
- 24.02.1994 D. Kuhlmann  
"Meldungsverarbeitung mit Künstlichen Neuronalen Netzen", Vortrag im Rahmen der NEUPRO Projekt Evaluierung in Bremen
- 22.03.1994 D. Westermann  
"Einsatz von Fuzzy Reglern in der Kraftwerkstechnik", Vortrag im Rahmen des GMA-Aussprachetage "Fuzzy Control" in Langen
- 25.07.94 J. Handke  
"Transformer Tap Position Estimation and Bad Data Detection Using Dynamic Signal Modelling", Vortrag im Rahmen des PES/IEEE Summer Meeting, San Francisco, USA
- 28.07.94 J. Handke  
"Coordination of Long- and Short-Term Generation Planning", Vortrag im Rahmen des PES/IEEE Summer Meeting, San Francisco, USA
- 06.09.1994 E. Handschin  
"An Expert System for the Control of Short-Circuit Power in High Voltage Systems", Vortrag im Rahmen des "6th International Symposium on Short Circuit Currents in Power Systems", Liege, Belgien
- 08.09.1994 D. Kuhlmann  
"Fault Location in Electrical Energy Systems using Artificial Neural Networks", Vortrag im Rahmen der Konferenz "Intelligent System Application to Power Systems ISAP'94", Montpellier, Frankreich

- 21.09.1994 Th. Fabian  
"Integration von Speichersystemen in elektrische Netze unter besonderer Berücksichtigung regenerativer Energieerzeugungsanlagen", Vortrag im Rahmen des Berichtskolloquiums im DFG-Schwerpunktprogramm "Neue Speicher- und Leitsysteme zur gesicherten elektrischen Energieversorgung" in Wuppertal
- 26.09.1994 W. Hoffmann  
"Integration of an Expert System for Security Assessment into an energy management system", Vortrag im Rahmen des EES-UETP Seminars "Artificial intelligence application to the operation of electrical energy systems" in Lausanne.
- 27.09.1994 W. Hoffmann  
"AI-Techniques applied for Alarm Handling - Expert Systems and Artificial Neural Networks", Vortrag im Rahmen des EES-UETP Seminars "Artificial intelligence application to the operation of electrical energy systems" in Lausanne.
- 17.10.1994 E. Handschin  
"Electromagnetic Compatibility in Low Voltage Networks", Vortrag im Rahmen des EES-UETP Seminars "Electromagnetic Compatibility in Electric Energy Systems" in Lissabon, Spanien.
- 28.10.1994 E. Handschin  
"Network Integration of Dispersed Fuel Cell Power Plants", Vortrag im Rahmen des EES-UETP Seminars "Planning and Operation of MV Distribution Networks with a Large Penetration of Small Dispersed Production" in Madeira, Portugal.
- 14.12.1994 M. Langer  
"State Estimation Techniques", Vortrag im Rahmen des EES-UETP Seminars "Distribution Automation, Load Management and Quality of Supply" in Sariselkä, Finnland.
- 15.12.1994 E. Handschin  
"Voltage Flicker", Vortrag im Rahmen des EES-UETP Seminars "Quality of Service: Present Practice and Future Trends" in Manchester, Großbritannien.

## 6. VERÖFFENTLICHUNGEN UND BERICHTE

### 6.1 Veröffentlichungen

*E. Handschin, W. Hoffmann, F. Reyer, U. Schlücking, Th. Stephanblome, D. Westermann, S.S. Ahmed: "A New Method of Excitation Control Based on Fuzzy Set Theory", IEEE-PES, Vol. 9, No. 1, S. 533-539, Februar 1994*

The synthesis of the structure of the PSS and its parametrization are based entirely on methods of linear system theory. Thus the desired effect of the PSS is limited to a bounded area around one system operating point. The use of the controller based on fuzzy set theory introduces an event controlled excitation of the synchronous machine taking into account the power system operation. The desired response of the fuzzy controller is given by a set of rules which are obtained from the limits of the voltage regulator and the undesired performance of the conventional excitation control. A fuzzy controller has been developed for which simulation results are provided. These results support the concept of a fuzzy controller for the purpose of excitation control. They show that a well designed fuzzy controller is superior to a fast excitation control with an additional PSS.

