

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



J A H R E S B E R I C H T 1 9 8 6

**JAHRESBERICHT 1986**

Herausgegeben vom

LEHRSTUHL FÜR ELEKTRISCHE ENERGIEVERSORGUNG  
UNIVERSITÄT DORTMUND

o. PROF. DR.-ING. E. HANDSCHIN

Postfach 500 500  
D-4600 Dortmund 50  
Telefon (0231) 755-2396  
Telex 822465 unido

REDAKTION: I. Gasthaus, D. König, P. Stöber

## VORWORT

Der vorliegende Jahresbericht 1986 gibt eine Übersicht über die Tätigkeiten des Lehrstuhls für elektrische Energieversorgung in Forschung und Lehre. Die enge Verbindung dieser beiden Aufgaben ist nur dann gewährleistet, wenn die Anforderungen der Praxis mitberücksichtigt werden. Durch die zahlreichen Kontakte zwischen Universität und Industrie wird diesem Gesichtspunkt große Bedeutung zugemessen. Die sorgfältige Umsetzung einer von der Praxis gestellten Aufgabe in ingenieurwissenschaftliche Forschungsprojekte ist eine wichtige Voraussetzung, um den Technologietransfer auf eine solide Basis stellen zu können. Dabei spielt die moderne Informationstechnik in vielen Bereichen der elektrischen Energieversorgung eine immer wichtiger werdende Rolle. Diese Entwicklung hat auf zahlreiche Projekte einen ganz entscheidenden Einfluß. Durch die zunehmende Verflechtung verschiedener Wissensgebiete kommt einer breiten, interdisziplinären Arbeitsweise eine große Bedeutung zu. Diese setzt voraus, daß die durch die Mikroelektronik eröffneten Möglichkeiten unter dem Aspekt der Anwendbarkeit sorgfältig und umfassend geprüft werden. Dadurch wird es möglich, die heute erforderliche Sicherheit und Zuverlässigkeit bei Planung und Betrieb elektrischer Energieversorgungssysteme sicherstellen zu können. In diesem Zusammenhang spielt die systemtechnische Gestaltung der Leittechnik eine zentrale Rolle bei der Bearbeitung der am Lehrstuhl für elektrische Energieversorgung bearbeiteten Forschungsprojekte. In diesem Zusammenhang sei auf die aktive Mitarbeit in technisch-wissenschaftlichen Verbänden hingewiesen. Auch diese Tätigkeit wird als wichtiger Beitrag für die Verbindung zwischen Theorie und Praxis, Hochschule und Wirtschaft, betrachtet.

E. Handschin

## INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. PERSONAL	7
2. LEHRBETRIEB	8
2.1 Vorlesungen	8
2.2 Seminar	9
2.3 Praktika	10
2.4 Exkursionen	11
3. FORSCHUNGS- UND ENTWICKLUNGSARBEITEN	12
3.1 Software-Entwicklung für die Betriebs- führung und Planung elektrischer Energieversorgungssysteme	12
3.2 Simulation statischer und dynamischer Vorgänge sowie Parameteridentifikation in elektrischen Energieversorgungssystemen	29
3.3 Schutz- und Leittechnik	48
4. VORTRÄGE	67
4.1 Beiträge für das Kolloquium	67
4.2 Vorträge von Lehrstuhlmitgliedern	67
5. NATIONALE UND INTERNATIONALE BEZIEHUNGEN	69
6. VERÖFFENTLICHUNGEN UND BERICHTE	76
6.1 Veröffentlichungen	76
6.2 Forschungsberichte	78
6.3 Diplomarbeiten	79
6.4 Studienarbeiten	80
6.5 Programmbeschreibungen	81
7. PROMOTIONEN	82

1. PERSONAL

Lehrstuhlinhaber: o. Prof. Dr.-Ing. E. Handschin

Sekretariat: Frau I. Gasthaus

Akademische Gäste: Doz. Dipl.-Ing. D. Dang,  
Technische Universität für  
elektrische Energiesysteme, Jilin

Wiss. Mitarbeiter: Dipl.-Ing. E. Arias  
Dipl.-Ing. Ch. Dörnemann  
Dipl.-Ing. W. Ebbinghaus  
Dipl.-Ing. W. Eghardt  
Dipl.-Ing. F. Eickhoff  
Dipl.-Ing. K. El-Homsi  
Dipl.-Ing. W. Hoffmann  
Dipl.-Ing. D. König  
Dipl.-Ing. A. Kubbe  
Dipl.-Ing. J. Lemaitre  
Dipl.-Ing. P. Stöber  
Dipl.-Ing. H. Slomski

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

Studentische Hilfskräfte: J. Ebert, M. Jakobi,  
Th. Kohlstrung, M. Krabs  
Th. Niemand, G. Nimmrich,  
U. Schlücking, H. Speich  
Ch. Stute

## 2. LEHRBETRIEB

### 2.1 Vorlesungen

Prof. Dr.-Ing. E. Handschin

Elektrische Energietechnik I (WS 1985/86)

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

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

Elektrische Energietechnik II (SS 1986)

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

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

Energieübertragungssysteme I (WS 1985/86)

Wahlpflichtvorlesung für Studenten der Fachrichtungen Energietechnik im 7. Semester.

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

Energieübertragungssysteme II (SS 1986)

Wahlpflichtvorlesung für Studenten der Fachrichtungen Energietechnik im 8. Semester.

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

Prof. Dr.-Ing J. Voß

Elektrizitätswirtschaft und Kraftwerke I (WS 1985/86)

Wahlpflichtvorlesung für Studenten der Fachrichtungen Energietechnik im 7. Semester.

Inhalt: Einführung in die Prozeßautomatisierung; Entwurf von Abtastregelkreisen; dynamisches Verhalten von Kraftwerken; Entwurf einer digitalen Regelung für ein Dampfkraftwerk.

Elektrizitätswirtschaft und Kraftwerke II (SS 1986)

Wahlpflichtvorlesung für Studenten der Fachrichtungen Energietechnik im 8. Semester.

Inhalt: Wirtschaftliche Bewertung von Übertragungselementen und Kraftwerken; Planspiel "Elektrizitätswirtschaft".

Prof. Dr.-Ing. H.Ch. Müller / Prof. Dr.-Ing. H.J. Haubrich

Energieversorgung (WS 1985/86)

Wahlpflichtvorlesung für Studenten der Fachrichtung Energietechnik im 7. Semester.

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

2.2 Seminar

Elektrizitätswirtschaft (Prof. Dr.-Ing. E. Handschin,  
Prof. Dr.-Ing. J. Voß)

Inhalt: Aktuelle Probleme und Fallstudien der Elektrizitätswirtschaft.

Mikroelektronik in der Energietechnik (Prof. Dr.-Ing. E. Handschin, Dipl.-Ing. W. Ebbinghaus)

Inhalt: Meßwerterfassung und -auswertung mit Mikroprozessoren; analoge und digitale Signalverarbeitung.



### 2.3 Praktika

Im Rahmen des von allen Lehrstühlen und Arbeitsgebieten des Fachbereichs Elektrotechnik gemeinsam organisierten Grundlagenpraktikums im 3. und 4. Semester werden vom Lehrstuhl für elektrische Energieversorgung folgende Versuche angeboten:

a) Schutzeinrichtungen

Behandlung der wichtigsten Schutzmaßnahmen beim Anschluß elektrischer Verbraucher.

b) Messung von Energie und Leistung

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

c) Untersuchung von Überstromunterbrechern und Erwärmung von Leitungen

Prüfen verschiedener herkömmlicher Sicherungen, Aufnehmen der Schmelzcharakteristika sowie des zeitlichen Verlaufs von Strom und Spannung einer Schmelzsicherung. Untersuchung des Einflusses der Temperatur auf den Widerstand eines elektrischen Leiters.

Im Rahmen des von allen Lehrstühlen und Arbeitsgebieten des Fachbereichs Elektrotechnik gemeinsam organisierten Fortgeschrittenen-Praktikums im 5. und 6. Semester werden vom Lehrstuhl für elektrische Energieversorgung folgende Versuche angeboten:

a) 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.

b) 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.

c) 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.

d) Lastflußermittlung

Analoge und digitale Simulation eines stationären Netzzustandes. Die Übereinstimmung eines am Netzmodell ermittelten Lastflusses mit einer Lastflußrechnung wird untersucht.

e) Untersuchung der Oberschwingungen von Thyristorstromrichtern

Oberschwingungsströme verursachen an den Impedanzen des Netzes Spannungsabfälle. Diese Spannungen werden für verschiedene Netztypen, die am Netzmodell nachgebildet werden, gemessen und mit den Ergebnissen eines Rechenprogramms verglichen. Der Oberschwingungsstrom sowie die frequenzabhängigen Impedanzen einiger Netzelemente werden meßtechnisch ermittelt.

## 2.4 Exkursionen

- 16.10.-           Energietechnische Exkursion nach Mannheim.  
17.10.1986       Besuch der BBC in Hanau und Mannheim und des  
Großkraftwerks Mannheim  
(gemeinsam mit Prof. Dr.-Ing. D. Peier, Lehrstuhl  
für Hochspannungstechnik und elektr. Anlagen)

### 3. FORSCHUNGS- UND ENTWICKLUNGSARBEITEN

Die im Berichtsjahr 1986 durchgeführten Arbeiten lassen sich den folgenden drei Schwerpunkten zuordnen:

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

Im folgenden werden die einzelnen Forschungsprojekte durch Kurzbeschreibungen vorgestellt, um Problemstellung sowie die bisher erreichten Ergebnisse darstellen zu können.

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

##### 3.1.1 State Estimation mit Mehrprozessorrechnern

Um bei der State Estimation mit Mehrprozessorrechnern zu einer nennenswerten Verkürzung der Rechenzeit gegenüber einer sequentiellen Berechnung zu kommen, ist eine mathematische Aufteilung des Verfahrens zweckmäßig (siehe Jahresbericht 1985). Der sequentielle Algorithmus wird hierbei in einzelne Berechnungsabschnitte gegliedert, die jeweils parallel abgearbeitet werden können. Zur Verminderung der Datenaustauscherfordernisse zwischen den Prozessoren am Ende eines jeden Berechnungsabschnittes hat sich eine Aufteilung der Gleichungssysteme als zweckmäßig erwiesen, die sich an der Topologie des Energieversorgungsnetzwerkes orientiert. Jeder Prozessor berechnet dabei die Gleichungen entsprechend den Netzknoten, die untereinander eine starke Kopplung, zu den Gleichungen in anderen Prozessoren jedoch eine schwache Kopplung (wenige Netzzweigelemente) be-

sitzen. Diese Aufteilung gilt für alle Berechnungsabschnitte einer Iteration und wird über den gesamten Algorithmus beibehalten.

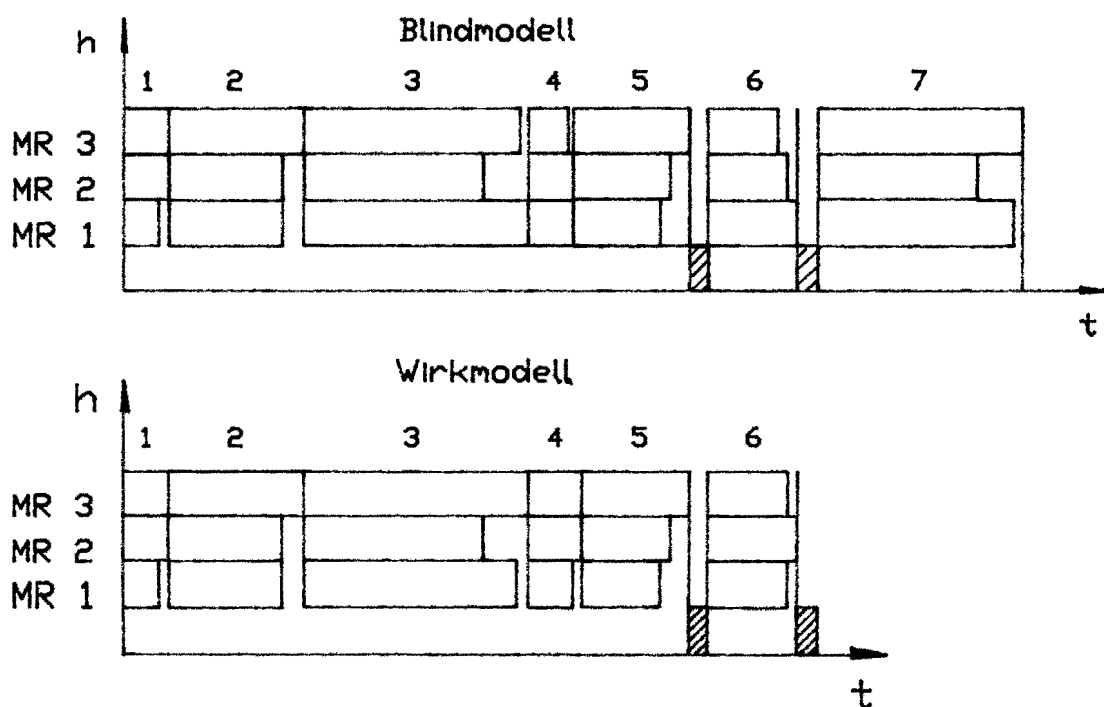
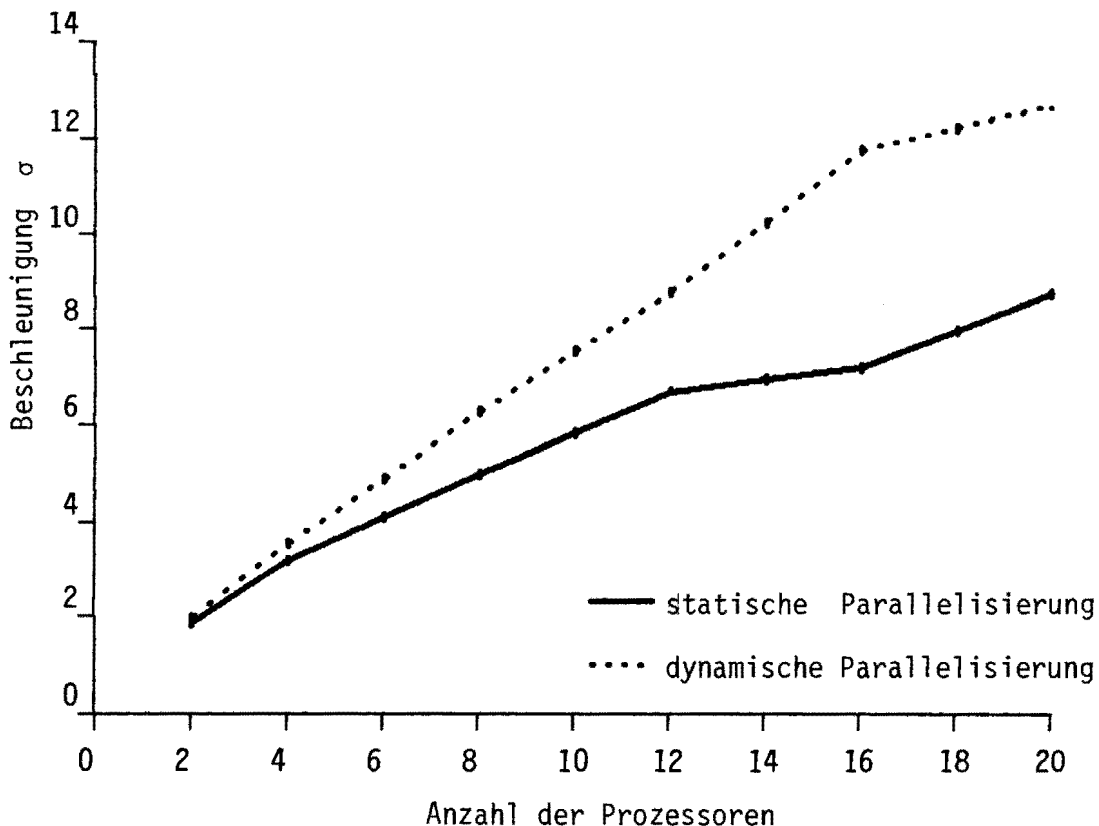


Bild 1: Auftragsprofil eines parallelisierten Algorithmus (entkoppeltes WLS-Verfahren) für 3 Parallelprozessoren

Die statische Parallelisierung eines entkoppelten weighted-least square Algorithmus führt zu einem Auftragsprofil, bei dem die Prozessoren ungleichmäßig ausgelastet sind (Bild 1). In jeder Iteration gliedert sich die Lösung des Blind- und Wirkmodells in 7 bzw. 6 Abschnitte, an deren Ende die Prozessoren zum Austausch der Ergebnisse synchronisiert werden müssen. Die hierdurch bedingten Leerlaufzeiten einzelner Prozessoren, die die Gesamtrechenzeit für den Algorithmus ungünstig beeinflussen, können wesentlich verkürzt werden, wenn die Auftragsverteilung innerhalb der Abschnitte flexibler gestaltet wird. Ein Prozessor, der die ihm zugewiesene Aufgabe gelöst hat, beteiligt sich an der Bearbeitung des Auftragsstapels anderer Prozessoren, deren Berechnung noch nicht abgeschlossen ist. Diese

Vorgehensweise führt zu einer gleichmäßigen Auslastung der Prozessormodule und schlägt sich in einer deutlichen Beschleunigung der Berechnung gegenüber einer rein statischen Auftragsverteilung nieder.

Dieses Parallelisierungsverfahren läßt sich nur bei einem Multiprozessorrechner anwenden, dessen Kommunikationsstruktur sich an die Datenaustauscherfordernisse des Parallelprogrammes anpassen läßt. Das bedeutet, daß die einzelnen Prozessoren entsprechend der Netztopologie und der daraus abgeleiteten Aufgabenverteilung auf die Daten ihrer benachbarten Prozessoren zeitverzögerungsfrei zugreifen können.



**Bild 2:** Beschleunigung der parallelisierten State Estimation eines Netzes mit 118 Knoten und 175 Zweigen der Aufgaben auf  $h$  Prozessoren

Die in Bild 2 dargestellt Beschleunigung der Estimation eines Netzes mit 118 Knoten und 175 Netzzweigen bei unterschiedlicher Auftragshöhe (Anzahl der parallel arbeitenden Prozessoren) zeigen charakteristisch die zu erzielende Verbesserung gegen-

über einer statischen Aufteilung. Eine weitere Steigerung dieser Ergebnisse ist möglich, da beim gegenwärtigen Stand der Untersuchungen noch nicht alle Möglichkeiten der dynamischen Auftragsverteilung ausgeschöpft wurden. So sind die Aufgaben in den Abschnitten 5 und 6 (Bild 1) der Lösung des Wirk- und Blindmodells (Lösung eines linearen Gleichungssystems durch Bi-Faktorisierung) statisch verteilt und führen in diesen Abschnitten noch zu einer schlechten Auslastung dieser Prozessoren.

D. König

EV 8610

### 3.1.2 Anwendungsmöglichkeiten wissensbasierter Systeme in der elektrischen Energietechnik

Die enge Verflechtung vieler Detailprobleme verhindert in der Regel die geschlossene analytische Behandlung komplexer Prozesse. Aus diesem Grunde bedienen sich die Betreiber von Großsystemen wie z.B. elektrischen Energieversorgungsnetzen z.Z. vereinfachender Modelle und insbesondere des durch den Betrieb gewonnenen Erfahrungswissens der Mitarbeiter.

Erfahrungen liegen im allgemeinen als unstrukturierte, fragmentarische Sammlung von Wissen vor. Der Mensch bestimmt mit seiner spezifischen Art der Informationsaufnahme und -verarbeitung die Struktur des Regelwerks. Der permanente Prozeß des Denkens, Lernens und Vergessens begründet eine "Wissensbasis" mit modularer Struktur. Um dem Ziel einer Optimierung im Rahmen eines Prozeßleitsystems näher zu kommen, muß das Expertenwissen dem Rechner vermittelt werden. In der Informatik werden unter dem Titel der "Artificial Intelligence" (AI) vielversprechende Ansätze entwickelt, gerade das genannte Problem zu lösen. Es wird die Auffassung vertreten, eine Sammlung von heuristischen Regeln, wie es das Erfahrungswissen des Fachmanns darstellt, läßt sich am besten in einem "wissensbasierten System" (WS), dem sog. "Expertensystem" repräsentieren.

Im Bereich des Betriebs elektrischer Energieversorgungsnetze gibt es eine Vielzahl möglicher Anwendungsgebiete für wissensbasierte Systeme. Als wichtiges Beispiel wird das Problem der Ausfallsimulation untersucht. Die Regeln, die es erlauben, aus durchgeführten Ausfallsimulationen Ordnungsregeln für die Reihung der Störungen abzuleiten, sind nicht vollständig bekannt. Die spezielle Struktur von WS erlaubt in einfacher Weise, durch die Modifikation des Regelwerks mit verschiedenen Steuerungsstrategien zu experimentieren. Neue, aus dem Systembetrieb gewonnene Erfahrungen, können sofort zur Erweiterung der Wissensbasis genutzt werden.