*E. Handschin, J. Handke, K. Linke, H.-H. Sanders: "Koordination der lang- und mittelfristigen Kraftwerkseinsatzplanung mit Hilfe der Fuzzy-Logik", Elektrizitätswirtschaft, Jg. 93 (1994), Heft 5, S. 204-210*

Die Verfasser beschreiben eine neue Methode zur praktisch anwendbaren Koordination von Lang- und mittelfristiger Kraftwerkseinsatzplanung. Der Ansatz beruht auf der Verwendung von Pseudopreisen als Koppelvariable, unsichere Eingangsinformationen werden hierbei mit der Theorie unscharfer Mengen verarbeitet. Weiterhin diskutieren sie verschiedene Aspekte des vorgeschlagenen Ansatzes und untersuchen die Anwendung an realen Systemdaten.

*E. Handschin, Th. Stephanblome, D. Westermann: "Einsatz von Fuzzy-Reglern in der Kraftwerkstechnik", VDI-Bericht 1113, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1994*

Aufgrund steigender Kraftwerksblockleistungen und schneller Erregersysteme gewinnt die Verbesserung der dynamischen Stabilität elektrischer Energieübertragungssysteme zunehmend an Bedeutung. Bei Schalthandlungen und Fehlern treten Wirkleistungs- und damit einhergehende Polradpendelungen auf. Durch eine Nutzung der schwachen Kopplung zwischen Spannung und Wirkleistung können kraftwerksseitig über Erregungsregler zusätzliche dämpfende Momente an der Generatorwelle erzeugt werden. Hierzu werden zusätzliche Komponenten zur konventionellen Erregungsregelung eingesetzt, die bei großen Abweichungen von einem ausgezeichneten Arbeitspunkt unangepaßt oder sogar schwingungsanfachend wirken können.

*E. Handschin, Th. Stephanblome: "Elektrische Energiespeicher als Bindeglied zwischen Erzeugung und Verbrauch", ETG-Fachbericht 51, S. 199-209, VDE-Verlag Berlin/Offenbach, April 1994*

Aufgrund der zentralen Bedeutung der Regelstrategie in bezug auf die Realisierung der an SMES gestellten Anforderungen ist gerade im Hinblick auf den Einsatz von Pendeldämpfungsgeräten (PSS) und SMES und unter Berücksichtigung verschiedener Netzbetriebszustände die Annahme einer Entkopplung von Wirk- und Blindleistungsvorgängen nicht zulässig. Die explizite Berücksichtigung der Robustheit und der Anforderungen an SMES im Frequenzbereich bei Wahrung einer hohen Transparenz des Entwurfsalgorithmus, der auch die systemimmanenten Kopplungen zwischen Wirk- und Blindleistungsvorgängen beinhaltet, wird durch einen Reglerentwurf mittels der  $H_{\infty}$ -Theorie erbracht. Anhand des SMES-Einsatzes in einem Modellnetz wird gezeigt, inwieweit die an SMES gestellten Anforderungen unter besonderer Berücksichtigung der Robustheit des geschlossenen Regelkreises realisiert werden.

*E. Handschin, E. Kliokys: "Transformer Tap Position Estimation and Bad Data Detection using Dynamic Signal Modelling", Proceedings of the IEEE/PES Summer Meeting 1994, 94 SM 509-0 PWRS, San Francisco, 1994*

Tracking estimation of a transformer tap position is considered. Estimation algorithm incorporating additional information about dynamic behaviour of the measurements and tap positions is developed. It is based on the simultaneous state and tap position estimation method augmented by measurement prefiltering based bad data detection and incorporation of a tap position dynamics model into the estimation algorithm. Increased bad data identification reliability and the robustness of the estimates to the measurement noise is obtained. The performance of the algorithm has been examined using the IEEE 30 and 118-node systems.

*E. Handschin, J. Handke, K. Linke, H.-H. Sanders: "Coordination of Long- and Short-Term Generation Planning in Thermal Power Systems", Proceedings of the IEEE/PES Summer Meeting 1994, 94 SM 583-5 PWRS, San Francisco, 1994*

This paper outlines a practical coordination approach of long- and short-term optimization. Pseudo prices are used as coupling variables. To take uncertainty aspects into account, fuzzy set theory is incorporated to evaluate the pseudo prices. In the paper, various aspects of the proposed approach are discussed, and its application to a real utility system is illustrated.

*E. Handschin, C. Damschen, Ch. Rehtanz, Th. Stephanblome: "Effective and Economic Improvement of Voltage Stability by a SMES", Proceedings of the ECC-Seminar "Bulk Power System Voltage Phenomena - III", Davos (CH), 23.-27. August 1994*

There is an increasing interest in applying superconducting magnetic energy storage (SMES) within electric energy systems. This paper deals with SMES application for the provision and activation of seconds reserve power and the improvement of voltage stability. A system engineering approach is used for optimizing and evaluating the SMES locations and control concepts for enhancing short term and mid term dynamics. The results are illustrated by means of a 2 GW model power system within an interconnected system.

*E. Handschin, W. Bayer, H. Kürten, H.E. Vollmar, U. Radtke, W. Taube, M. Kleimaier, Th. Stephanblome:* "Technical and economical aspects of SMES application to power system operation and control", 1994 Session Papers of the CIGRE-Conference, 39/11-05, Paris, 1994

There is an increasing interest in applying superconducting magnetic energy storage (SMES) within electric energy systems. This paper deals with SMES application for the provision and activation of seconds reserve power and the improvement of short term power system dynamics. The economic properties of SMES are assessed for the provision of seconds reserve power and compared with conventional measures. A system engineering approach is used for optimizing and evaluating the SMES locations and control concepts for enhancing short and mid term dynamics. The results are illustrated by means of a 10 GW system within the UCTPE network.

*E. Handschin, W. Hoffmann, D. Kuhlmann:* "An Expert System for the Control of Short-Circuit Power in High Voltage Systems", Proceedings of the 6th International Symposium on "Short-Circuit Currents in Power Systems" in Liège, Belgium, 06.09.1994

This paper deals with the development of a knowledge-based system for the control of short-circuit power in high voltage systems. It is based on an expert system shell especially developed for applications to power systems. Applications like contingency analysis, corrective switching, alarm handling and fault location have been realised. Following to an analysis of short-circuit power control, rules for finding remedial control actions are presented. The use of generic statements makes it possible to apply the expert system to different power networks and changing network topologies.

*E. Handschin, W. Hoffmann, D. Kuhlmann:* "Fault Location in Electrical Energy Systems Using Artificial Neural Networks", Proceedings of ISAP '94 in Montpellier, France, 08.09.1994

In this paper a new Artificial Neural Network (ANN) based solution of the task of alarm-processing and fault location will be presented. The approach is based on ANNs specially trained for dealing with certain electric devices. The alarm-processing system

consists of several device specific ANNs (DS-ANN) for devices like lines, busbars, transformers, etc. The ANNs are trained without any respect to topological information. An exchange of intermediate diagnosis between different ANNs allows to cope with incomplete alarm patterns. Due to the modular approach the ANN-based system for alarm-processing might be easily adapted to topological changes in the energy system under consideration without retraining the ANNs.