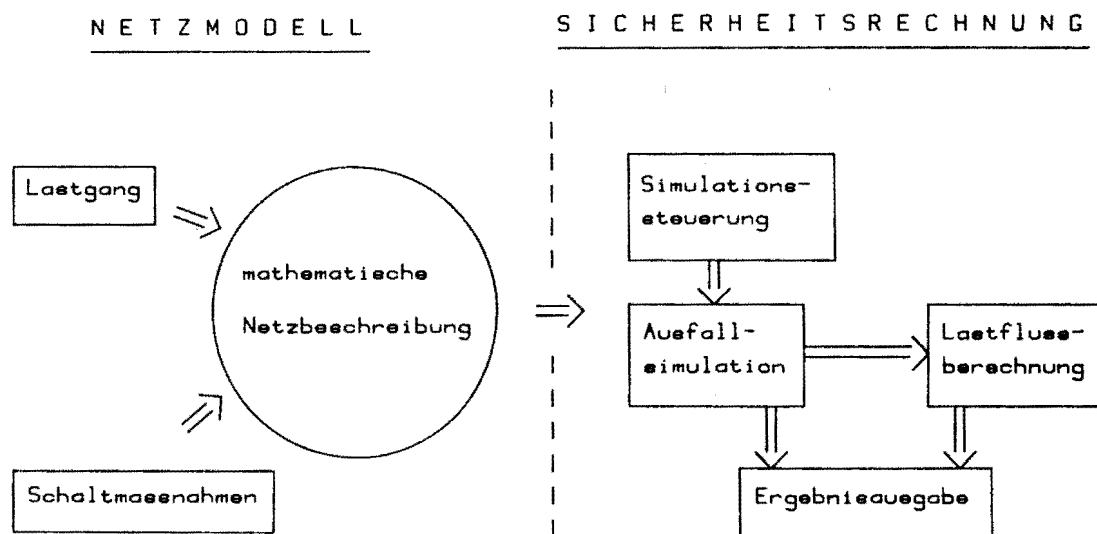
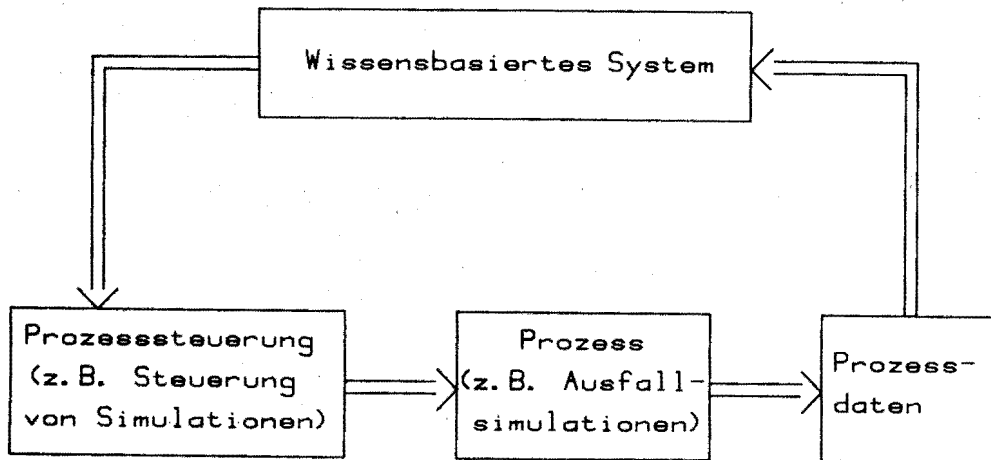


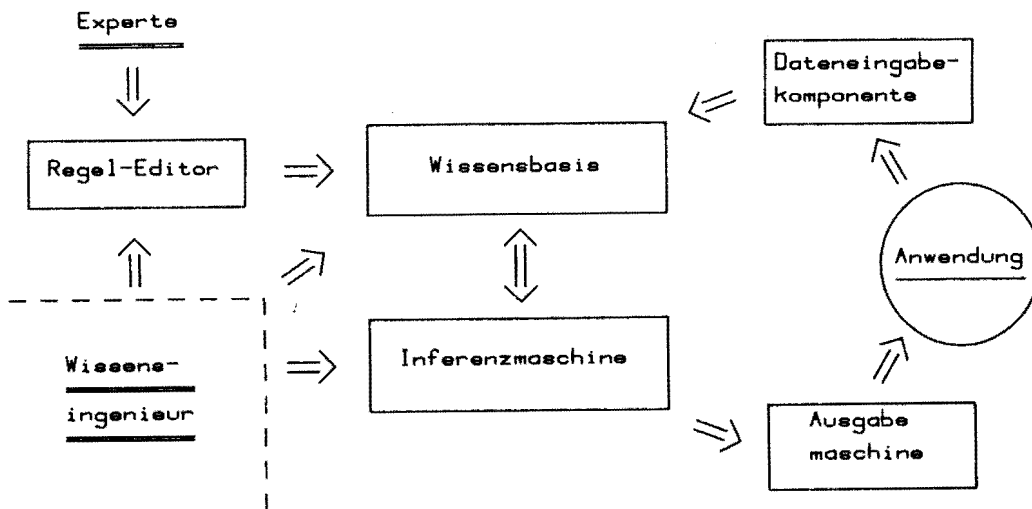
Bild 3: Netzausfallsimulation als Prozeß

Es wurde ein Konzept erarbeitet, das vergleichende Untersuchungen über die Einsatzmöglichkeiten von Methoden der AI (wissensbasiertes System, self learning system) für die Aufgaben der elektrischen Energieversorgung erlaubt. Das konzipierte System bildet ein Energieversorgungsnetz nach (Bild 3), wobei automatisch Lastverläufe und Schalthandlungen simuliert werden können. Die Netzsimulation stellt zusammen mit kontinuierlich ausgeführten Netz-Sicherheitsrechnungen (automatische Ausfallsimulation) den Prozeß dar, der durch das WS kontrolliert wird (vgl. Bild 4). In seiner Endstufe wird das beschriebene System die Möglichkeit der Evaluierung alternativer Möglichkeiten zur Auswertung einer auf der Grundlage von Netzsicherheitsrechnungen erstellten Wissensbasis bieten. Die beispielhafte Realisierung von Konzepten z.B. zur automatischen Verbesserung der

Netz-Zuverlässigkeit durch Maßnahmen wie korrektives Schalten von Leitungsverbindungen, Änderung von Transformatorstufungen, automatisches Schalten von Blindleistungs-Verbrauchern oder -Erzeugern u.a. wird damit möglich.



**Bild 4:** Einsatz eines wissensbasierten Systems zur Prozesssteuerung

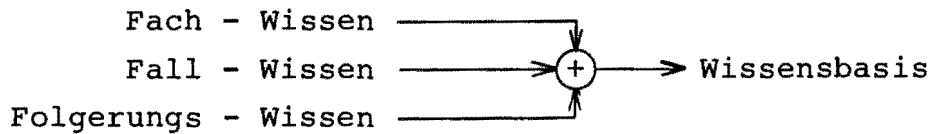


**Bild 5:** Allgemeine Struktur eines wissensbasierten Systems

Die Struktur wissensbasierter Systeme (Bild 5) erlaubt stets die Unterscheidung zumindest zweier unverzichtbarer Komponenten, die Wissensbasis und die Inferenzmaschine. Die Wissensbasis enthält eine unstrukturierte Sammlung von Regeln, während das



Inferenzsystem die Anwendung des Wissens ermöglicht. Drei Typen von Wissen sind zu unterscheiden:



Das Fach-Wissen stellt das programmierte Expertenwissen dar. Es ändert sich während der Anwendung nicht. Die Prozeßdaten und problembezogene Experteneingaben bilden das Fall-Wissen des Systems. Die Anwendung des gespeicherten Fach-Wissens auf das aktuelle Fall-Wissen führt zu Zwischenergebnissen. Diese stehen dem weiteren Analyseprozeß als Folgerungs-Wissen zur Verfügung. Die Anwendung der Wissensbasis führt die Inferenzmaschine durch die Verknüpfung von Regeln aus. Abhängig von der festzulegenden Entscheidungsstrategie (forward- oder backward-chaining) sucht das Expertensystem die für den speziellen Fall relevanten Regeln aus der Fach-Wissensbasis. Die erschöpfende Anwendung des relevanten Wissens führt zu der, dem Expertensystem möglichen Entscheidung.

Weitere Komponenten dienen dem praktischen Umgang mit einem WS. Besonders zu nennen sind hier:

- Regel-Editor
- Dateneingabe-Komponente
- Ausgabemaschine

Der Experte wird bei der Eingabe des Fach-Wissens in der Lernphase des WS von dem System und ggf. einem Wissensingenieur unterstützt. Trotzdem stellt die Formulierung des Wissens noch immer den aufwendigsten Teil der Konstruktion eines WS dar. Zukünftig werden speziell bei der Wissensakquisition neue Wege zu beschreiten sein (self learning system), um den Einsatz von wissensbasierten Systemen sicherer, effektiver und schneller zu gestalten. Die Dateneingabe-Komponente hilft dem Anwender bei der Problembeschreibung. Die getroffene Entscheidung wird von dem System via Ausgabemaschine dargestellt und auf Wunsch begründet.

Das konzipierte Simulationssystem mit einem beigeordneten wissensbasierten System erlaubt in einfacher Weise die vergleichende Untersuchung unterschiedlicher Verfahren zur Optimierung der Steuerung von Netzsicherheitsrechnungen. Ob die Verfahren der AI auch in der Implementierungsphase eines Optimierungsverfahrens die klassische Programmierung verdrängen können, hängt stark von der weiteren Entwicklung der Sprachen der AI ab. Neue Compiler-Versionen und die Anstrengungen zur Realisierung der "Fifth Generation Computer" versprechen Ausführungsgeschwindigkeiten, die in nicht zu ferner Zukunft mit denen konventionell programmierter Programme konkurrieren können.

W. Hoffmann

### 3.1.3 Spannungs-Blindleistungsregelung in elektrischen Energieversorgungssystemen

Seit einigen Jahren wird am Lehrstuhl für elektrische Energieversorgung ein Forschungsvorhaben durchgeführt, dessen Ziel es ist, einen Regelalgorithmus für die sekundäre on-line Spannungs-Blindleistungsregelung zu entwickeln.

Obwohl die Spannungshaltung als lokales Problem betrachtet wird, können nur durch eine zentrale Regelung koordinierte präventive Maßnahmen ergriffen werden, um auf eingetretene Störungen so schnell und geeignet wie möglich zu reagieren, damit weitreichende Auswirkungen wie Spannungszusammenbrüche vermieden werden können. Nur ein globaler Überblick über die Netz-situation ermöglicht die notwendigen Entscheidungen zu treffen.

Analog zur Wirkleistungs-Frequenzregelung werden die Aufgaben der Spannungs-Blindleistungsregelung (SBR) durch ein hierarchisches Konzept erfüllt; die leittechnische Struktur besteht aus drei Ebenen: primäre, sekundäre und tertiäre Regelung.

Als primäre Regelung bezeichnet man die direkte Regelung einzelner Netzkomponenten (wie Erregerstromeinrichtungen bei Generatoren und automatische Stufung bei Transformatoren). Durch

die sekundäre Regelung müssen die Sollwerte von Spannungen und Blindleistungsflüssen im Netz möglichst genau eingehalten werden. Die Sollwerte kommen aus der tertiären Regelung, die einen optimalen Betriebspunkt anhand einer Optimierungsrechnung bestimmt.

Als Abschluß der Entwicklungsphase I dieses Forschungsvorhabens ist am Lehrstuhl ein Programm vorhanden, das eine zentrale Spannungs- Blindleistungsregelung realisiert, die die statische Stabilität des Netzes aufgrund der besseren Blindleistungsverteilung vergrößern kann.

Dieser Regelalgorithmus ermöglicht es, außer den globalen Forderungen der SBR wie Einhaltung des Spannungsniveaus, Minimierung des Spannungsbandes und gleichmäßige Aufteilung der Blindleistungseinspeisungen noch andere Sicherheitsfunktionen auszuführen. Als wichtige Eigenschaft ist seine Unempfindlichkeit gegen Parameterungenauigkeiten und Netztopologieänderungen zu erwähnen.

In der Phase II der Forschung werden angestrebt:

- die Erweiterung des Programms, um das Verhalten großer Netze zu untersuchen, wobei ungefähr 120 Knoten berücksichtigt werden können,
- eine Berücksichtigung zusätzlicher Stell- und Zustandsgrößen im Regelungskonzept, das durch die Blockkonfiguration des Reglers ermöglicht wird,
- als erstes Ziel wird die Anwendung des Programms auf das Verbundnetz von Kolumbien untersucht.

Das kolumbianische Netz hat eine gesamte installierte Leistung von 6524.2 MW (70% Wasser- und 30% thermische Kraftwerke). Die verschiedenen EVU's des zentralen und des südlichen Landesteils werden durch einen 230 kV-Ring verbunden, der gleichzeitig mit dem EVU des nördlichen Landesteils durch eine 500 kV-Freileitung verknüpft ist.

Die moderne nationale Netzleitstelle ermöglicht die automatische on-line Datenerfassung und Softwareanwendungen, die als

Voraussetzungen für den Einsatz der sekundären SBR zu betrachten sind.

Der Betrieb mit dem Spannungsniveau von 500 kV stellt weitere, neue Anforderungen an die SBR: nicht nur die radiale Konfiguration der vorhandenen Freileitung, sondern auch die Hochspannungsprobleme, die bei niedriger Belastung auftreten können, müssen sehr sorgfältig untersucht werden. Weiterhin hat der Betrieb mit niedrigen Spannungswerten an den Endknoten dieser Verbindung großen Einfluß auf die Netzbezirke sowohl im Norden des Landes als auch auf das Zentralsystem. Darum sollen diese Knoten als "Pilotknoten" für die SBR des kolumbianischen Netzes behandelt werden.

Die Ergebnisse und die Erfahrung, die aus der Anwendung dieses Programms zu erwarten sind, können für das Verbundnetz von Kolumbien als ein wichtiges Hilfsmittel betrachtet werden, um die Netzbetriebsführung in der nahen Zukunft zu verbessern.

E. Arias

#### 3.1.4 Knotenbezogene Lastprognose

Die Aufgabe der knotenbezogenen Lastprognose besteht im Gegensatz zu herkömmlichen Prognoseverfahren, die Aussage über die stündliche Gesamtnetzlast machen, in der Vorhersage der Lastverläufe in einzelnen Mittelspannungs-Verteilungsstationen. Damit bildet sie die Grundlage für eine effektive Ausnutzung der verfügbaren Betriebsmittel und eine effektive Netzausbauplanung und unterstützt die für die Automatisierung der Netzleitstellen im Mittelspannungsnetz erforderlichen Netzberechnungen. Dies ist von besonderer Bedeutung, da die Investitionskosten im Bereich der Verteilungsnetze sehr hoch sind. Die Basis für die vorgestellte Methode bilden typische Verbrauchercurven, die das elektrische Verhalten der einzelnen an den Knoten angeschlossenen Verbrauchergruppen widerspiegeln. Sie werden nach den einzelnen Jahreszeiten sowie nach Werk- bzw. Wochenend- und Feiertagen klassifiziert. Die Berechnung dieser Normkurven

erfolgt durch ein lineares Estimationsverfahren (s. Jahresberichte 1984/85) auf der Grundlage des Modells

$$\underline{z} = \underline{A} \underline{x} + \underline{y}$$

Hierin stellt  $\underline{z}$  die Meßwerte an den einzelnen Mittelspannungsknoten dar, die Matrix  $\underline{A}$  beinhaltet die Verbraucherstruktur an den Netzknoten, die typischen Verbraucherkurven werden mit  $\underline{x}$  bezeichnet und  $\underline{y}$  ist der Rauschvektor, der Meßungenauigkeiten sowie Modellfehler beschreibt. Im vorliegenden Modell benötigt man Messungen an relativ wenig Stationen, um so für die übrigen Stationen Prognosen durchführen zu können.

Die Meßwerte sind Einflüssen wie Temperatur, Helligkeit etc. unterworfen. Zur Estimation der Normkurven werden nicht die Meßdaten aller Tage einer Jahreszeit herangezogen. Um die für eine Jahreszeit nicht typischen Einflüsse ausschließen zu können, die zu größeren Fehlern bei der Prognose führen, werden nur die Messungen solcher Tage für die Berechnung benutzt, an denen die mittlere Tagestemperatur nicht mehr als  $\pm 1^\circ\text{C}$  vom langjährigen Tagesmittelwert abweicht und die Differenz zweier aufeinanderfolgender Helligkeitsmeßwerte nicht mehr als 5 klx beträgt ("Standardtage").

Korrelationsrechnungen zwischen den Abweichungen vom Lastverhalten an Standardtagen und den Temperaturabweichungen von der mittleren Temperatur der Jahreszeit haben gezeigt, daß der Einfluß der Temperatur auf die Last zeitverzögert wird. Dabei sind ein kurzfristiger Einfluß bis zu 8 Stunden und ein längerfristiger mit mehr als 24 Stunden zu unterscheiden. Die Korrelationsrechnung geht über einen Gewichtungsfaktor in das Temperaturmodell ein. Dadurch wird ein zeitlicher Einfluß in das bis dahin statische Problem eingebracht (Memory function).

Von den untersuchten Verbrauchergruppen sind nur die Speicherheizung, die Haushalte und spezielle Dienstleistungsunternehmen von der Temperatur in nachweisbarem Umfang abhängig. Für die Speicherheizung gehen auch die Temperaturen der beiden Vortage in das Modell ein. Für die anderen Gruppen werden in Anlehnung

an die Korrelationsrechnung nur die Werte der letzten 8 Stunden verwendet. Dabei muß berücksichtigt werden, daß die Höhe der Laständerung aufgrund der Temperaturabweichung tageszeitabhängig ist. Der Helligkeitseinfluß ist wesentlich geringer als der der Temperatur, ferner ist er nur in engen regionalen Grenzen nachweisbar. Die Auswirkung von Helligkeitsschwankungen erfolgt direkt ohne Zeitverzögerung und ist nur von kurzer Dauer. Aufgrund der untersuchten Daten werden den Verbrauchergruppen helligkeitsabhängige Koeffizienten zugeordnet, die den Einfluß in Anlehnung an die Korrelationsrechnung berücksichtigen. Gegenüber der Temperatur ist die Prognose der Helligkeit wesentlich schwieriger, da kleine Unterschiede des Bewölkungsgrades schon zu großen Helligkeitsdifferenzen führen.

Neben meteorologischen können auch andere Einflüsse (z.B. besondere TV-Sendungen, Streiks etc.) in der Prognose berücksichtigt werden. Die Prognose erfolgt auf der Basis des linearen Modells

$$\underline{\hat{x}} = \underline{A} ( \underline{\hat{x}}^{\circ} + \underline{\Delta x} )$$

Hierbei stellt  $\underline{\hat{x}}$  die prognostizierten Lastwerte dar,  $\underline{A}$  ist die Systemmatrix, die die Lastzusammensetzung an den Netzknoten beinhaltet. Die Normkurven  $\underline{\hat{x}}^{\circ}$  werden durch einen Korrekturterm  $\underline{\Delta x}$ , der durch die Einflußfaktoren bestimmt wird, verändert.