*E. Handschin, J. Handke: "Fuzzy-Optimierung in der elektrischen Energieversorgung", VDI/GET-Tagung "Optimierung in der Energieversorgung: Methoden, praktische Erfahrungen und neue Möglichkeiten" in Stuttgart, 18.-19.10.1994*

Im Rahmen der Arbeit wird die Anwendung der Fuzzy-Optimierung in elektrischen Energieversorgungsnetzen betrachtet. In einem kurzen Rückblick werden die Einsatzgebiete der Fuzzy-Optimierung diskutiert. Detailliert wird auf einen Ansatz zur Lösung des Problems der wirtschaftlichen Lastaufteilung auf der Basis der Fuzzy-Set-Theorie eingegangen. Hierbei werden zu der unscharf vorgegebenen Lastprognose unscharfe Blockleistungen als Ergebnis der Optimierung bestimmt.

*E. Handschin: "Zentrale und dezentrale Bahnstromversorgung - ein Vergleich", ÖVE Verbandszeitschrift e & i, 111. Jg. (1994), H. 5, S. 212-219*

Während im Bereich der Deutschen Bundesbahn (DB) ein zentrales Versorgungskonzept aufgebaut worden ist, wählte die Deutsche Reichsbahn (DR) sowohl aus politischen als auch aus technischen Gründen ein dezentrales Versorgungssystem. Zur Wiedervereinigung der beiden Teile Deutschlands im Oktober 1990 gehört auch die Zusammenführung der DB und der DR. Aus diesem Anlaß werden die beiden Konzepte, die der Bahnstromversorgung zugrunde liegen, sowohl von der technischen und betrieblichen wie auch von der wirtschaftlichen Seite miteinander verglichen. Die Bewertung von Vor- und Nachteilen erfolgt vor dem Hintergrund des notwendigen Ausbaus einer leistungsfähigen Bahnstromversorgung, um die aus operationeller Sicht wichtigen Zukunftsvorhaben des Bahnbetriebs - Ausbau des Personennahverkehrs in Ballungsgebieten, Aufbau eines europäischen Hochgeschwindigkeits-Bahnnetzes,

Ausbau des Güterfernverkehrs für hohe Geschwindigkeiten, Realisierung eines leistungsfähigen Alpentransits - realisieren zu können.

*H.-H. Graf, M. Heine, D. König, R. Sörgel:* "Lastflußrechnung mit zeitgesteuerter Lastvorgabe", etz, Bd. 115(1994), Heft 7-8, S. 418-424

Ausgehend von den allgemeinen Anforderungen an eine praxisgerechte Lastflußrechnung werden spezielle Notwendigkeiten zur Berechnung des Lastflusses in Mittelspannungsnetzen dargestellt. Bei dem System für die Lastvorgabe bei Netzsimulationen zu vorgegeben Zeitpunkten, beeinflussen die Ganglinien die Lastvorgabe. Die Werte aus diesen Ganglinien wählt eine Simulationsuhr aus, die wesentliche Informationen aus einer speziellen Kalenderfunktion entnimmt.

## 6.2 Forschungsberichte

*A. Böhmer:* "Realisierung eines Fuzzy Reglers für die Erregungsregelung", EV 9404

*M. Langer:* "CENTREL - Erfassung und Archivierung von Meßdaten", EV 9409

*Th. Fabian, G. Niggemeier:* "SOIUS - Simulation und Optimierung integrierter elektrischer Energieversorgungssysteme mit innovativer Energieumwandlung und Speicherung", EV 9410

*Ch. Rehtanz:* "Auswertung und Evaluation von Netzversuchen in einem internationalen Verbundnetz", EV 9419

*U. Neumann:* "Einführung in die Evidenztheorie", EV 9428

*D. Kuhlmann, D. Westermann:* "Neuronale Systeme zur Analyse und Bedienung von komplexen technischen Echtzeitsystemen - Teil 2: Voruntersuchungen", EV 9447

*A. John, D. Westermann:* "Different Approaches for Fuzzy Excitation Control", EV 9448

*E. Handschin:* "Moderne Leittechnik als Voraussetzung für eine wirtschaftliche und zuverlässige Betriebsführung", EV 9450

*A. J. Gaul:* "Steuerung speichernder Lasten mit Methoden der Künstlichen Intelligenz - Teil 1: Lasten und Steuerungsmöglichkeiten", EV 9455

### 6.3 Diplomarbeiten

*T. Türkucar:* "Technische und wirtschaftliche Bewertung der 220-kV-Ebene im Transportnetz", EV 9401

*A. Böhmer:* "Realisierung eines Fuzzy Reglers für die Erregungsregelung", EV 9403

*A. Jorch:* "Fehlerortung mit Methoden der Statistik und der Fuzzy-Set-Theorie", EV 9406

*M. Bömer:* "Synthese eines ereignisorientierten SMES-Regelungskonzepts", EV 9407

*Ch. Rehtanz:* "Auswertung und Evaluation von Netzversuchen in einem internationalen Verbundnetz - Evaluation of Staged Tests in Large Interconnected Networks", EV 9408

*C. Halbe:* "Vergleich verschiedener Optimal-Power-Flow-Algorithmen hinsichtlich ihrer Eignung zur Implementierung der Spannungs-Blindleistungsregelung", EV 9412

*Ch. Holzer:* "Einsatz von Sensorik an Leistungsschaltern für die zustandsabhängige Instandhaltungsplanung", EV 9414

*B. Serwe:* "Entwicklung und Realisierung einer graphisch interaktiven Benutzeroberfläche für einen Netztrainingssimulator", EV 9415

*Ch. Fischer:* "Entwicklung eines Programms für die (n-1)-Ausfallsimulation in elektrischen Energieübertragungssystemen mit graphischer Ergebnisdarstellung", EV 9416

*D. Schindowski:* "Programmierung einer Echtzeituhr mit DCF77-Empfänger für Meßsysteme mit AT-Bus-Schnittstelle", EV 9420

*R. Bause:* "Clusteranalyseverfahren auf der Basis Neuronaler Netze", EV 9427

*V. Bühner:* "Entwicklung einer Testumgebung für Künstliche Neuronale Netze für die Meldungsverarbeitung", EV 9431

*O. Jennert:* "Optimierung der Spitzenlastanmeldung unter Berücksichtigung von betrieblichen und technischen Randbedingungen", EV 9435

*M. Schröder:* "SMES-Einsatzplanung in komplexen Netztopologien", EV 9441

*B. Wiesmann:* "Gekoppelte Wirk- und Blindleistungsoptimierung mit Quadratischer Programmierung", EV 9442

*O. Fiene:* "Lagrange Relaxation zur Optimierung des Einsatzes steuerbarer Lasten", EV 9443

*H. Entrup:* "Untersuchung des Einflusses beschränkter Leistungsgradienten bei der kurzfristigen Kraftwerkseinsatzplanung mit Lagrange Relaxation", EV 9444

*K.-D. Prein:* "Systematischer Entwurf von Kurzzeitspeichern in elektrischen Energieversorgungssystemen mit Windkraftanlagen", EV 9446

*D. Kramer:* "Fehlerortung unter Berücksichtigung unvollständiger Topologieinformation", EV 9449

*D. Röhl:* "Entwicklung von Verfahren zur Dimensionierung von Energiespeichern in elektrischen Energieversorgungssystemen mit regenerativer Energieerzeugung", EV 9451

#### 6.4 Studienarbeiten

*O. Fiene:* "Einsatz von Pumpspeicherkraftwerken mit Hilfe wissensbasierter Systeme", EV 9402

*B. Wiesmann:* "Entwicklung eines Lastsimulators zur Validierung der Resultate von Planungsrechnungen bei der Kraftwerkseinsatzplanung", EV 9405

*H. Entrup:* "Einsatz von Pumpspeicherkraftwerken mit Hilfe der Lagrange'schen Relaxation in der mittelfristigen Kraftwerkseinsatzplanung", EV 9411

*M. Hans:* "Anforderungen an ein Netzregelungskonzept unter Verwendung innovativer Informationstechnologien", EV 9413