Die Güte des vorgestellten mathematischen Modells läßt sich anhand der Prognose der elektrischen Last an Standardtagen auf der Basis der Normkurven beurteilen, da hier zunächst witterungsbedingte Einflüsse nicht in die Prognose eingehen. In Bild 6 ist die knotenspezifische Leistung über einen Standardtag aufgetragen. Mit Hilfe des hier beschriebenen Verfahrens wurde eine Prognose für diesen Knoten, der bei der Bestimmung der Normkurven nicht in die Berechnung einbezogen wurde, durchgeführt. Der Vergleich zwischen Messung (Kurve 1) und Rechnung (Kurve 2) zeigt eine gute Übereinstimmung. Auch die Berücksichtigung externer Einflüsse durch die entsprechenden Modelle führt zu guten Lastprognosen. In Bild 7 ist die gemessene (Kurve 1) und die prognostizierte Belastung (Kurve 2) für einen

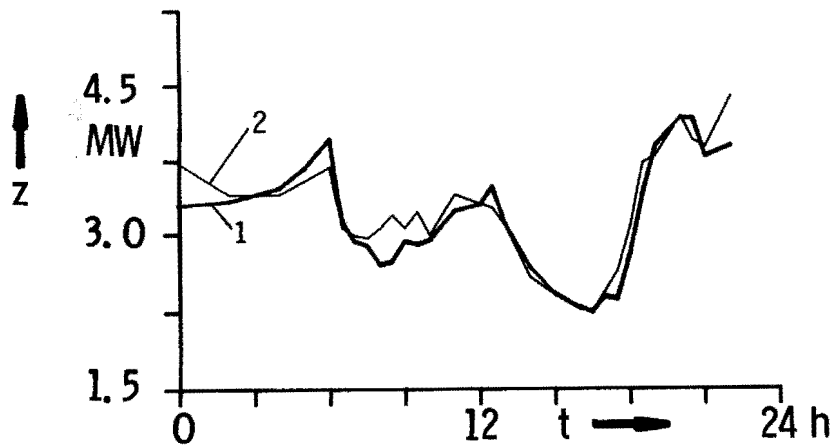


Bild 6: Prognose und gemessene Last an einem Standardtag

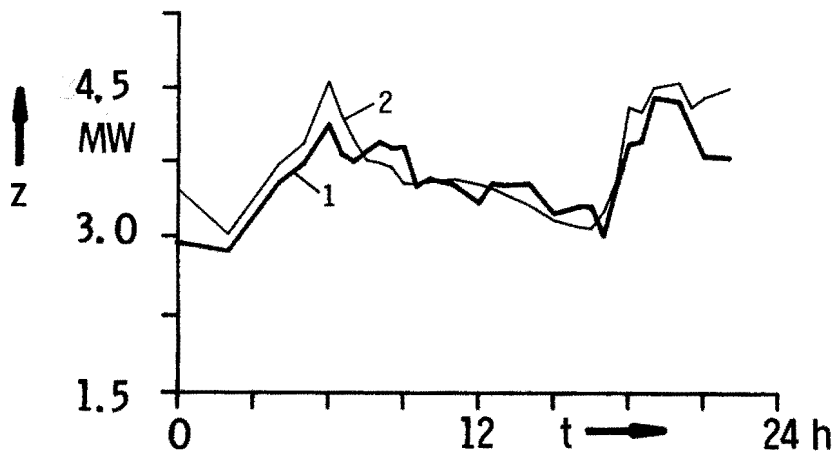


Bild 7: Prognose und gemessene Last an einem beliebigen Tag

beliebigen Tag mit einer Temperaturdifferenz von 6°C dargestellt. Bei der Berechnung der Prognose wurde davon ausgegangen, daß die Temperaturabweichung bekannt ist. Bei beiden Ergebnissen handelt es sich um Lastkurven des Winterhalbjahres.

Ch. Dörnemann

Diese Untersuchung wird gefördert mit Mitteln der "Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG)" im Forschungsschwerpunkt "Leit- und Schutztechnik in der Energieversorgung."

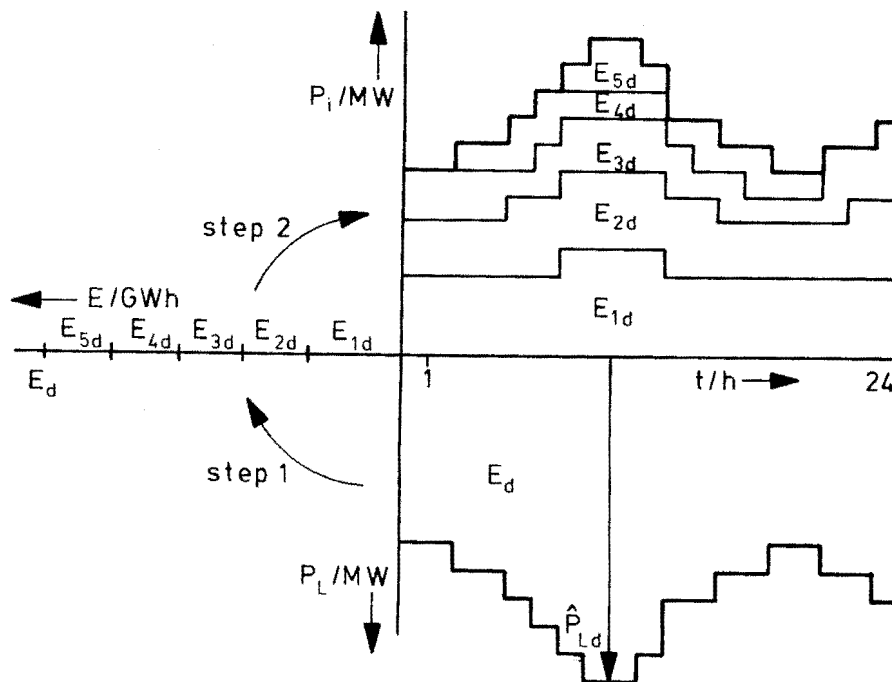
### 3.1.5 Langfristige Kraftwerkseinsatzplanung thermischer Kraftwerke

In den Unternehmen der Elektrizitätsversorgung stellt die langfristige Kraftwerkseinsatzoptimierung ein wichtiges Hilfsmittel für verschiedene Planungsaufgaben dar. Zum einen ist der optimale langfristige Energieeinsatzplan die Grundlage für die Kurz- und Mittelfristoptimierung, andererseits ist er ein Hilfsmittel für Variantenrechnungen bei Aufgaben, wie Kraftwerkszubauplanung, Wartungsplanung, Brennstoffdisposition, langfristige Vertragsplanung, usw. Um auch Einflüsse wie Mindeststillstandzeiten und Anfahrkosten mit in der Optimierungsrechnung berücksichtigen zu können, muß für den Planungszeitraum (ein Jahr) ein Fahrplan im Stundenraster erstellt werden. Dies führt zu einer so großen Zahl von Variablen, daß die Optimierungsaufgabe nicht geschlossen gelöst werden kann. Deshalb wird die Aufgabe in zwei Schritten, wie in Bild 8 dargestellt, bearbeitet:

1. Optimale Energieaufteilung der gesamten Jahresarbeit auf Tagesenergien pro Block bei Einhaltung aller wirtschaftlichen und der relevanten technischen Bedingungen
2. Umsetzung der Tagesenergien auf stündliche Leistungswerte für jeden Block bei Einhaltung aller technischen Bedingungen.

Im ersten Schritt werden die aus der Lastprognose gegebenen Tagesenergien  $E_d$  so auf die kraftwerksspezifischen Tagesenergien  $E_{id}$  verteilt, daß die Erzeugungskosten minimal sind und die Lösung innerhalb der zulässigen Grenzen liegt. Dabei werden nicht nur die wirtschaftlichen Randbedingungen (Energiebegrenzungen, Tarifzonen, Preisänderungen, Mengenbedingungen für Blockgruppen) berücksichtigt, sondern auch die wesentlichen technischen Randbedingungen wie Revisionszeiten, Leistungsgrenzen und Reservebedingungen für die Tagesspitzenlast. Mindestzeiten für Stillstand und Betrieb und Anfahrkosten werden ebenfalls näherungsweise mit berücksichtigt. Durch den näherungsweise linearen Zusammenhang zwischen Erzeugungskosten und





**Bild 8:** Bestimmung des Kraftwerkseinsatzplanes in zwei Optimierungsschritten

Energie kann die Energieoptimierung mit Hilfe der gemischt ganzzahligen linearen Programmierung beschrieben werden. Da die Erzeugungskosten für derart lange Zeiträume (ein Jahr) im wesentlichen nur von der eingesetzten Primärenergie abhängen, ist diese Näherung keine Einschränkung für das Optimierungsergebnis. Das Ziel der Minimierung der gesamten Erzeugungskosten, die sich aus der Summe der an den Tagen  $d$  entstehenden Tagesenergiekosten  $K_{id}$  in Abhängigkeit von der Tagesenergie  $E_{id}$  aller Blöcke  $i$  ergeben, wird in der Zielfunktion

$$K = \sum_d \sum_i K_{id} (E_{id}) = \min$$

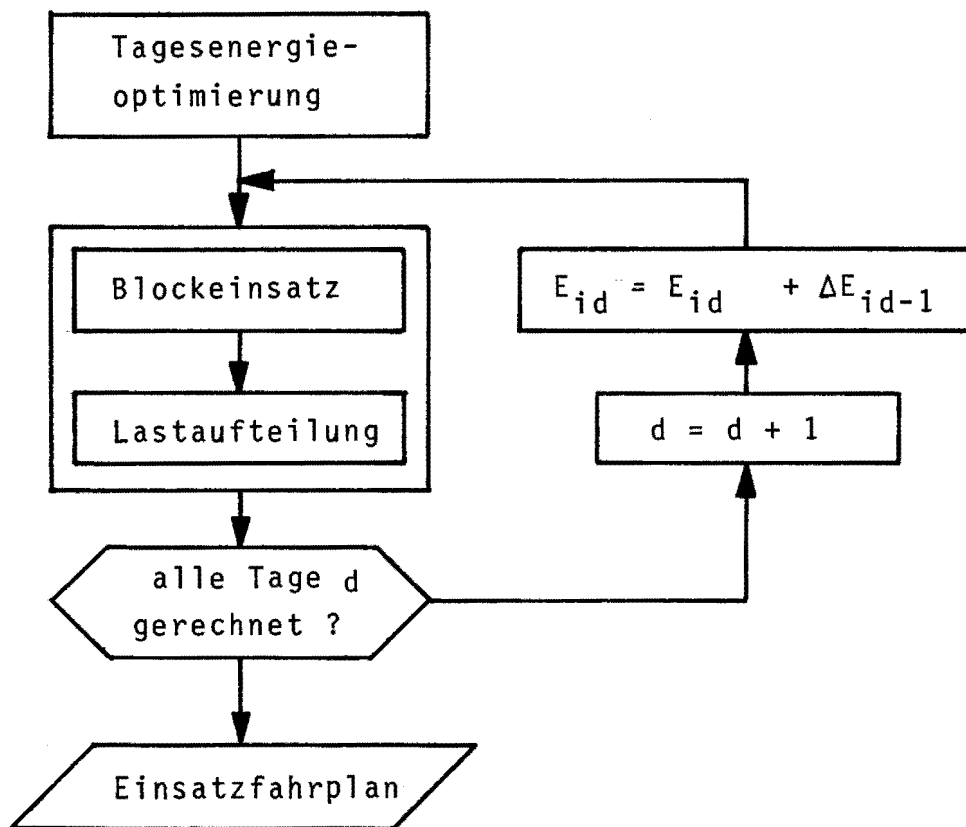
formuliert. Alle Nebenbedingungen werden in der Form linearer Gleichungen und Ungleichungen beschrieben und können in der Matrixform

$$\underline{A} \underline{x} \begin{matrix} \leq \\ \geq \end{matrix} \underline{b}$$

dargestellt werden, wobei sich der Lösungsvektor  $\underline{x}$  aus den

Tagesenergievariablen  $E_{id}$  sowie binärer und kontinuierlicher Hilfsvariablen zusammensetzt. Die Koeffizientenmatrix  $A$  und die rechte Seite  $b$  beschreiben die verschiedenen Nebenbedingungen.

Im zweiten Lösungsschritt werden die ermittelten Tagesenergie-  
werte  $E_{id}$  in stündliche Leistungswerte umgesetzt. Da hierbei  
nun alle technischen Randbedingungen exakt eingehalten werden  
müssen, kann die aus dem 1. Schritt vorgegebene Tagesenergie  
nicht immer erfüllt werden. Deshalb wird die stündliche Last so  
verteilt, daß der Betrag der Energieabweichung am Ende des  
Tages minimal ist.



**Bild 9:** Programmablauf mit sukzessiver Berücksichtigung der Energieabweichung

Voraussetzung für die Bestimmung der Leistungsverteilung ist der vorher bestimmte Blockeinsatz, bei dem die Erzeugereinheiten so eingesetzt werden, daß die Reservebindung und die Min-

destzeiten für Stillstand und Betrieb eingehalten werden und die Anfahrkosten minimiert werden. Ist die Energiedifferenz  $E_{id}$  des Blockes  $i$  am Tage  $d$  ungleich 0, wird sie zu dem Energiesollwert des nächsten Tages hinzu addiert (siehe Bild 9), so daß sich die Abweichungen im Laufe des Jahres ausgleichen.

Anhand von realistischen Modellbeispielen wurde die Wirksamkeit des Verfahrens nachgewiesen. Mit Hilfe des Programms können noch weitere Fragestellungen untersucht werden:

- welche Kosten verursacht eine bestimmte Reservevorhaltung
- welchen Einfluß haben verschiedene Energieversorgungskonzepte auf den Stromerzeugungspreis
- welchen Einfluß haben bestimmte Umweltschutzmaßnahmen auf den Kraftwerkseinsatz usw.

H. Slomski

## 3.2 Simulation statischer und dynamischer Vorgänge in elektrischen Energieversorgungssystemen

### 3.2.1 Netzbetriebs-Trainingssimulator

Für die Erfüllung der hohen Betriebsanforderungen ist eine optimale Netzüberwachung und -führung notwendig, die nur durch moderne Leitsysteme ermöglicht wird. In der Netzleitzentrale sind laufend genügend und aussagekräftige Informationen über den Netzzustand zu sammeln, rasch auszuwerten und zu interpretieren, so daß eine "gefährliche" Netzsituation frühzeitig und zuverlässig erkannt wird. Die on-line State Estimation ist dabei von zentraler Bedeutung. Die Optimierung der Systemfunktionen (u.a. die Funktion State Estimation) ist für eine optimale Netzzustandsüberwachung notwendig aber nicht hinreichend. Nicht nur der on-line Einsatz, sondern auch die effektive Anwendung der Funktion muß gewährleistet sein. Der Netzbetriebs-Trainingssimulator stellt das Bindeglied zwischen der abstrakten Theorie und dem effektiven on-line Einsatz dar.

Die Realisierung eines Trainingssimulators im Hinblick auf die Simulation des Netzsystems (d.h. Netz- und Meßsystem) kann sowohl digital als auch hybrid (analog und digital) erfolgen.

Ein Hybridsimulator, bestehend aus dem Prozeßrechner (PDP 11/40) dem Fernwirksystem (DP1000) und einem Drehstrom-Netzmodell wurde zwecks eines praxisnahen Netzbetriebstrainings entwickelt und im Jahresbericht 1985 vorgestellt. Im Berichtsjahr wurden die Funktionen der Beobachtbarkeitsanalyse, der State Estimation und der Residuenanalyse weiterentwickelt und getestet, so daß die Ermittlung eines zuverlässigen Datensatzes ermöglicht wird. Für das Training der optimalen Netzbetriebsüberwachung unter Einsatz der oben genannten Funktionen werden sowohl Normal- als auch Störereignisse simuliert. Die Ereignisse können beim Training vom "Lehrer" entweder analog am Netzmodell oder digital am Rechner generiert werden. So erzeugte Ereignisse werden in eine zielgerichtete Übungssituation entsprechend der Aufgabestellung integriert, um z.B. die Aufgaben der Netzzustandsüberwachung trainieren zu können. Es sei

hier erwähnt, daß dadurch und durch den (späteren) on-line Einsatz einer Funktion zur Netzsicherheitsanalyse die Möglichkeit zum Training für die Aufgaben der Netzsicherheitsüberwachung gegeben wird.

Auch beim Training für eine optimale Netzbetriebsüberwachung sollte die Funktion der "Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMK)" nicht die vollständigen, sondern die leicht interpretierbaren und jeweils für die Erkennung des Netzzustandes notwendigen Informationen darstellen. So werden die Informationen der Datensätze anwenderfreundlich entweder in tabellarischer oder graphischer Form dargestellt. Die graphische Darstellung erfolgt wahlweise auf dem Bildschirm des Arbeitsplatz-Terminals (VT100) oder des Netzmodells. Während die Grundtopologie sowohl der Netz- als auch der Meßeinrichtungen nur einmal von einem entsprechenden Datensatz eingelesen bzw. dargestellt wird, erfolgt eine on-line Darstellung der graphischen (Schalterstellungen, Meßstellen) bzw. der numerischen (Meß- bzw. Estimationswerte, Überlastung etc.) Informationen aus den zugehörigen Datensätzen.

Es sei hier erwähnt, daß neben der verwendeten Technik zur graphischen Darstellung Überlegungen zum Einsatz eines Einplatinen-Rechners angestellt werden, so daß eine flexible Ein- bzw. Ausgabe des Bildes erfolgen kann.

Als wichtiger Vorteil des am Lehrstuhl für elektrische Energieversorgung entwickelten Hybridsimulators ist besonders die Tatsache zu erwähnen, daß dabei der "direkte" Kontakt zum Netz erhalten bleibt. Demgegenüber steht der Nachteil, daß das Netz- und Meßsystem nur in beschränktem Maß simuliert werden kann.

Deshalb wurde neben dem Hybridsimulator ein Digitalsimulator entwickelt, der das Netzsystem flexibler simuliert. Bild 10 zeigt die Struktur und die Datensätze des Netzbetriebs-Trainingssimulators, wobei die zur Simulation des Netzsystems notwendigen Teilmodelle (Last-, Netz-, Element-, Schutz- und Fernwirkmodell) unterschieden werden.

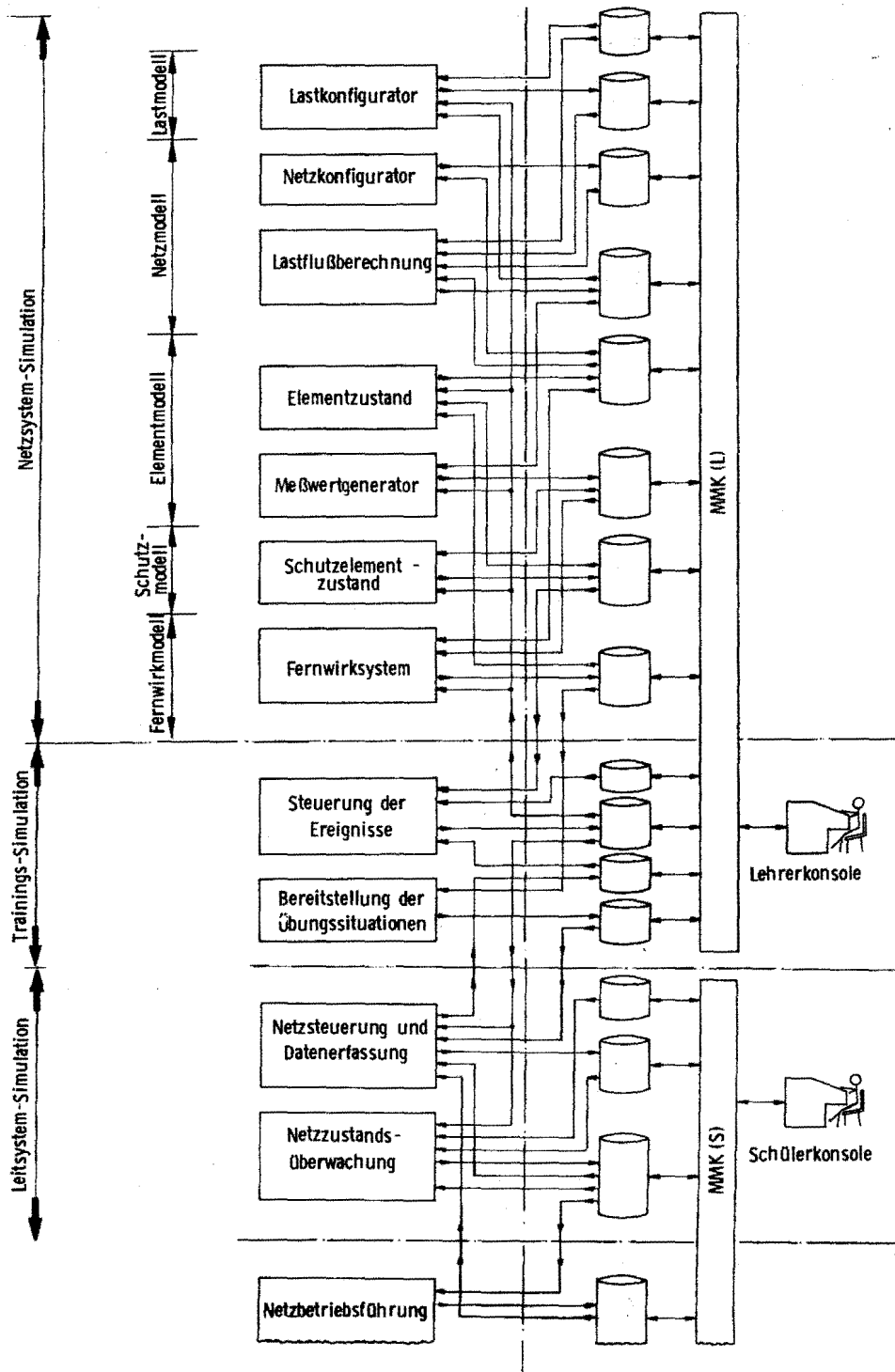


Bild 10: Struktur eines Netzbetriebs-Trainingssimulators

Der Lehrer hat durch die Funktion MMK(L) sowohl die Simulation des Netzsystems als auch den Trainingsbetrieb zu steuern. Die on-line Ereignisse können entweder durch eine Ereignisliste, durch die Reaktionen des Schülers, durch die Reaktionen des Netzsystems (Ansprechen eines Schutzelements) und vor allem durch Vorgaben des Lehrers gesteuert werden, um so für den

Ausfall einer automatischen Funktion zu trainieren. Der Schüler an seiner Trainingskonsole hat die Aufgabe, unterstützt von den vorhandenen Funktionen den Netzzustand zu überwachen und bei Bedarf das simulierte Netz on-line zu beeinflussen, so daß der Netzzustand wieder sicher wird.

Für die Aufgaben der Netzzustandsüberwachung wird nur das quasistationäre Netzverhalten betrachtet. Deshalb wird das Gesamtverhalten "nur" durch die Funktion der Lastflußberechnung nachgebildet. Um das Training für weitere Netzbetriebsaufgaben (z.B. dynamisches Netzverhalten) zu ermöglichen, sind die vorhandenen Teilmodelle entsprechend zu erweitern bzw. weiter zu entwickeln.

Es sei hier erwähnt, daß im Zusammenhang mit der Optimierung im Bereich der on-line State-Estimation und im Hinblick auf den Einsatz von Netztrainingssimulatoren eine Literaturübersicht über die verfügbaren Veröffentlichungen erstellt wurde. Zur Vereinfachung der Suche nach einzelnen Literaturstellen wurde eine Literaturdatenbank auf der Basis eines relationalen Datenbanksystems eingerichtet. Die Erweiterung dieser Literaturdatenbank auf andere Bereiche der Energieversorgungstechnik ist geplant.

K. El-Homsi

EV 8605, EV 8626, EV 8635, EV 8636, EV 8637,  
EVP 8605, EVP 8606, EVP 8607

### 3.2.2 Oberschwingungen in elektrischen Energieversorgungsnetzen

In den vergangenen zwei Jahren wurde im Rahmen von Forschungsarbeiten und Studien- sowie Diplomarbeiten ein Programmpaket zur Berechnung von Oberschwingungen erstellt. Die mathematischen Modelle sind bis zu einer Frequenz von etwa 3 kHz gültig. Den Kern des Verfahrens bildet die Knotenpotentialanalyse im Frequenzbereich. Zum Nachweis der Gültigkeit der Modelle wurden Messungen in Industrienetzen durchgeführt. Aus diesen Messungen

wurde ein Praktikumsversuch am Netzmodell für Studenten erarbeitet.

Im Berichtszeitraum standen die Fragen der Belastung der Netzelemente und der Dimensionierung von Saugkreisen im Mittelpunkt der Untersuchungen. Um den Einsatzbereich des Pakets zu erweitern, wurde ein Programm zur Unterstützung bei der Dateneingabe geschrieben, das nicht nur die Netzdatei erstellt, sondern die Daten auf Topologiefehler und Parameterfehler durch Überprüfen der Wertebereiche und des Wellenwiderstandes durchsucht. Damit wurde ein umfangreiches Bergbaunetz in mehreren Schaltzuständen erfaßt.

Nach der Untersuchung der Parametereinflüsse wurde die Netzdatei auf diejenigen Knoten und Netzelemente reduziert, für die die Netzurückwirkungen von besonderem Interesse sind oder die die Ausbreitung von Oberschwingungen erheblich beeinflussen. Zur Bestätigung der Parameter waren Messungen erforderlich, die möglichst in der Nähe der Oberschwingungseinspeisung liegen sollten. Die Messungen haben die Lage der Resonanzstellen bestätigt, für die Übereinstimmung der Amplituden zwischen Messung und Rechnung war eine Korrektur der geschätzten ohmschen Lasten erforderlich.

Im nächsten Schritt wurde das Netz entsprechend der Planung geändert und analysiert. Im Impedanzverlauf zeigten zwei Maxima, daß das Netz aus zwei schwach gekoppelten Netzteilen bestand. Zusätzlich zur Lage der Maxima waren weitere Bedingungen für eine Dimensionierung einer dreistufigen Kompensationsanlage gegeben:

1. Einschränkung der Störaussendung durch Spannungsbeschränkungen an allen Knoten.
2. Berücksichtigung des Oberschwingungsgehaltes des einspeisenden Netzes.
3. In jedem Schaltzustand müssen die Filterkreise Reserven in der Belastung haben.
4. Die Blindleistungskompensation soll dreistufig sein.



Der aus diesen Bedingungen optimierte Lösungsvorschlag ergibt schließlich bei maximaler Blindleistungskompensation das Spannungsverhalten in Bild 11.

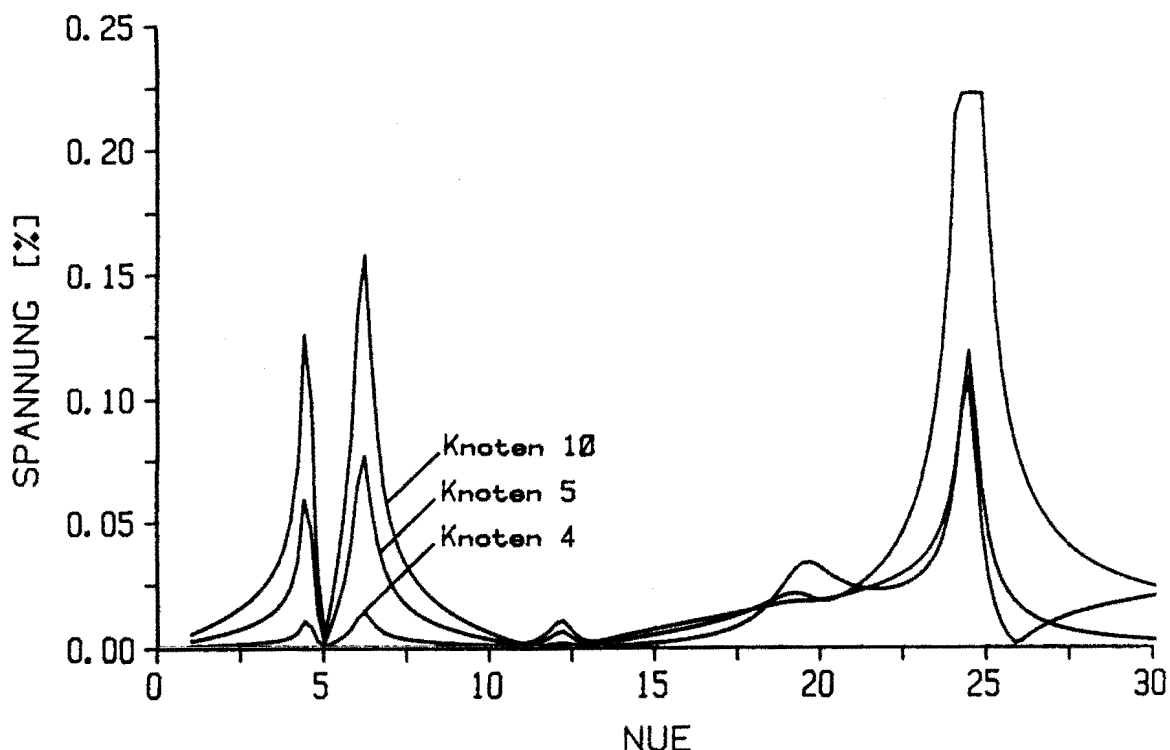


Bild 11: Spannungsverhalten bezüglich Oberschwingungen in einem Industrienetz mit zugeschalteter Kompensation

Die Spannungskurven sind einzelnen Netzknoten zugeordnet, wobei der Oberschwingungserzeuger am Knoten mit der höchsten Amplitude betrieben wird. Eine Überprüfung der Belastung der Netzelemente durch Oberschwingungen ergab nur für die Saugkreise kritische Werte, so daß die Kondensatoren aus einer höheren Spannungsreihe gewählt werden müssen.

Das Programmpaket hat damit den Aufwand der Programmpflege gerechtfertigt. Zur Verbesserung des Pakets werden die Datenerfassung und die Ergebnisdarstellung weiter vereinfacht. Das Kernprogramm wird durch die Normierung aller physikalischen Größen aufgewertet.

P. Stöber

EV 8633

### 3.2.3 Die Dynamik von Generatoren im Kurzzeitbereich

Im Rahmen der Simulation dynamischer Vorgänge in einem Energieübertragungssystem im Kurzzeitbereich soll die Leistungsreserve aus dem Selbstregelleffekt des Netzes und der Einfluß des Spannungsreglers auf die Leistungsreserve untersucht werden. Der Kurzzeitbereich ist dadurch gekennzeichnet, daß die Generatoren nach einer Störung noch keine kohärente Systemfrequenz erreicht haben. Damit steht für ein Forderungskatalog für die Programm-erstellung fest:

- Die Spannungs- und Frequenzabhängigkeit der Lasten soll in der reduzierten Knotenadmittanzmatrix berücksichtigt werden.
- Die Ordnung der Generatormodelle soll entsprechend dem Datensatz und der geforderten Genauigkeit variabel sein.
- Den Generatoren sind verschiedene Spannungsregler und Erreger-einrichtungen zuzuordnen.
- Die Lastflußgleichungen sind auf den Slack- und die Generatorknoten zu reduzieren.

Das Generatormodell ist auf den Flußgleichungen in den Park'schen Komponenten aufgebaut. Da für die beschriebenen Aufgaben zunächst nur das Klemmenverhalten der Maschinen von Interesse ist, wurden die Flußgleichungen der Dämpferwicklungen eliminiert und die Systemparameter in Zeitkonstanten überführt. Das Systemverhalten wird damit durch Übertragungsglieder 1. Ordnung (Lead-Lag-Glieder) beschrieben.

Mit der Voraussetzung, daß das System symmetrisch ist, verschwindet die Nullkomponente nach der Parktransformation. Dadurch wird die Systemordnung kleiner, und die Zustandsgrößen sind wie folgt belegt:

q-Achse der Ankerwicklung:  $X_d(s)$  mit 2 Zustandsgrößen, eine entspricht dem Statorfluß

q-Achse der Ankerwicklung:  $X_q(s)$  mit 1 Zustandsgröße für den Statorfluß

d-Achse der Rotorwicklung:  $G_e(s)$  mit 2 Zustandsgrößen,  
entspricht dem Rotorfluß

Spannungsregler: 5 Zustandsgrößen

Bewegungsgleichung: 2 Zustandsgrößen für  
Frequenzabweichung und Polradwinkel

Zur Integration der Zustandsgrößen wird das Euler-Trapez-Verfahren eingesetzt. Je Integrationsschritt sind damit zweimal die Ableitungen zu rechnen und einmal die Lastflußgleichungen zu lösen. Die Zusammenschaltung der Modelle, Transformationen und algebraischen Gleichung zeigt das Bild 12.

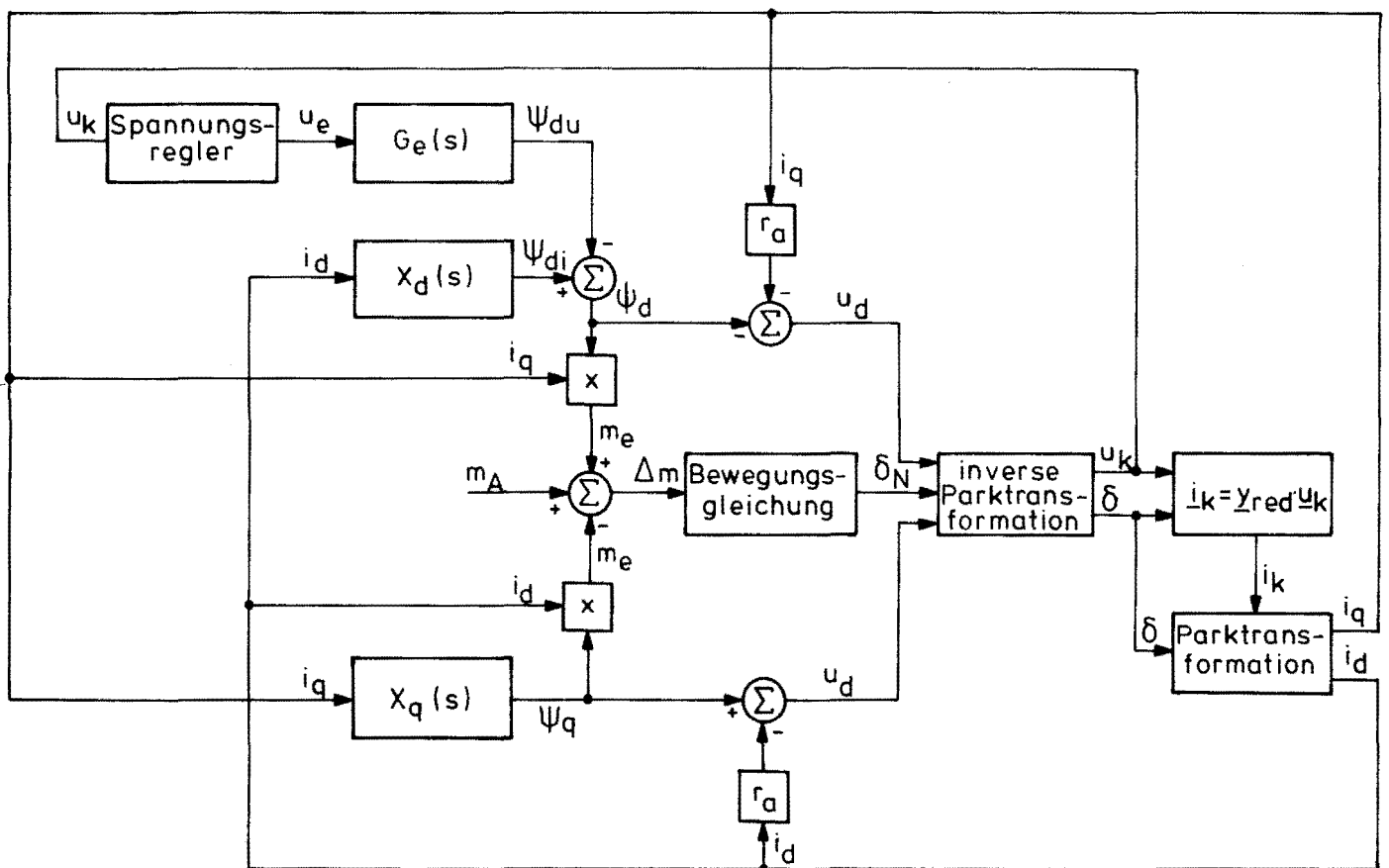


Bild 12: vollständiges Strukturbild

Das Bild 12 zeigt, daß die Park'schen Komponenten der Spannung  $u_d$  und  $u_q$  sowohl von den Flüssen als auch von den Strömen  $i_d$  und  $i_q$  abhängen. Die Untersuchung verschiedener Parametersätze und Störungen hat gezeigt, daß diese impliziten Gleichungen die

numerische Stabilität des Programms stören können. Die weitere Überprüfung der gelegentlichen Instabilität ergab, daß die Eliminierung der Dämpferflüsse Unstetigkeiten der Statorflüsse verursachen, die physikalisch nicht interpretierbar sind.

In der weiteren Programmentwicklung ist daher eine Änderung der Modelle und damit eine andere Belegung der Zustandsgrößen erforderlich. Um die Parametersicherheit zu erhöhen, wird an einem Plausibilitätstest der Eingabedaten gearbeitet. Hier wird eine mögliche Redundanz der Herstellerangaben genutzt. Ferner soll der Spannungsregler einer Eigenwertanalyse unterzogen werden.

P. Stöber

EV 8606

#### 3.2.4 Blindleistungs- und Spannungsmodellierung in der Mittelzeitdynamik

Bisher wurden für die Mittelzeitdynamik die Spannungs- und Blindleistungseffekte vernachlässigt und das Energieversorgungssystem nur durch ein reines Frequenz-Wirkleistungsmodell nachgebildet. Bei dieser Nachbildung ist es möglich, die Netzverhältnisse dadurch wiederzugeben, daß die Spannungen in den Einspeiseknoten als konstant vorgegeben werden. Es ist jedoch nicht möglich, die Zusammenhänge zwischen Spannung-Blindleistung und Frequenz-Wirkleistung korrekt nachzubilden, so daß dieses Modell auf die Untersuchung der Wechselwirkungen von Wirkleistung und Systemfrequenz beschränkt ist.

Der Verzicht auf die Nachbildung wesentlicher Effekte in den Synchrongeneratoren, kann in vielen Fällen zu einem unrealistischen Spannungsverhalten an den Generatorklemmen führen (was gleichzeitig das Spannungsprofil im gesamten Netz beeinflusst), da Spannungseinbrüche nicht simuliert werden können.

In der Praxis konnte oft beobachtet werden, daß hauptsächlich in kleineren und schwach gekoppelten Netzen fast jede Wirkleistungsstörung von einer Spannungsänderung begleitet ist, die im Extremfall sogar zu einem Spannungszusammenbruch führen kann. Für die Mittelzeitdynamik ist die Nachbildung dieser Vorgänge in vielen Fällen wichtig. Eine geeignete Modellierung der Spannungsverhältnisse in der Simulation bietet die folgenden zusätzlichen Möglichkeiten an:

- Realistische Netzmodellierung, d.h. Spannungsänderungen, Wirk- und Blindleistungsverluste und Netzstörungen können genauer nachgebildet werden,
- die Spannungsabhängigkeit der Lasten kann berücksichtigt werden,
- es können bei der Simulation Zustände und Störungen, die zu kritischen Spannungsverhältnissen führen, frühzeitig erkannt und untersucht werden.

Bei der Simulation besteht weiterhin das Interesse, mehr Wert auf die Vorgänge im Mittelzeitbereich zu legen und mit einer einheitlichen Systemfrequenz zu arbeiten. Dieses Konzept wird als zusätzliche Bedingung für die Lastflußberechnung zugrundegelegt, um die unrealistische Ausgleichsfunktion des Slack-Knotens zu eliminieren.

Mit diesen Anforderungen wurden im Rahmen einer Studienarbeit ein Erreger- und ein Generatormodell für Untersuchungen im Mittelzeitbereich als einsetzbar nachgewiesen. Eine modifizierte Form der stationären Lastflußberechnung wurde hergeleitet und programmtechnisch realisiert. Weiterhin wurde ein Simulationsmodell konzipiert, um das nur Frequenz-Wirkleistungswechselwirkungen berücksichtigende Programm um Erreger-, Generator- und Netzmodell zu erweitern, damit eine Modellierung der Spannungs- und Blindleistungsverhältnisse erfolgen kann. Das Blockschaltbild des vollständigen Mittelzeitmodells ist in Bild 13 zu erkennen.