*K. Obens:* "Entwicklung eines Programms zur Simulation des Verhaltens steuerbarer Lasten", EV 9418

*A. U. Freise:* "Lagrange Relaxation zur Bestimmung von Blockfahrplänen in der langfristigen Kraftwerkseinsatzoptimierung", EV 9421

*T. Gessner:* "Untersuchung der dynamischen Vorgänge während eines Netzzusammenbruchs verursacht durch absinkende Spannungen", EV 9422

*C. Jaborowicz:* "Netz Sicherheitsberechnung mit Parallelrechnern am Beispiel der Ausfallsimulation", EV 9425

*T. Nikodem:* "Erstellung eines Softwarepaketes zur Betriebsmittelbezogenen Lastmodellierung", EV 9426

*F. Joswig:* "Konzeption und Realisierung einer Rechnersteuerung für ein Kraftwerk des Drehstromnetzmodells", EV 9432

*F. Schäfer:* "Realisierung einer Rechnersteuerung für die Leitungsnachbildungen eines analogen Drehstromnetzmodells", EV 9433

*T. Mohamed:* "Analyse der Einsatzmöglichkeiten von Photovoltaikanlagen zur Einsparung von Primärenergie", EV 9452

*Ch. Weber:* "Schnelle Abschätzung des Fehlerortes im elektrischen Energieversorgungsnetz", EV 9453

*C. Häde:* "Möglichkeiten der Zustandsüberwachung von Transformatoren für die zustandsbezogene Instandhaltungsplanung", EV 9454

*J. Schüren:* "Einsatz wissensbasierter Systeme und der Fuzzy Logic zur Zustandsdiagnose elektrischer Betriebsmittel", EV 9456

*M. Osthoff:* "Vergleich unterschiedlicher Ansätze zur Lastprognose mit Neuronalen Netzen unter Verwendung von NeuralWorks", EV 9457

*Th. Böhmer:* "Entwicklung eines interaktiven grafischen Netzbildeditors für verschiedene Rechnerarchitekturen", EV 9458

*F. Wortmann:* "Entwicklung einer grafischen Netzbilddarstellung für verschiedene Rechnerarchitekturen", EV 9459

*O. Gutzeit:* "Einsatzmöglichkeiten von Flexible AC Transmission Systems für die Betriebsführung elektrischer Energieversorgungssysteme", EV 9460

*M. Hagedorn:* "Einsatz der Evidenztheorie für die Zustandsdiagnose von Betriebsmitteln", EV 9461

*A. Richter:* "Erweiterung eines digitalen Testgenerators für die Simulation von Drehstromsystemen", EV 9462

## 7. PROMOTIONEN

*Stephanblome, Thomas:* "Integration eines supraleitenden magnetischen Energiespeichers (SMES) in die Netzregelung"

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

Korreferent: Prof. Dr. P. Komarek

Tag der mündlichen Prüfung: 01. Juni 1994

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein systemtechnischer Ansatz bei der Einsatzplanung von SMES vorgestellt. Dabei ergibt sich die Wirtschaftlichkeit des SMES-Einsatzes aus der Möglichkeit zur Bereitstellung von Wirkleistungssekundenreserve. In diesem Zusammenhang erfolgt die energetische und leistungsmäßige Dimensionierung des SMES entsprechend den Vorgaben in bezug auf die Vorhaltung und Aktivierung von Wirkleistungssekundenreserve in dem betrachteten Netz. Der SMES-Einsatzort ist von entscheidender Bedeutung für die Verbesserung der Kurzzeitdynamik. Ausgehend von einer Eigenwertanalyse wird dargestellt, wie unter Berücksichtigung der Struktur der SMES-Regelung der Einsatzort im Hinblick auf eine Verbesserung bestimmter Vorgänge der Kurzzeitdynamik optimiert werden kann. Aufgrund der zentralen Bedeutung der Regelstrategie in bezug auf die Realisierung der an SMES gestellten Anforderungen werden das Polvorgabeverfahren und der  $H_{\infty}$ -Reglerentwurf, zwei Verfahren aus dem Bereich der linearen Systemtheorie, sowie der Entwurf eines nichtlinearen Fuzzy-Reglers im Zusammenhang mit der Realisierung der SMES-Regelung untersucht. Anhand des SMES-Einsatzes in einem Modellnetz wird gezeigt, inwieweit die an SMES gestellten Anforderungen unter besonderer Berücksichtigung der Robustheit des geschlossenen Regelkreises erbracht werden können.

*Schlücking, Ulrich:* "Parallele Berechnung des Kurzzeitverhaltens elektrischer Energieübertragungssysteme für einen Netztrainingssimulator"

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

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. R. Tracht

Tag der mündlichen Prüfung: 20.06.1994

Bei der Simulation des Übertragungsverhaltens elektrischer Energieübertragungssysteme ist es speziell bei der Betrachtung von Fehlersituationen notwendig, die elektromechanischen Ausgleichsvorgänge im Kurzzeitbereich zu berücksichtigen, um so den Systemzustand nach einer Störung zu bestimmen. Die maßgeblichen Anwendungsgebiete Netztrainingssimulator und dynamische Netzsicherheitsrechnung erfordern, daß diese Berechnung in Echtzeit durchgeführt wird. Im Hinblick auf die Erfüllung dieser Bedingung werden hohe Anforderungen bezüglich der Rechenleistung gestellt, die aus heutiger Sicht nur von Parallelrechnern erbracht werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Lösungsansatz vorgestellt, der eine Echtzeitsimulation des Kurzzeitverhaltens elektrischer Energieübertragungssysteme von mehreren hundert Knoten erlaubt. Ausgehend von der Beschreibung der wesentlichen Modellkomponenten des Kurzzeitbereiches wird die resultierende mathematische Systembeschreibung im Hinblick auf ihre parallele Berechenbarkeit analysiert. Darauf aufbauend werden die mathematischen Verfahren erläutert, die für die parallelrechnergestützte Simulation verwendet werden. Das Innovative dieser Verfahren im Vergleich zu existierenden Lösungsansätzen besteht darin, daß der konventionelle Simulationsablauf dahingehend verändert wird, daß eine neue effektivere Form der parallelen Berechenbarkeit vorliegt. Die Effektivität dieser Verfahren wird sowohl theoretisch als auch anhand von Anwendungsbeispielen belegt. Weiterhin werden die für die Implementierung dieser Verfahren notwendigen Kontrollmechanismen beschrieben und eine speziell auf das Anwendungsgebiet Netztrainingssimulator abgestimmte Echtzeitbedingung und Echtzeitkontrolle vorgestellt.

*Blume, Dirk:* "Informationstechnische Analyse leitungsgebundener Netzurückwirkungen"

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

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. K.H. Schneider

Tag der mündlichen Prüfung: 28.09.1994

Der ständig ansteigende Einsatz von Komponenten der Leistungselektronik in Betriebsmitteln, Verbrauchern und Eigenerzeugungsanlagen in elektrischen Energieversorgungsnetzen führt zu einer zunehmenden Belastung der elektrischen Netze mit leistungsgebundenen Netzurückwirkungen.