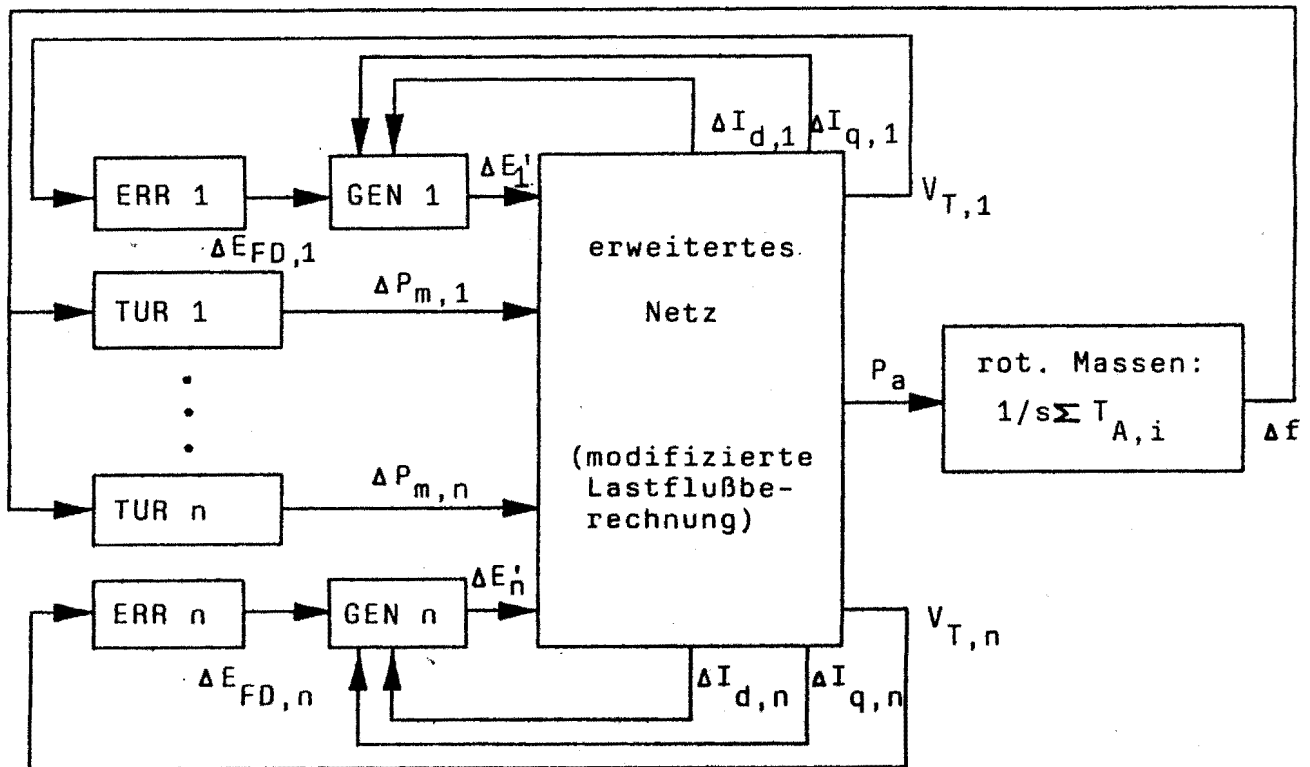


Bild 13: vollständiges Mittelzeitmodell

Ein Vergleich beider Verfahren zeigt, daß bei der Nachbildung des Systemverhaltens im erweiterten Mittelzeitmodell die Rechenzeit weniger infolge der erhöhten Anzahl der zu berücksichtigenden Störungen und Systemkomponenten ansteigt, als vielmehr wegen der nach jedem Integrationsschritt mit dem modifizierten Verfahren der Lastflußberechnung durchzuführenden Netzberechnung. Hier bleibt allerdings zu untersuchen, ob sich eine Beschleunigung des Verfahrens dadurch erreichen läßt, daß die Jakobi-Matrix nur jeweils nach dem Auftreten von Störungen neu berechnet wird.

J. Lemaitre

EV 8609

### 3.2.5 Bestimmung wichtiger Netzgrößen und Simulationsvalidierung anhand des gemessenen Frequenzverhaltens

Für das dynamische Verhalten eines Energieversorgungssystems im Mittelzeitbereich sind bestimmte Netzparameter von entscheidender Bedeutung. So stellt sich unmittelbar nach Störungseintritt ein mittlerer Frequenzgradient ein, der durch die Größe der Störung und durch die Anlaufzeitkonstante des Netzes (die der gespeicherte kinetische Energie entspricht) bedingt ist. Zu einem späteren Zeitpunkt, wenn die Frequenz sich bei einem neuen Wert stabilisiert hat, ist die Netzstatik (die sich aus den einzelnen Statik-Werten der primärgeregelten Generatoren und der Frequenzabhängigkeit der Last zusammensetzt) für die bleibende Frequenzabweichung verantwortlich.

Der dynamische Vorgang zwischen beiden Phasen (bei Vernachlässigung der Sekundärregelung), wird durch die Eigenschaften und Wechselwirkungen der Regeleinrichtungen stark beeinflusst. Hier sind einzelne Zeitkonstanten, Totzonen, Nichtlinearitäten usw. für den Verlauf der mittleren Systemfrequenz entscheidend. Für die qualitative und quantitative Beurteilung von Netzen und deren Regelverhalten, ist eine genaue Kenntnis solcher Netzparameter wichtig. Vor allem sind für die Beurteilung des dynamischen Verhaltens drei Größen maßgebend: die Leistungszahl, die Statik und die Anlaufzeitkonstante des Netzes.

Eine genaue Ermittlung dieser Netzparameter kann durch eine Auswertung des Frequenzverhaltens erfolgen, das für erzwungene Störungen des Wirkleistungsgleichgewichtes mit einem geeigneten Meßprinzip erfaßt wurde. Mit dieser Information sind weitere Untersuchungen der Netzstabilität anhand von Rechenmodellen möglich. Die Komplexität der Problemstellung macht jedoch Näherungen notwendig und erfordert daher den Nachweis, daß das angewandte Simulationskonzept und die mathematischen Rechenmodelle das Netzverhalten richtig wiedergeben. Unser Hauptinteresse besteht zunächst darin, Meßergebnisse aus Versuchen in einem reellen Netz für eine Gültigkeitskontrolle des Simulationsverfahrens einzusetzen.

Da solche Netzversuche in einem überregionalen Verbundsystem (wie z.B. das UCPTE Netz) sehr schwierig sind, kommen nur relativ kleine Netze in Betracht, wo gewisse Netzversuche durchführbar sind, und wo gleichzeitig die Möglichkeit besteht, das reelle System rechnerisch nachzubilden. Mit diesem Ziel und unterstützt durch das Interesse der bolivianischen Energieversorgungsunternehmen wurden in der Zeit zwischen Mai und Juli dieses Jahres in Zusammenarbeit mit zwei regionalen EVU's, die das dortige (rein hydraulische) Verbundsystem betreiben, mehrere Netzversuche geplant, vorbereitet und durchgeführt.

Bild 14 gibt einen Überblick über die Lage beider Unternehmen, die durch eine Verbundleitung gekoppelt sind.



Bild 14: Bolivianisches Verbundsystem

Es wurden Messungen in beiden Netzbezirken durchgeführt, wobei ein Erzeugerleistungsdefizit durch das Öffnen der Verbundleitung bei unterschiedlichem Wirkleistungsbezug erzwungen wurde. Für die Messungen im gesamten Verbundnetz wurden Erzeugerausfälle in der Größenordnung von 3 - 5% der gesamten Systemlast hervorgerufen.

Bild 15 zeigt ein typisches Frequenzverhalten für die Trennung des Nord-Systems, wobei sich ein Wirkleistungsdefizit von 6.5% der Bezirkslast einstellte.

Bild 16 zeigt den entsprechenden Frequenzverlauf für das Zentralsystem bei einem ähnlichen Versuch nach einem Wirkleistungsdefizit von 6.7% der Last. Beide Systeme unterscheiden sich deutlich in ihrem Regelverhalten. Eine deutlich bessere Regelqualität ist für das Nord-System zu beobachten, was auch aus der Beurteilung der ermittelten Netzparameter hervorgeht.



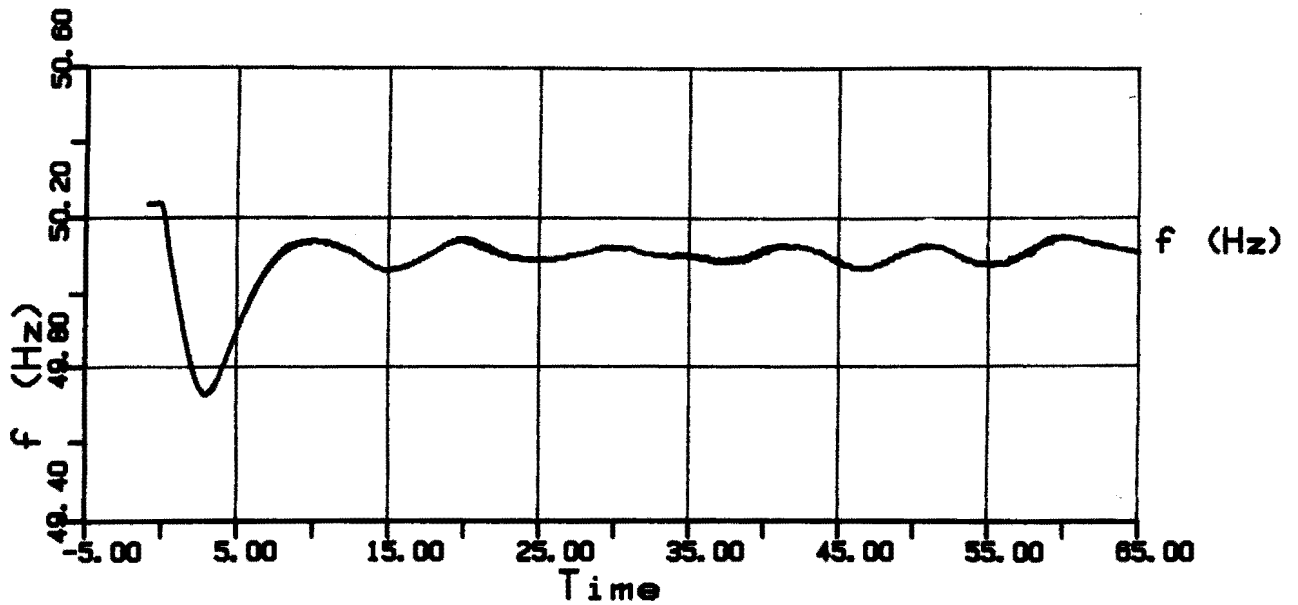


Bild 15: Gemessener Frequenz-Verlauf für ein Erzeugerleistungsdefizit von 6.5% im Nord-System

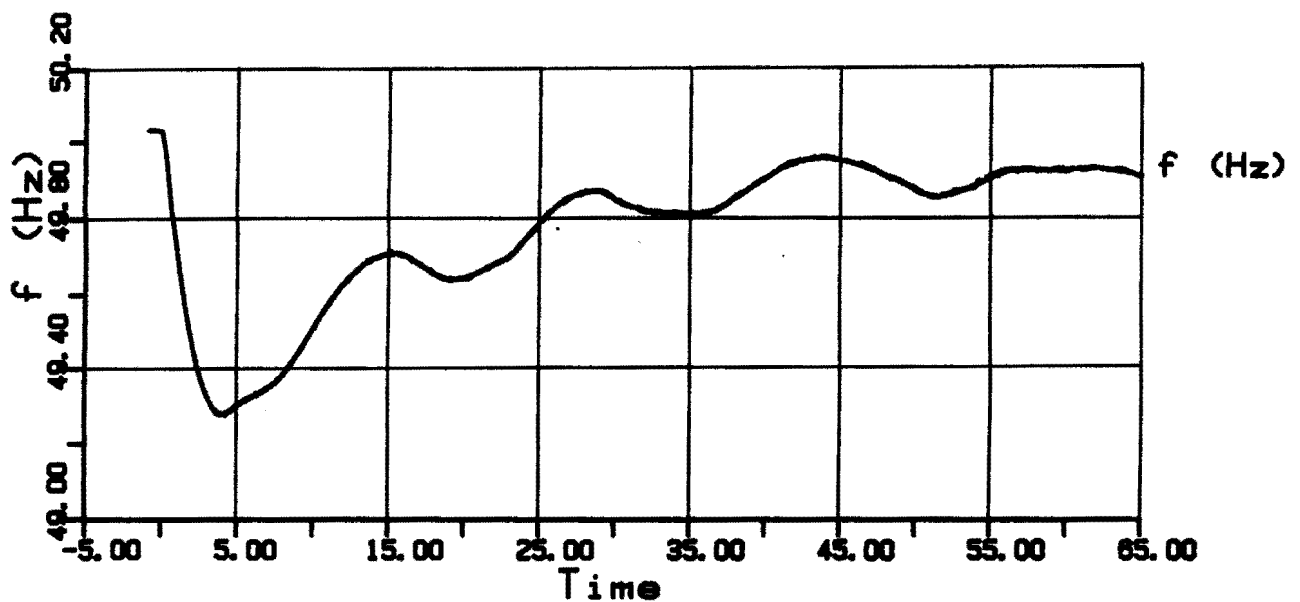


Bild 16: Gemessener Frequenz-Verlauf für ein Erzeugerleistungsdefizit von 6.7% im Zentral-System

In Bild 17 ist der gemessene Frequenzverlauf des gesamten Verbundsystems wiedergegeben, der für einen Erzeugerausfall von ca. 4.5% der gesamten Netzlast registriert wurde. Diese Frequenzkurve ist eine deutliche Überlagerung der Eigenschaften der einzelnen Netzbezirke.

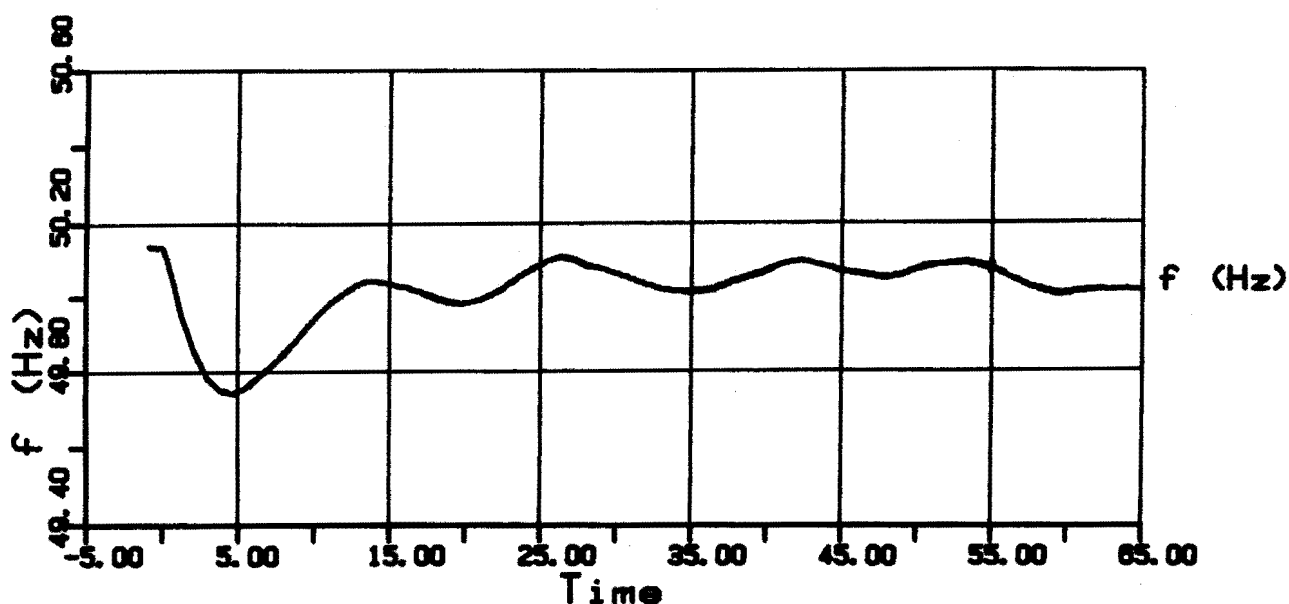


Bild 17: Gemessener Frequenz-Verlauf für ein Erzeugerausfall von 4.5% im Gesamtsystem

Aus den durchgeführten Messungen war es möglich, für jeden Netzbezirk sowie für das gesamte Verbundsystem wichtige Netzparameter mit großer Zuverlässigkeit zu bestimmen:

- Gesamt-Anlaufzeitkonstante der Netze
- Statikwerte der einzelnen Maschinen
- Netzleistungszahl und Netzstatik
- Laststatik (näherungsweise)

Durch die Auswertung der gemessenen Spannungsverläufe an einigen Generatorklemmen, wird eine genauere Information über den Einfluß der Wirkleistungsstörungen auf das Spannungsverhalten im Netz erwartet. Dieser Einfluß ist hauptsächlich bei der Bestimmung der Anlaufzeitkonstanten des Netzes und der Laststatik nicht außer Acht zu lassen.

Als nächster Schritt steht ein Vergleich zwischen Simulationsrechnungen (mit und ohne Spannungsmodellierung) und gemessenem Verhalten im Vordergrund. Dadurch soll die Zuverlässigkeit der Simulation dynamischer Vorgänge im Mittelzeitbereich erhöht werden.

### 3.2.6 Spannungs- und frequenzabhängiges Lastverhalten: Messung und Rechnung

Zur Messung der Spannungs- und Frequenzabhängigkeit elektrischer Verbrauchergruppen wurde in einer 110/10 kV Verteilstation ein Meßcomputer installiert. Begleitende Modellrechnungen für den untersuchten Netzbezirk sollten Aufschluß geben, ob ein synthetischer Ansatz, ausgehend von Modellen der Einzelverbraucher (z.B. Haushaltsgeräte, Leuchtstoffröhren usw.), und der Berücksichtigung der Mittelspannungsnetze zu vergleichbaren Resultaten führt.

Der Meßcomputer ist mit einer schnellen Leistungsmessung ausgestattet. Die Eingangsgrößen  $u(t)$ ,  $i(t)$  werden über zwei um  $T/4$  versetzte Intervalle mit Spannungs-Frequenzwandlern digital integriert. Eine PLL-Schaltung liefert neben einer stabilen Präzisionsfrequenzmessung die erforderliche  $T/4$ -Taktung und bewerkstelligt die Synchronisation mit der Eingangsspannung. Eingebettet in einen portablen Meßcomputer werden folgende Funktionen realisiert:

- kontinuierliche Messung (Ringspeicher)
- ein Meßwertsatz  $U_{\text{eff}}, I_{\text{eff}}, P, Q, f$
- Diskettenaufzeichnung der Signalverläufe nach Auftreten eines ausreichenden Nutzsymbols (Trigger).

Die Identifikation der Spannungs- und Frequenzabhängigkeit der Last aus Betriebsmeßdaten ist ohne besondere äußere Anregungen, wie z.B. einer Transformatorstufung, wegen der Dominanz des Lastrauschens  $\Delta P$  und  $\Delta Q$ , das das mit Spannungs- und Frequenzverlauf unkorrelierte Verbraucherverhalten präsentiert, nicht möglich. Vor einer Diskettenaufzeichnung muß also entschieden werden, ob durch Spannungs- oder Frequenzänderung eine ausreichende äußere Anregung des Lastmodells gegeben ist.

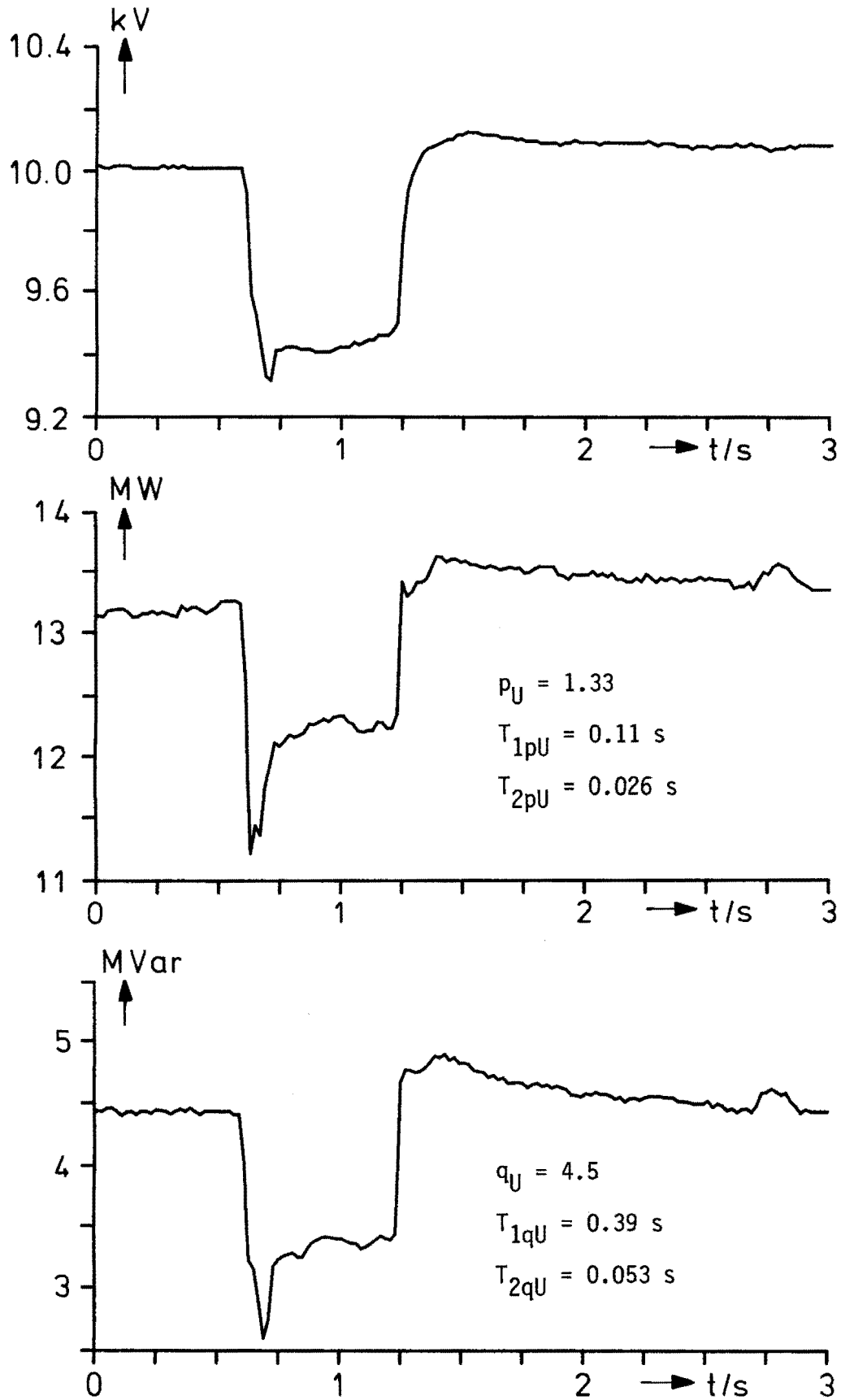
Parameter linearer Modelle wie z.B. für das der Spannungs-

### Wirkleistungsabhängigkeit

$$\frac{\Delta P}{P_0} = \frac{P_u + sT_{1pu}}{1 + sT_{2pu}}$$

werden aus diesen Meßdatensätzen mit Hilfe eines modifizierten Least-Squares-Algorithmus estimiert. Bild 18 zeigt einen solchen Signalverlauf mit zugehörigen estimierten Modellparametern. Für einen Meßzeitraum von 2 Sommermonaten wurden ca. 270 spannungstriggerte Signalverläufe mit Spannungssprüngen von 1.5% aufgezeichnet und zur Parameterschätzung herangezogen. Zur Analyse von tageszeitlichen Einflüssen können die geschätzten Modellparameter ausgewählter Tage und Tagestypen über die Uhrzeit der zugehörigen Messung aufgetragen werden. Eine gemittelte Darstellung von Meßwerten in Zeitfenstern z.B. zusammen mit einem Band, das die Standardabweichung für das betreffende Fenster nach oben und unten angibt, ist zweckmäßig. Dem 6.00 Uhr-Wert werden z.B. die gemessenen Parameter zwischen 5.30 Uhr und 6.30 Uhr zugeordnet.