Aufbauend auf die Auswertung geltender Normen und Empfehlungen werden die meßtechnischen Randbedingungen zur Analyse leistungsgebundenen Netzurückwirkungen (Oberschwingungen, Flicker und Unsymmetrien) abgeleitet. Zur ganzheitlichen Messung, Analyse und Bewertung der Ergebnisse von Kurz- und Langzeitmessungen werden verschiedenen Verfahren zur Informationsverdichtung abgeleitet, die auf Zeitreihen, relativen Häufigkeiten und Summenhäufigkeiten basieren. Auf der Basis der Summenhäufigkeit werden verschiedene Kennzeichen abgeleitet, die, im Gegensatz zu Beschreibungen einiger ausgezeichneter Punkte, eine eindeutigere Beschreibung und Bewertung von Meßergebnissen zulassen. Mittels einer ausführlichen Messung, die in einem Niederspannungsnetz durchgeführt wurde, wird der Einsatz und die Leistungsfähigkeit des Meßsystems sowie die Aussagekraft der Bewertungsverfahren demonstriert. Auf der Basis des beispielhaften Einsatzes des Meßsystems werden die Vorteile der vollständigen Erfassung des Drehstromsystems erläutert und der Nutzen der parallelen Messung von Spannung und Strom zur Bewertung und Ursachenanalyse vorgestellt.

Ergänzend wird eine Testumgebung vorgestellt, die der Erzeugung simulierter Meßsignale für Test- und Kalibrieraufgaben dient. Die Beschreibung der zu simulierenden Meßsignale erfolgt mittels einer für diesen Zweck definierten Programmiersprache. Mittels dieser Sprache können beliebige Testsignale durch die Überlagerung mathematischer Funktionen erstellt und abschnittsweise zusammengefügt werden. Unter Einsatz eines Leistungsverstärkers werden diese Testsignale direkt über die Meßeingänge eingespeist.

*Handke, Jochen:* "Koordinierte lang- und kurzfristige Kraftwerkseinsatzplanung in thermischen Systemen mit Pumpspeicherkraftwerken"

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

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. J. Voß

Tag der mündlichen Prüfung: 30.09.1994

Aufgrund der Komplexibilität der Problemstellung in der Kraftwerkseinsatzplanung erfolgt zur Lösung der Optimierungsaufgabe eine Unterteilung in hierarchische, zeitlich gegliederte Funktionsblöcke. Neben der dadurch erreichbaren Reduktion der Dimension des Gesamtoptimierungsproblems können bei diesem Vorgehen in den unterschiedlichen Funktionsblöcken die jeweils wichtigen Nebenbedingungen und Optimierungsziele stärker gewichtet werden. Eine oft verwendete Funktionsblockeinteilung umfaßt die Langfristoptimierung, deren Ziel der optimale Energieeinsatz über einen Zeitraum bis zu einigen Jahren ist, die Kurzfristoptimierung, in der der optimale Blockeinsatz für ca. eine Woche festgelegt wird und die Momentanoptimierung, die eine wirtschaftliche Lastaufteilung im Viertelstundenzyklus gewährleisten soll. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein neuer Koordinierungsansatz auf Basis der Fuzzy-Set-Theorie beschrieben, der die Einhaltung der integralen Nebenbedingungen des hierarchisch übergeordneten Funktionsblocks unterstützt. Ein fuzzy-basierter Ansatz wird verwendet, um den Einfluß unscharfer Eingangsdaten wie z.B. der Lastprognose über die Ereignisse des übergeordneten Funktionsblocks berücksichtigen zu können. Für den optimalen Einsatz von Speichern im Bereich der langfristigen Kraftwerkseinsatzplanung wird der mathematische Ansatz auf der Basis der Gemisch Ganzzahligen Linearen Programmierung und eines heuristischen Ranglistenverfahren vorgestellt. Durch die Kombination der beiden Verfahren ist es möglich, auch in der Langfristoptimierung wichtige Nebenbedingungen wie die Reservebedingung und Mindestzeiten, die einen großen Einfluß auf den Einsatz der Spitzenlastkraftwerke haben, zu berücksichtigen. Für die kurzfristige Einsatzplanung wird ein Verfahren der Lagrange-Relaxation abgeleitet, mit dem alle relevanten Nebenbedingungen, insbesondere auch für Speicherkraftwerke, eingehalten werden. Die beschriebenen Verfahren zur Lang- und Kurzfristoptimierung sowie deren Koordination werden anhand verschiedener Testdatensätze verifiziert und diskutiert.