Der Verlauf der Modellparameter wurde am Beispiel von  $p_u = \Delta P / \Delta U$  und  $q_U = \Delta Q / \Delta U$  mit den für die betreffenden Einstundenfenster berechneten Mittelwerten und einem Standardabweichungsband in Bild 19 für Werktage aufgetragen. Modellrechnungen für verschiedene Zeitstützstellen führen zu den als Punkte markierten Werten. Gute Übereinstimmungen im Falle des Wirkleistungsmodells stehen den im Vergleich zu den gemessenen Parametern zu niedrig gerechneten Blindleistungsspannungsempfindlichkeiten gegenüber. Hier spielen Unsicherheiten in der Bestimmung des Kompensationsgrads neben dem Einfluß industrieller Verbraucher eine Rolle.



**Bild 18:** Verlauf von Spannung und Leistung bei größerer Änderung und zugehörige geschätzte Modellparameter

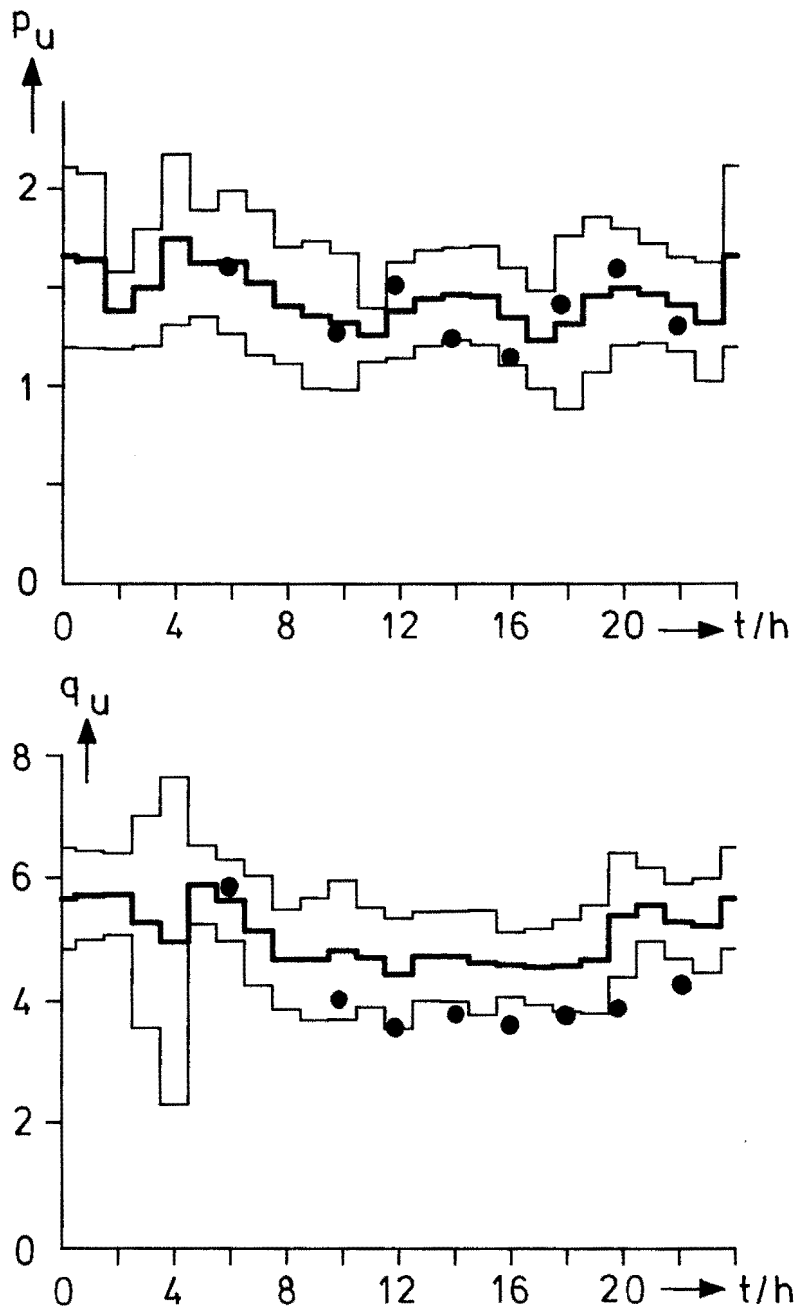


Bild 19: In Stundenfenstern gemittelter Verlauf der Modellparameter  $p_u$  und  $q_u$

Die Untersuchungen zeigten, daß der meßtechnische Ansatz für das Spannungsmodell eine gute Möglichkeit eröffnet, tageszeitliche und auch jahreszeitliche Einflüsse zu untersuchen und den synthetischen Ansatz zu bestätigen.

A. Kubbe

EV 8621

### 3.3 Schutz- und Leittechnik

#### 3.3.1 Störwerterfassung in elektrischen Energieversorgungsnetzen

Für die Störungsanalyse in elektrischen Energieversorgungsnetzen ist die Aufzeichnung analoger Größen wie Strom, Spannung, Frequenz usw. im Fehlerfall erforderlich. Nur eine genaue Kenntnis des Störungsverlaufs an verschiedenen Meßorten erlaubt eine genaue Auswertung der Störung. Eine kontinuierliche Aufzeichnung der analogen Größen mit großer zeitlicher Auflösung ist nicht sinnvoll. Die anfallenden Meßdaten lassen sich nicht mehr unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten abspeichern und auswerten. Eine Datenaufzeichnung, welche durch ein Störereignis gestartet und bei stationärem Verlauf der Eingangssignale abgebrochen wird, ist auch bei großer Auflösung (Abtastfrequenzen 1...4 KHz) geeignet.

Zusätzlich zu herkömmlichen Meßwerterfassungsgeräten sind an Störwerterfassungsgeräte folgende Anforderungen zu stellen:

- Keine Anregung des Erfassungsgerätes im ungestörten Betriebszustand
- Auslösung der Messung durch analoge und digitale Eingangssignale
- Aufzeichnung einer Störung einschließlich Vor- und Nachgeschichte
- Großer Dynamikbereich der Eingangskanäle insbesondere der Stromeingänge
- Zeitgleiche Aufzeichnung der Störung an verschiedenen Meßorten

Von den oben genannten Anforderungen ist bei der Konzeption von Störwerterfassungsgeräten die Festlegung der Startkriterien von besonderer Bedeutung. Eine technisch und wirtschaftlich günstige Lösung besteht in der Kopplung von Schutzeinrichtungen und Meßwerterfassungssystem. Die Triggerung der Meßwertaufnahme wird von einem digitalen Signal der Schutzeinrichtung gesteuert. Nachteilig ist, daß bei Ausfall der Schutzeinrichtung

oder einer von der Schutzeinrichtung nicht erfaßten Störung keine Meßwertaufzeichnung erfolgt.

Ist keine geeignete oder vollständige Schutzeinrichtung vorhanden, welche den Start der Datenaufzeichnung steuert, so kann die Meßwertaufnahme durch Auswertung der erfaßten Meßgrößen wie z.B. Über- oder Unterschreiten vorgegebener Grenzwerte, erfolgen. Je nach Komplexität der Triggerkriterien können sehr umfangreiche on-line Berechnungen erforderlich sein, um einen zuverlässigen Start der Meßwertaufnahme im Fehlerfall sicherzustellen. Je genauer die Störungsbedingungen definiert und programmiert werden können, um so größer ist die Wahrscheinlichkeit, daß eine Störung erkannt und aufgezeichnet wird. Bei der Festlegung der Startbedingungen ist ein Kompromiß zwischen bereitzustellender Rechenleistung und den zu programmierenden Störkriterien zu finden.

W. Horenkamp

### 3.3.2 Meßwerterfassung und -speicherung ohne Diskette

Transportable Meßwerterfassungssysteme, die als Datenspeichermedium Disketten oder Magnetbänder verwenden, erfordern entsprechende Vorsichtsmaßnahmen beim Transport und bei der Aufstellung der Geräte. Durch den enormen Preisverfall und größerer Speicherkapazität von CMOS-Bausteinen wird die Datenaufzeichnung mit Hilfe von CMOS-Speichern bei ungünstigen Einsatzbedingungen wirtschaftlich. Industriell angebotene CMOS-Speicherkarten sind in der Regel für spezielle Bus-Systeme (ECB-Bus, VME-Bus) ausgelegt. Nachteilig ist, daß die Meßwerterfassungsgeräte und der Auswerterechner den gleichen Anschluß besitzen müssen. Um diesen Nachteil zu vermeiden, wurde ein intelligentes Datenspeichermedium entwickelt, welches in der Grundaustufe mit einer seriellen und parallelen Schnittstelle ausgerüstet ist (Bild 20). Die Speichereinheit ist nicht als abgeschlossenes System konzipiert, sondern durch Hinzufügen weiterer Baugruppen zu einer kompakten netzunabhängigen Meßwerterfassungsanlage erweiterbar.



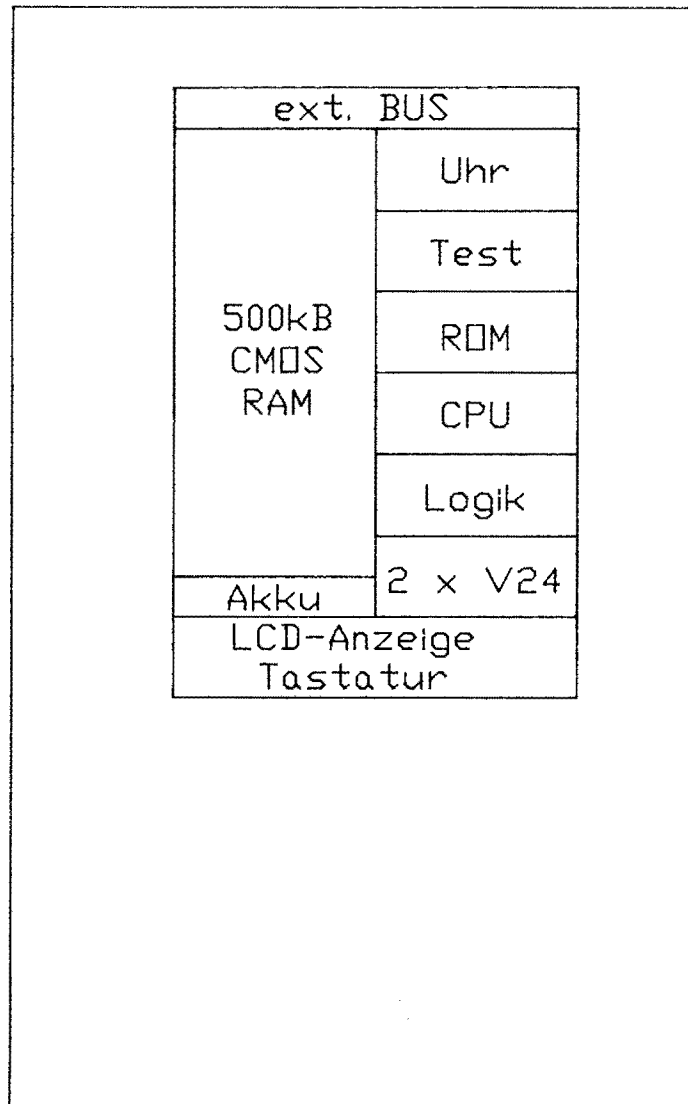


Bild 20: Meßdatenspeicher für ungünstige Einsatzbedingungen

Die Speichereinheit bietet gegenüber magnetischen Speichermedien folgende Vorteile:

- hohe mechanische Beanspruchung
- großer Temperaturbereich (-20...+70°C)
- geringe Stromaufnahme je nach Betriebsmodus 2uA...20mA
- großer Versorgungsspannungsbereich (3.5V...6.5V)
- Datenspeicher 30...500kByte (Optional 1MByte)
- vielseitige Anwendungsmöglichkeiten

Im Zusammenhang mit der Kabellangzeitüberwachung ersetzt die Speichereinheit das Diskettenlaufwerk. Der Anschluß der Speichereinheit erfolgt über eine serielle Schnittstelle. Zur Meßdatenauswertung ist die Speichereinheit dem Erfassungssystem zu

entnehmen und über eine konfigurierbare serielle Schnittstelle auf jedem beliebigen Arbeitsplatzrechner oder Großrechner anschließbar.

W. Horenkamp

EV 8634

### 3.3.3 Einsatz der E.L.S.A. (Elektronische Löserspulenabstimmung) an Untertagenetzen des deutschen Steinkohlebergbaus

Bei der Erdschlußkompensation in gelöschten Netzen ist es in Untertagenetzen von großer Bedeutung (BVOE § 29.5), daß ein möglicher Erdschlußstrom den vorgegebenen Wert von 10A nicht überschreitet. Diese Schranke soll das Entstehen eines Lichtbogens an der Fehlerstelle verhindern bzw. ein Verlöschen des Lichtbogens ermöglichen. Durch die Dynamik des Steinkohleabbaus bedingt ist die Netztopologie und damit der zu kompensierende kapazitive Fehlerstromanteil nicht konstant. Die Kompensationsinduktivität der Löserspule muß stetig angepaßt werden. Dieser Anpassungsvorgang wird mit der E.L.S.A. automatisiert bewerkstelligt. E.L.S.A. wertet für ihre Regelalgorithmen nur die 50Hz-Komponente aus. Damit wird vermieden, daß harmonische Oberschwingungen die Meßwerte verfälschen. Innerhalb der E.L.S.A. sind zwei unterschiedliche Regelalgorithmen installiert worden, der Spannungsmaximumregler und der Nullpunkt-Parameter-Regelalgorithmus (NPR).

Dem gegenwärtigen Stand der Technik entspricht das Spannungsmaximumkriterium. Als Netzzustandsgröße dient hierbei der Betrag der Verlagerungsspannung  $U_0$  an der Löserspule im erdschlußfreien Netz. Unter der Annahme einer konstanten Unsymmetrie  $I_d$  des Versorgungskabels ergibt sich folgender Zusammenhang zwischen der Verlagerungsspannung  $U_0$  und den Netzparametern:

$$U_0 = 1 / (j(3 \omega C_E - 1/\omega L) + 1/R_W) * I_d$$

$C_E$ : mittlere Leiter-Erd-Kapazität einer Phase  
 $L$ : Induktivität der Löschspule  
 $R_w$ : Wirkverluste des Nullsystems des Netzes  
 $I_d$ : Ersatzstromquelle resultierend aus der  
Kabelunsymmetrie

Die Verlagerungsspannung  $U_o$  nimmt dann ihr Maximum  $U_{omax}$

$$U_{omax} = R_w * I_d$$

an, wenn die Kompensationsbedingung

$$3 \omega C_E = 1/\omega L$$

erfüllt ist. Im Erdschlußfall gilt für den Fehlerstrom  $I_E$  an der Fehlerstelle

$$I_E = j(3\omega C_E - 1/\omega L) * U + 1/R_w * U$$

$U$ : Leiter - Erd - Spannung,

wodurch das Spannungsmaximum mit der Kompensationsbedingung zum Erdschlußstromminimum  $I_{Emin}$  führt.

$$I_{Emin} = 1/R_w * U$$

Dieses mögliche Stromminimum wird bei einer linearen Spule im fehlerfreien Fall durch das Spannungsmaximum angezeigt (Prinzip des Spannungsmaximumreglers). Je nach Bauform der Löschspule ergibt sich eine Nichtlinearität der Spuleninduktivität zwischen erdschlußfreiem Netz und dem Erdschlußfall. Je größer dieser Nichtlinearitätsgrad ausfällt, je weniger repräsentiert das Spannungsmaximum im erdschlußfreien Netz das Stromminimum im Erdschlußfall. Bei einer nichtlinearen Spule ist das erzielbare Stromminimum nicht identisch mit dem Spannungsmaximum im erdschlußfreien Netz (Bild 21). Mit dem Spannungsmaximumkriterium ist weder eine Vorhersage des Fehlerstroms möglich, noch können die expliziten Verstimmungsgrade angegeben werden, da die aktuelle Leiter-Erd-Kapazität  $C_E$  des Netzes nicht bestimm-

bar ist. Hinzu kommt noch der Nachteil der Mehrdeutigkeit des Betrages der Verlagerungsspannung  $U_0$  bei Schaltvorgängen.

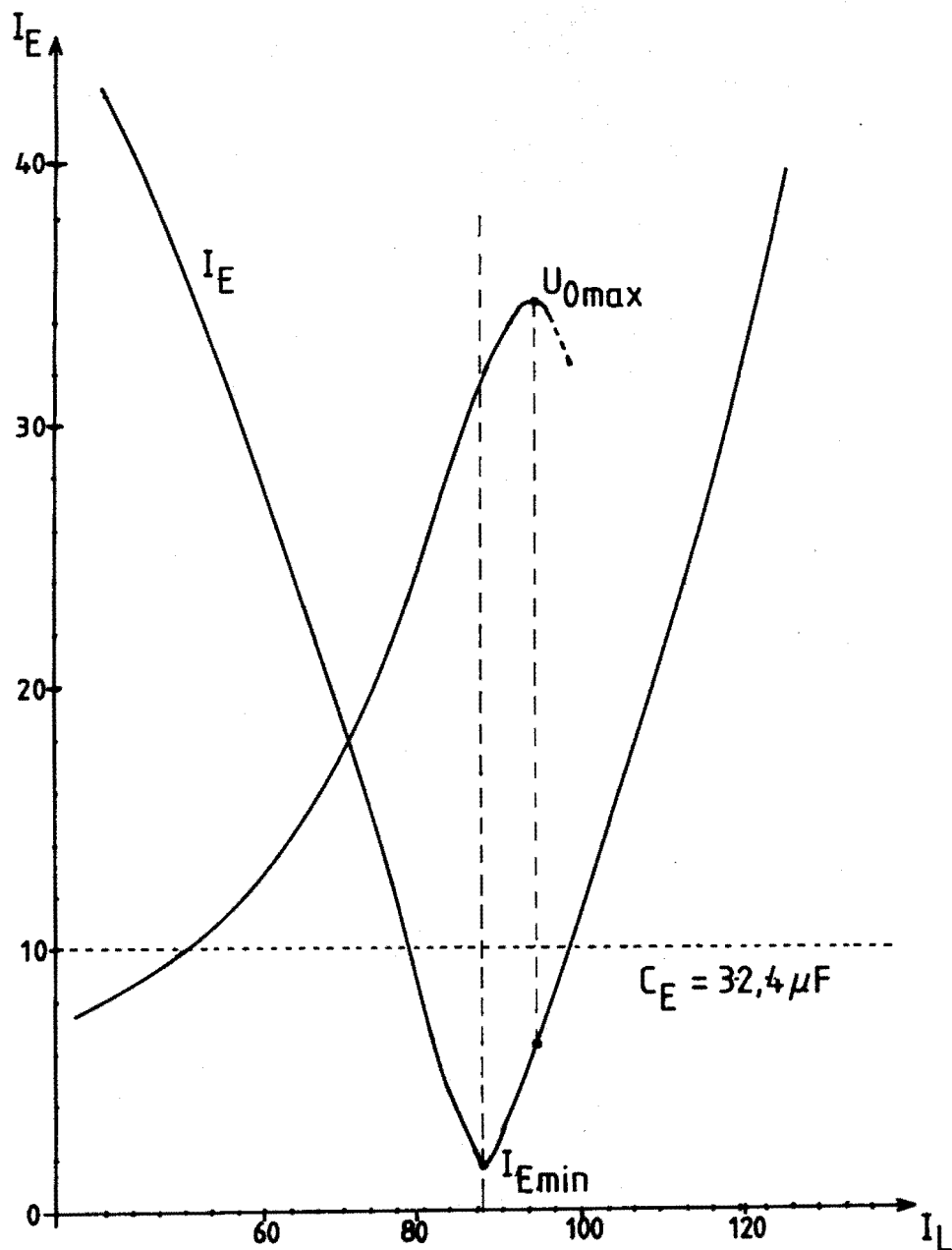


Bild 21: Verlauf des möglichen Fehlerstromes  $I_E$  und der Verlagerungsspannung  $U_0$  in einem 5 kV Untertagenetz

Der Kern des neuen NPR-Reglers in der E.L.S.A. (Nullparameter-Resonanz) ist die direkte Ermittlung der Leiter-Erd-Kapazität  $C_E$  des Netzes im erdschlußfreien Zustand. Dafür muß neben der Verlagerungsspannung  $U_0$  nach Betrag und Phase auch der Verlagerungsstrom  $I_L$  (Strom durch die Löschspule) gemessen werden. Die Messung des Stromes ist derzeit nur mit Stromwandlern mög-

lich, die für den Nennstrom dimensioniert sind und damit im erdschlußfreien Netz keine hinreichend genauen Werte liefern. Deshalb wird der Stromwert aus der Stellung des Spulenkerns und der Kennlinie der Spule ermittelt. Das Spulenmodell besteht hierbei aus einer Parallelschaltung einer Induktivität und dem Eisenverlustwiderstand, der im wesentlichen die Wirkverluste repräsentiert. Außerdem läßt sich durch das Ausmessen der Löschspule eine vorhandene Nichtlinearität im NPR berücksichtigen. Dadurch kann der NPR der E.L.S.A. das tatsächliche Fehlerstromminimum  $I_{Emin}$  ansteuern. Durch die Kenntnis der Leiter-Erd-Kapazität  $C_E$  kann weiterhin eine definierte Verstimmung programmiert werden, wobei durch die fortlaufende Fehlerstromprognose für  $I_E$  die Einhaltung der Fehlerstromschranke nach BVOE § 29.5 dauernd überwacht werden kann.

Messungen an einem 5kV-Untertagenetz bestätigen die Vorteile des neuen NPR. Mit der E.L.S.A. wurde zuvor die 800 kVA-Löschspule für das Untertagenetz auf dessen Eisenverluste und Induktivitäten ausgemessen und ein entsprechendes Kennlinienfeld in E.L.S.A. implementiert.

Der Nichtlinearitätsgrad der Löschspuleninduktivität betrug im Arbeitspunkt zum Zeitpunkt des NPR-Einsatzes ca. 6%. Der Fehlerstrom  $I_E$  hätte somit im Erdschlußfall bei einer Löschspulenabstimmung gemäß Spannungsmaximum  $U_{omax}$  ca 6A betragen. Der Einsatz des NPR lieferte eine exakte Abstimmung auf das mögliche Fehlerstrom-Minimum von 1.7A (Bild 21).

Zum Zeitpunkt der Messung der Meßreihe wies das 5kV-Untertagenetz eine mit der E.L.S.A. gemessene Leiter-Erd-Kapazität von 32.4  $\mu F$  pro Phase auf, was zu einem kapazitiven Fehlerstrom von 88A bei einem satten Erdschluß führen würde. Der verbleibende Fehlerstrom im Spannungsmaximum verletzt die 10A-Schranke nicht, eine zusätzliche geringe Überkompensation ( $I_L > I_L(U_{omax})$ ) ist aber bereits problematisch (Bild 21).

W. Eghardt

### 3.3.4 Fehlertolerante Rechnersysteme für Schutzanwendungen in Mittelspannungsnetzen

Die Automatisierung technischer Prozesse z.B. in der Verfahrens- und Steuerungstechnik, der Fertigungstechnik und der Leit- und Schutztechnik erfolgt mit stark zunehmender Tendenz auf der Basis elektronischer Baugruppen mit hochintegrierten Schaltkreisen. Dies ist darin begründet, daß die Digitaltechnik einen Entwicklungsgrad erreicht hat, der gegenüber analogen Schaltungsrealisierungen neue wesentliche Qualitäten aufweist:

- Die Schaltungen sind in der Struktur nicht spezialisiert, die Anpassung an die jeweilige spezielle Anwendung übernimmt die Software, wobei mehrere unterschiedliche Funktionen möglich sind.
- Eine Alterung der Schaltung oder Umwelteinflüsse haben keinen Einfluß auf eingestellte Parameter.
- Komplexe Algorithmen können implementiert werden.
- Ebenso kann jederzeit einfach ein neuer Algorithmus durch Auswechseln des Programmspeichers verwendet werden.
- Digitale Realisationen beispielsweise von Filtern ermöglichen ganz neue Filterkennlinien, die mit analogen Schaltungen nicht möglich sind.
- Die durch die Software implementierte Intelligenz ermöglicht eine begrenzte Lernfähigkeit eines digitalen Systems, so daß das System selbständig Anpassungen an die jeweilige Situation in begrenztem Rahmen vornehmen kann.
- Das System kann sich und angeschlossene Peripheriegruppen testen, Testergebnisse auswerten und gezielt Reaktionen einleiten.
- Die Kommunikation mit übergeordneten Systemen ist in einem wesentlich umfangreicheren Maß als bei analogen Schaltungen möglich.

Neben den deutlichen Vorteilen, die der Einsatz von digitalen Schaltungen mit sich bringt, sind aber auch neue Fehlerquellen enthalten. Das Ausfallverhalten ist wesentlich unbestimmter als bei analogen Schaltungen. Zusätzlich können neben Hardwarefehlern auch Softwarefehler auftreten. Dies ist eine Fehler-

quelle, die bisher bei der Qualitätsprüfung von elektronischen Baugruppen nicht zu berücksichtigen war. Ein Mikrorechnersystem ist als Einheit, bestehend aus Hard- und Software, zu prüfen.

Wesentlich für die Konzeption eines sicherheitsrelevanten Rechnersystems ist das vorgesehene Anwendungsfeld. Erst die Analyse des Einsatzbereichs bestimmt die Architektur des Rechnersystems und die Struktur der Software.

Aufbauend auf dem zugrundegelegten Hardwarekonzept kann die Software Fehler transienter wie auch statischer Art erkennen, lokalisieren und beheben. Wenn keine Behebung möglich ist, kann das System noch in einen sicheren Zustand überführt werden. Genauso muß die Hardware Fehler in der Software aufdecken und Folgen verhindern. Durch diese Maßnahmen wird das System fehlertolerant, d.h. ein oder mehrere Fehler, die auch bereits im Neuzustand vorhanden sein können, werden ohne Folgen sicher behandelt. Das System Prozeß-Steuerrechner befindet sich immer in einem definierten Zustand und wird bei einem Fehler im Rechner in einen sicheren Zustand überführt.

Der Einsatz von Mikrorechnern in der Energieversorgung, besonders in extremen Bereichen wie z.B. im Bergbau, erfordert ganz spezielle Eigenschaften des Rechners. Dies sind:

- Störunanfälligkeit bei extremen Umweltbedingungen
- hohe Verfügbarkeit
- Zuverlässigkeit
- Flexibilität
- einfacher Aufbau und Übersichtlichkeit
- einfache Bedienung

Ausgehend von diesen Anforderungen reduziert sich die Zahl der möglichen Baugruppen erheblich. Als Beispiel sei hier der wesentlich höhere Aufwand für die Überwachung und den Test eines 16-Bit-Prozessors im Vergleich zu einem 8-Bit-Prozessor genannt. Ebenso ist der Energieverbrauch ein entscheidendes Kriterium, da die Abführung von Verlustwärme in geschlossenen Gehäusen schwierig ist. Daneben muß bei Netzausfall das System

über Akkumulatoren weiter versorgt werden, was wieder Platzprobleme mit sich bringt.

Aufgrund umfangreicher Überlegungen wurde ein Einplatinenrechner mit Schnittstellenkarte speziell für Anwendungen im Bergbau entwickelt. Als Systemarchitektur für den Netzschutz in diesem Bereich kommen nur einkanalige Rechner oder Duplexrechner in Frage. Da die Zuverlässigkeit durch Selbstüberwachung und Verfügbarkeit des Systems zwei gegenläufige Ziele sind, wurde ein Duplexsystem gewählt. Hier kann die Zuverlässigkeit durch den Fremdttest (Vergleich der Rechner) gesteigert werden, ohne die Verfügbarkeit wesentlich einzuschränken. Alle Systeme mit höherer Redundanz sind für das vorgesehene Einsatzgebiet zu komplex.

Für das Duplexsystem wurde entsprechende Software unter den folgenden Aspekten entworfen:

- ähnliche Programmroutinen wie in einem "normalen" Betriebssystem sollen verfügbar sein, allerdings keine Diskettenoperationen
- eine Erweiterung des Betriebssystems durch Test- und Überwachungsroutinen ist vorzunehmen
- die Programmentwicklung muß mit umfangreicher Dokumentation erfolgen, um Änderungen leicht durchführen zu können und auch eine Prüfung durch Zulassungsbehörden vorzubereiten
- der Duplexrechnerbetrieb muß ohne wesentliche Änderungen eines Programms im Vergleich zum Einzelrechnerbetrieb möglich sein
- die Software muß in der Struktur und dem Inhalt sicherheitsrelevanten Anforderungen genügen

Unter diesen Aspekten ist ein Programmpaket konzipiert und erstellt worden. Aufbauend auf dieses Grundsystem wurde ein vorhandener Algorithmus zur Erdschlußüberwachung implementiert. Das System Duplexrechner mit Erdschlußüberwachung befindet sich zur Zeit in der Testphase. Dazu wurden in einem Analogmodell



eines Kabelnetzes verschiedene Netzkonfigurationen und Störungen simuliert und die Zuverlässigkeit des Konzeptes bestimmt.

F. Eickhoff

Diese Arbeit wurde vom Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) gefördert.

### 3.3.5 Konzeption eines integrierten Schutzsystems für den deutschen Steinkohlenbergbau

Der fortschreitende Einsatz neuer Technologien im deutschen Steinkohlebergbau gestattet eine zunehmende Prozeßautomatisierung der Förderung. Insbesondere kann hier durch die Mikroprozessor-Technologie in der Steuer- und Leittechnik eine erhöhte Transparenz der Produktionsabläufe im Betrieb erreicht werden. Das anzustrebende Ziel ist die Optimierung der Effektivität und der Verfügbarkeit der installierten Betriebsmittel.

Aus dieser Entwicklung ergeben sich spezielle neue Anforderungen für die Verteilung der elektrischen Energie untertage:

- die Vergrößerung der installierten elektrischen Leistung
- die Vergrößerung der Verteilungsnetze.

Darüberhinaus ist eine hohe Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit der elektrischen Energieversorgung für die Untertagebetriebe von zentraler Bedeutung (Wasserhaltung, Förderanlagen, Bewetterung, Wetterüberwachung usw.).

Zur Unterstützung dieser Entwicklung müssen an eine moderne Sekundärtechnik (Leittechnik in Schaltanlagen) schärfere Anforderungen gestellt werden. Für das Aufgabengebiet der Schutztechnik sind die folgenden Verbesserungen anzustreben:

- Steigerung der Selektivität der Schutzfunktion ohne gleichzeitige Vergrößerung der Reaktionszeiten,

- Integration des Schutzsystems in ein Leitsystem, mit effizienter Unterstützung der Fehlerortung.

Bei der Konzeption dieses Schutzsystems muß aber zusätzlich berücksichtigt werden, daß aufgrund der Wanderung der Untertagebetriebe stets mit Netztopologieänderungen auch innerhalb kurzer Zeiträume zu rechnen ist. Aus dieser Dynamik des Netzes ergibt sich die Forderung nach einem möglichst anpassungsfähigen und übersichtlich strukturierten Schutz- und Leitsystem. Die Konzeption dieses Systems wird auf der Basis der Mikroprozessor-Technologie mit dem Ziel der Integration der einzelnen Schutzfunktionen in ein vorhandenes Leitsystem durchgeführt. Die erforderliche Erhöhung der Selektivität des Schutzes kann durch hochwertige Signalanalysealgorithmen erreicht werden. Weitere Vorteile dieser Technik sind:

- hohe zeitliche Auflösung der Meßsignale,
- verbessertes Verhalten unter transienten Meßbedingungen,
- Speicherung der Meßwerte U,I für die Störschreibung,
- einfache Parametereinstellung vor Ort sowie von einer Netzleitstelle aus.

Der Entwurf einer geeigneten Systemstruktur unter Berücksichtigung von technisch-wirtschaftlichen Gesichtspunkten zeigt deutliche Vorteile für die Integration der Einzelfunktionen in ein autarkes, dezentrales Kompaktschutzmodul. Insbesondere wird durch diese Realisierung die Einbindung des Schutzgerätes in das Netz erheblich vereinfacht, weil jedes Meßsignal für alle Schutzfunktionen nur einmal dem Gerät über ein Relais, Optokoppler oder Übertrager zugeführt und angepaßt werden muß. Gleichzeitig werden die Kosten auf der Netzseite für die Meßwandler bezogen auf ein Einzelschutzkonzept gesenkt, weil für jedes Strom- und Spannungssignal für Schutz und Meßaufgaben nur ein Wandler eingesetzt werden muß. Ein weiterer Vorteil wird sich durch die Reduktion der erforderlichen Rechenkapazität im Vergleich zur Rechenkapazitätssumme der Einzelschutzrelais ergeben, weil eine gleichzeitige Anforderung aller Schutzfunktionen unmöglich ist, oder aber durch Prioritätenvergabe beherrschbar wird.

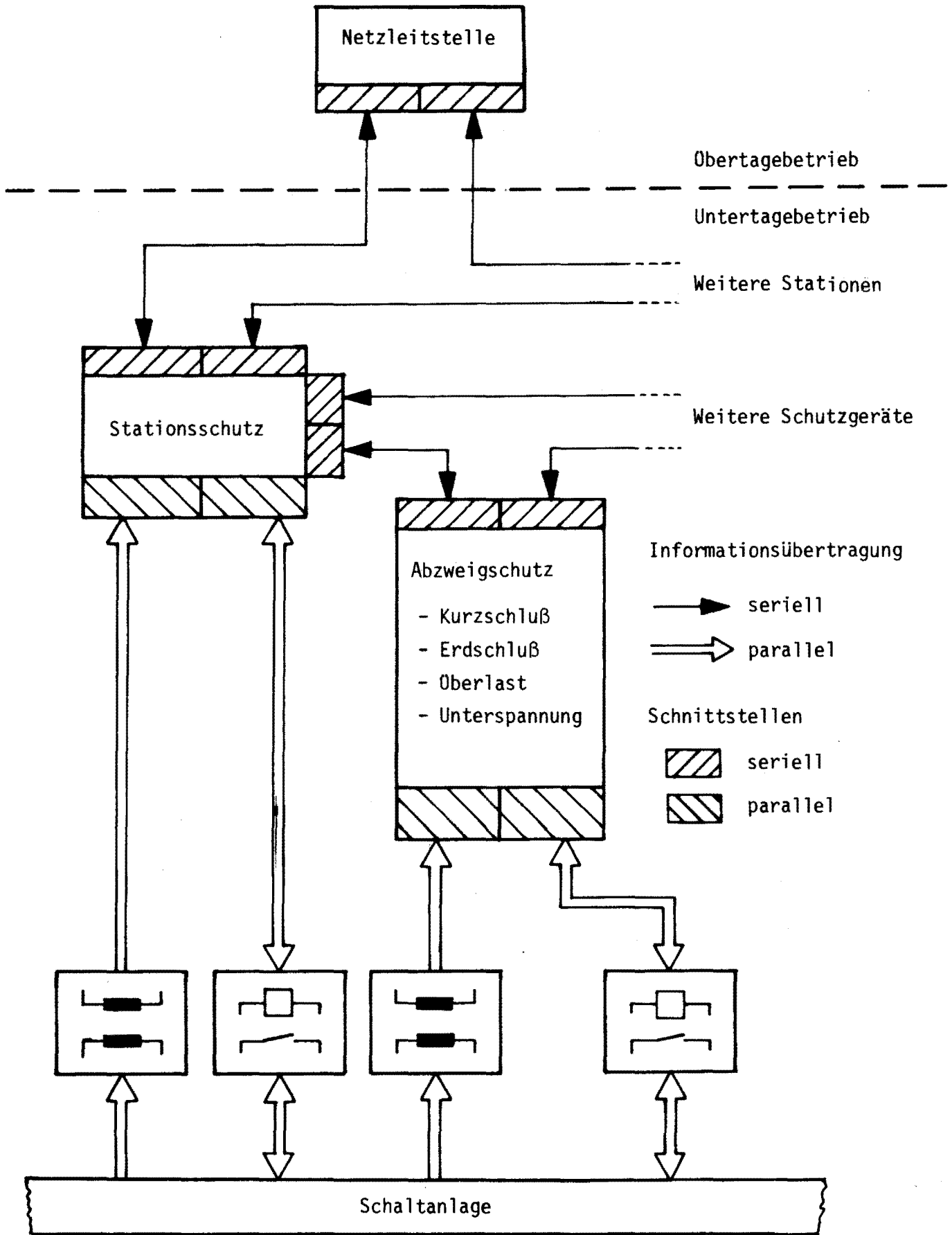


Bild 21: Strukturbild eines integrierten Schutzsystems

Ein weiterer Gesichtspunkt für die Konzeption ist die sicherheitstechnische Analyse des Schutzsystems. Im Hinblick auf die Mikroprozessor-Technologie wird hier eine neue Qualität realisierbar sein, weil im Gegensatz zu einem konventionellen Schutzrelais der Mikroprozessorschutz die prinzipielle Fähigkeit besitzt, hard- und softwaremäßige Selbsttests eigenständig durchzuführen. Sämtliche Geräte können sich daher selbst überwachen, so daß Fehlermeldungen unmittelbar beim Auftreten einer internen Störung generiert werden. Dadurch ist in Verbindung mit einem Leitsystem eine lückenlose Überwachung von der Netzleitstelle gewährleistet. Im betrieblichen Einsatz dieser Schutzgeräte wird sich daher der Prüf- und Wartungsaufwand erheblich verringern. Insbesondere für die Entwicklung werden die folgenden Fragen von Bedeutung sein:

- Welche Verbesserung der Zuverlässigkeit läßt sich auf der Basis des Selbstüberwachungsprinzips des Mikrorechners erzielen? Wie groß ist die Fehleraufdeckungsrate?
- Wie können Plausibilitätstests zur Überprüfung der hardwaremäßigen Funktionsfähigkeit einzelner Schutzfunktionen beginnend am Wandler bis hin zum Leistungsschalter mit integriert werden?

Zusammenfassend läßt dies integrierte Schutzsystem zahlreiche Vorteile für die praktischen Anwendungen erwarten. Die einfache Handhabung in Verbindung mit einer hohen Flexibilität wird dabei durch softwaremäßige Anpassungen unterstützt.

W. Ebbinghaus

EV 8638

Diese Arbeit wurde vom Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) gefördert.

### 3.3.6. Automatisierung des Erdschlußnetzmodells

Das Erdschlußnetzmodell für die experimentelle Untersuchung von Erdschlußvorgängen wurde bisher manuell gesteuert, d.h. die einzelnen Leitungsabschnitte, Erdschlußstellen usw. mußte von Hand geschaltet werden. Bei einem einzelnen Versuch ist dies problemlos, wenn aber eine Versuchsreihe über einen längeren Zeitraum, mit verschiedenen Fehlerstellen und Leitungen, durchgeführt werden soll, ist die manuelle Steuerung zu aufwendig. Aus diesem Grund wird das Netzmodell automatisiert; d.h. die manuellen Schaltfunktionen werden von einem externen Rechner übernommen. Dabei bleiben die manuellen Bedienelemente erhalten, so daß das Netzmodell entweder manuell oder mit einem externen Rechner gesteuert werden kann. Das Blockschaltbild 22 zeigt den prinzipiellen Aufbau.

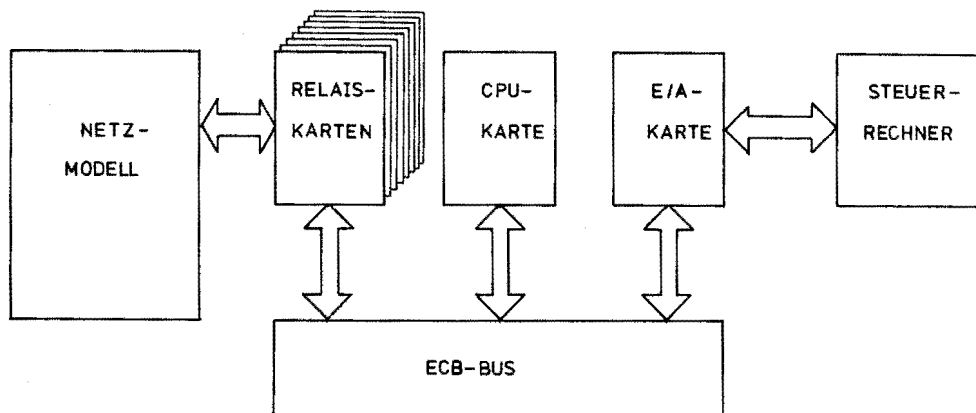


Bild 22: Blockschaltbild der Netzmodellautomatisierung

Die Hilfsschütze zum Schalten der Leitungen, Erdschlüsse usw., die bisher von Hand mit einem Taster geschaltet wurden, werden jetzt über Relais angesteuert. Sie befinden sich auf einer speziell für die Anforderungen des Netzmodells entwickelten Relaiskarte, welche über einen ECB-Bus von einer Einplatinencomputerkarte gesteuert wird. Die EPC-Karte ist über eine E/A-Karte mit einer seriellen Schnittstelle an den Steuerrechner angeschlossen.

Ziel der Automatisierung ist es, umfangreiche Versuchsreihen am Erdschlußnetzmodell vornehmen zu können. Die automatische

Steuerung ermöglicht eine vergleichende Untersuchung der installierten Schutzrelais, wobei die Netzkonfiguration und der Erdschlußort innerhalb der Versuchsreihe softwaremäßig beliebig veränderbar ist. Damit wird das Netzmodell zu einem vielseitigen Testinstrument zur Analyse verschiedener Schutzfunktionen und Schutzalgorithmen. In der Praxis wird das so ausgeführt, daß das Netzmodell mehrere Tage eingeschaltet bleibt, wobei über ein Steuerungsprogramm in verschiedenen Leitungsabschnitten zu unterschiedlichen Zeitpunkten Erdschlüsse geschaltet werden. Dabei kann auch das Netz zwischenzeitlich in seiner Konfiguration verändert werden. Durch diese Untersuchung kann man die Zuverlässigkeit und Effektivität von verschiedenen Schutzgeräten über einen längeren Zeitraum prüfen.

M. Jaspert

### 3.3.7 TN-System als umfassender Schutz in Verbrauchernetzen

Die Grundidee des TN-Systems ist es, den auftretenden Fehlerstrom über eine mitgeführte Leitung und nicht über das Erdreich zur Spannungsquelle zurückzuführen. Somit lassen sich recht einfache und kostengünstige Schutzeinrichtungen wie Sicherungen und LS-Schalter einsetzen. Defekte Betriebsmittel werden abgeschaltet, da ein Körperschluß zu einem Kurzschluß mit entsprechend hohem Fehlerstrom führt. Damit ist auch die große Verbreitung des TN-Systems zu erklären. In der Regel sind keine aufwendigen Maßnahmen wie z.B. Potentialsteuerung im TT-System oder Erdschlußüberwachung mit IT-System nötig.

Das IT-System findet ausschließlich in Industrieanlagen Anwendung. Hier sind auch die Voraussetzungen einer Beobachtbarkeit des Betriebszustandes und eine schnelle Fehlerbeseitigung nach auftretender Fehlermeldung gegeben.

Das TT-System wird heute dort eingesetzt, wo Verbraucheranlagen in Netzausläufern zu versorgen sind, wie z.B. landwirtschaftliche Betriebe oder abseits liegende Häuser. Insbesondere in landwirtschaftlichen Betrieben ist eine höchstzulässige Berüh-

rungsspannung von 25V einzuhalten. Bevorzugt wird hier das TT-System eingesetzt, da bei Auftreten eines Fehlers eine maximale Berührungsspannung kleiner 25V zu erwarten ist.

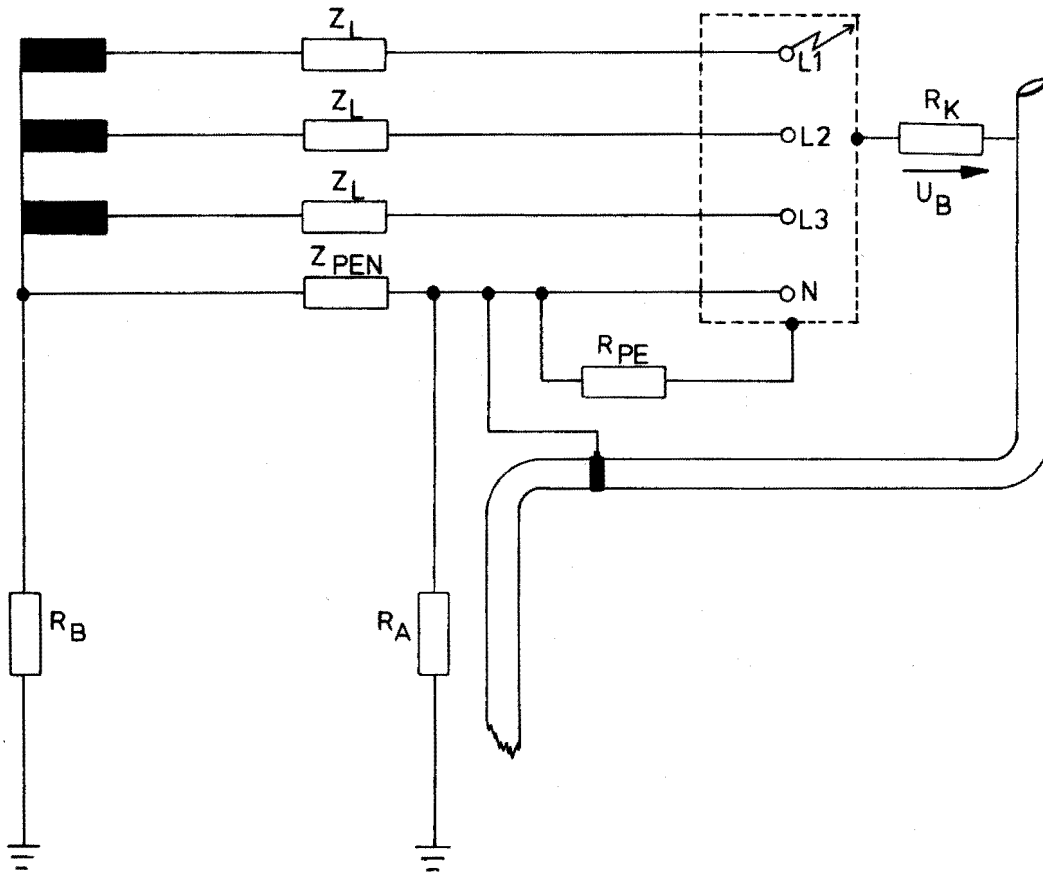


Bild 23: TN-S-System mit Hauptpotentialausgleich

Berechnungen zeigen, daß für diesen Einsatzbereich von TT-Systemen die Anwendung des TN-Systems ebenfalls möglich ist. Unter Einbeziehung eines Hauptpotentialausgleiches ist eine Begrenzung der Berührungsspannung auf  $U_B \leq 25V$  durchaus einzuhalten (Bild 23)

$$U_B = \left[ \frac{R_{PE}}{Z_L + R_{PE} + Z_{PEN} \parallel (R_A + R_B)} \right] * U_N / \sqrt{3}$$

Kritisch kann es in den Randbereichen einer Potentialsteuerung werden, wenn

- die Fehlerspannung  $U_F > 25V$  (50V) ist (vgl. TT-System) und
- die natürlichen Erdungsverhältnisse im Randbereich der Potentialsteuerung derart niederohmig sind, daß aufgrund

eines zu steilen Gradienten der Standortpotentiale (z.B. bei der Nutztierhaltung) eine zu hohe Schrittspannung  $U_S$  auftreten kann.

Durch den Einsatz eines Fehlerstrom-Schutzschalters ( $I_f \leq 30\text{mA}$ ) wird auch in diesen Randgebieten eine Abschaltung erreicht. Eine Verbraucheranlage mit Hauptpotentialausgleich und FI-Schutzschaltung hat überdies den Vorteil, daß bei Ausfall des Nulleiters in der Netzversorgung noch ein funktionstüchtiges TT-System verbleibt.

W. Eghardt, K.-D. Tesch

### 3.3.8 Einsatz von Mikrorechnern zur Überwachung des Kraftwerkbetriebes

Durch die wachsende Komplexität der Energiesysteme vergrößern sich die Probleme auf dem Gebiet der Leittechnik. Den Kraftwerksbetrieb aufgrund von Erfahrungen zu führen, kann sowohl aus wirtschaftlichen Gründen als auch aus Zuverlässigkeitsbedingungen den Ansprüchen des Systembetriebes nicht mehr genügen. Um unerwartete Schäden, die meistens durch Anlagefehler verursacht werden, zu erkennen, und um wichtige Größen im Betrieb zur Analyse des dynamischen Verhaltens aufzuzeichnen, muß man die Zustände der Anlage oder die Abweichungen der Größen von ihren jeweiligen Sollwert ständig überwachen.

Ein mikrorechnergestütztes Überwachungssystem kann die Prozeßgrößen on-line überwachen und die Daten on-line oder off-line verarbeiten und auswerten, z.B.

- Schwingungsüberwachung von Turbinen- und Generatorwellen.  
Damit kann man das dynamische Verhalten der Welle, der Lager und der Fundamente im Betrieb untersuchen und versteckte Fehler der Welle frühzeitig erkennen.
- Generatorüberwachung  
Dadurch kann man eine Übersicht über die Zustände des laufenden Generators, z.B. im Hinblick auf die Isolationsbeanspruchung, erhalten und versteckte Fehler erkennen.



- Die Überwachung des Übergangsverhaltens von Kraftwerksblöcken.  
Dadurch kann man eine genaue Kenntnis über das Übergangsverhalten eines Blocks im Störfall bekommen, z.B. wie schnell die Reservekapazität reagiert, um danach den Systembetrieb zu verbessern.
- Ermüdungserscheinungen im Bereich des Dampferzeugers.  
Dadurch kann festgestellt werden, in welchem zeitlichen Abstand eine Wartung vorzunehmen ist.

Die Datenauswertung umfaßt folgende Funktionen

- Statistische Analyse
- Tendenzanalyse
- Gradientenanalyse
- Harmonische Analyse
- Fehlerdiagnose

Diese Funktionen bieten dem Betreiber wichtige Informationen über den Systemzustand und die Möglichkeit, diesen zu verbessern.

Der Erfolg des Überwachungssystems hängt wesentlich von der verfügbaren Software ab. Für die Verbindung zwischen Rechnerhardware und Anwendungs-Software spielt die Systemsoftware eine große Rolle.

Eine Verbindung des Überwachungssystems mit dem Prozeßrechner im Kraftwerk oder dem Zentralrechner in der Netzleitzentrale kann dem gesamten System aufgrund von verteilten Ressourcen große Vorteile bringen. Dabei kann die Verbindungsstruktur eine Mikrorechner-Hauptrechner oder eine Multimikrorechner-Hauptrechner Struktur sein. Zu beachten ist, daß ein schneller Datenübertragungskanal zwischen Mikrorechner und Hauptrechner und ein effektives, flexibles Betriebssystem vorhanden sein muß.

D. Dang

#### 4. VORTRÄGE

##### 4.1 Beiträge für das Kolloquium

- 04.06.1986 Dr.-Ing. Fischer, KWU, Erlangen  
"Kraftwerk-Leittechnik: Stand und Trend"
- 15.06.1986 Dr.-Ing. M. Gacka, Hartmann & Braun,  
Heiligenhaus  
"Querdifferenzschutz für Mittelspannungsnetze  
des Steinkohlebergbaus als Beispiel eines Strom-  
vergleichschutzes"
- 16.07.1986 Prof. Dr.-Ing. O. Moya, Universität Chile,  
Santiago de Chile,  
"Optimization of Chilean Power System"
- 03.12.1986 Dr.-Ing. J. Kriz, BBC Forschungszentrum Schweiz  
"Expertensysteme für technische Anwendungen"
- 10.12.1986 Dr.-Ing. N. Aschöwer, BBC, Ladenburg  
"Zuverlässige Betriebsführung durch den Einsatz  
einer adaptiven Störungsliste"

##### 4.2 Vorträge von Lehrstuhlmitgliedern

- 21.01.1986 E. Handschin  
"Lastmodellierung", Kolloquiumsvortrag an der  
Universität/Gesamthochschule Paderborn
- 27.01.1986 E. Handschin  
"Frequenz- und Spannungsabhängigkeit elektri-  
scher Lasten", Kolloquiumsvortrag an der  
Technischen Universität Berlin

- 04.02.1986 E. Handschin  
"Netzdynamik", Vortrag beim FGH-Seminar,  
Deidesheim
- 05.02.1986 E. Handschin  
"Prozeßdatenanalyse mit Arbeitsplatzrechnern",  
Vortrag beim FGH-Seminar, Deidesheim
- 19.02.1986 E. Handschin  
"Frequenz- und Spannungsabhängigkeit von  
Verbrauchergruppen und Verbraucherteilnetzen",  
Vortrag bei der VDI/VDE-Tagung "Wirkleistungs-  
und Blindleistungs-Sekundenreserve", München
- 03.04.- E. Handschin  
04.04.1986 "Power System Monitoring and Control", Intensiv-  
kurs an der Universität de Chile auf Einladung  
von Herrn Prof. O. Moya
- 21.05.1986 E. Handschin "Zentrale Blindleistungs-  
Spannungs-Regelung", Vortrag an der Technischen  
Hochschule Budapest im Rahmen eines  
DFG-Kolloquiums
- 21.05.1986 P. Stöber  
"Identifikation und Simulation der Lastmodelle",  
Vortrag an der Technischen Hochschule Budapest  
im Rahmen eines DFG-Kolloquiums
- 10.09.1986 E. Handschin "Der Einsatz der Personal Computer  
in der Ingenieurausbildung", IBM-Fachtagung in  
Essen, "Einsatz von Computern in der  
öffentlichen Verwaltung"
- 23.09.1986 E. Handschin  
"Netz-Trainings-Simulatoren", Vortrag bei ASEA,  
Västeras, Schweden

5. NATIONALE UND INTERNATIONALE BEZIEHUNGEN

- 16.01.1986 E. Handschin  
Sitzung GMA/ETG-Fachausschuß  
"Netzregelung" in Frankfurt
- 17.01.1986 E. Handschin, P. Stöber  
Besuch beim Bergwerk Gewerkschaft Auguste  
Victoria in Marl
- 30.01.1986 E. Handschin  
DFG-Sitzung zum Schwerpunktprogramm "Schutz- und  
Leittechnik" in Bonn-Bad Godesberg
- 03.02. - E. Handschin, Ch. Dörnemann  
05.02.1986 AK-TR Seminar "Einsatz von Arbeitsplatzcomputern  
in der Technik", Deidesheim
- 19.02. - E. Handschin und Mitarbeiter  
20.02.1986 Teilnahme an der VDI/VDE- Fachtagung  
"Wirk- und Blindleistungs-Sekundenreserve" in  
München
- 24.02.1986 W. Ebbinghaus, W. Horenkamp  
Teilnahme am Seminar "Fault Tolerance" in  
Frankfurt (Organisation)
- 25.02.1986 E. Handschin  
Teilnahme an der VDE-Beiratssitzung bei  
Calor-Emag in Ratingen
- 26.02.1986 E. Handschin und Mitarbeiter  
VDE-Exkursion zum Gersteinwerk
- 10.03.1986 E. Handschin  
Besprechung über Netzleittechnik bei Krupp-Atlas  
Elektronik in Bremen

- 13.03.1986 W. Horenkamp  
Besprechung mit Herrn Käse und Herrn Reißing,  
VEW Dortmund, zum Thema "Netzunabhängige  
Überwachung kathodischer Korrosionsschutz-  
anlagen"
- 31.03.- E. Handschin  
11.04.1986 Besuch der chilenischen Universitäten in  
Santiago de Chile und Valparaiso
- 18.04.1986 E. Handschin  
Teilnahme an der AK-TR Sitzung in Essen
- 22.04. - P. Stöber, Ch. Stute  
23.04.1986 Besuch der ETG-Fachtagung "Netzurückwirkungen" in  
Bremen
- 24.04.1986 E. Handschin  
Teilnahme an der Sitzung des CIGRE-Studien-  
komitees SC-39 in Dortmund
- 29.04.1986 E. Handschin  
Leitung an der Sitzung der VDE-Zweigstelle  
Dortmund
- 30.04.1986 W. Hoffmann, E. Handschin  
Gespräch mit Herrn Enning, VEW Dortmund,  
zum Thema: "Konzept einer dezentralen  
Meßwerterfassung für die Rundsteuerung"
- 30.04.1986 E. Handschin  
Teilnahme an der VDE-Beiratssitzung des Bezirks-  
vereins Rhein-Ruhr in Essen
- 06.05.1986 E. Handschin und Mitarbeiter  
Besprechung bei Hartmann und Braun sowie AEG in  
Heiligenhaus

- 21.05. - E. Handschin und P. Stöber  
22.05.1986 Teilnahme am DFG-Kolloquium zusammen mit der ungarischen Akademie der Wissenschaften und der Technischen Hochschule Budapest zum Thema "Blindleistungs-Spannungs-Regelung"
- 05.06.1986 E. Handschin und Mitarbeiter  
Besprechung bei den Technischen Werken in Stuttgart, Herrn Dr. Freund, über "Knotenbezogene Lastprognose"
- 07.06.1986 E. Handschin und Mitarbeiter  
Tag der offenen Tür an der Universität Dortmund
- 11.06.1986 E. Handschin und W. Horenkamp  
Besprechung bei BASF in Ludwigshafen über "Störwerterfassungs-Systeme"
- 12.06 - D. Dang  
13.06.1986 Teilnahme an der ETG/VGB Fachtagung zum Thema: "Betriebsgerechte Dokumentation in Kraftwerken" in Baden-Baden
- 19.06.1986 E. Handschin und W. Horenkamp  
Besprechung über den Einsatz von Mikrorechnern für Transformator-Überwachung mit der Maschinenfabrik Reinhausen
- 20.06.1986 E. Handschin  
Besprechung über das neue AK-TR Seminar "Elektromagnetische Ausgleichsvorgänge" bei der FGH in Mannheim
- 30.06.1986 E. Handschin und Mitarbeiter  
VDE-Exkursion zur Firma Busch-Jäger in Lüdenscheid
- Juni 1986 - J. Lemaitre  
Juli 1986 Netzversuche im bolivianischen Verbundsystem

- 03.07.1986 E. Handschin  
Besprechung mit Herrn Dipl.-Ing. B. Schwenniger  
über das Thema "Leittechnik in Untertagenetzen"
- 04.07.1986 E. Handschin  
Teilnahme an der Exkursion für den Vorstand der  
VDE-Zweigstelle Dortmund zu AEG Kabel
- 08.07. - E. Handschin  
11.07.1986 Teilnahme an der IEE-Konferenz "Power System  
Monitoring and Control" in Durham,  
Großbritannien
- 14.07.1986 E. Handschin und Mitarbeiter  
Besprechung mit Herrn Dipl.-Ing. Krefter, VEW  
zum Thema der TT und TN-Netze
- 24.07.1986 E. Handschin, W. Horenkamp  
Besprechung bei der BASF in Ludwigshafen zum  
Thema: "Störwerterfassung in elektrischen  
Energieversorgungsnetzen"
- 08.08.1986 W. Eghardt, W. Ebbinghaus, M. Jaspert  
Besuch beim Bergwerk Gewerkschaft Auguste  
Victoria in Marl zur Durchführung von Messungen  
mit E.L.S.A.
- 28.08. - E. Handschin  
03.09.1986 Teilnahme an der Sitzung der CIGRE in Paris
- 04.09.1986 W. Hoffmann  
Teilnahme am Vortragskreis "Künstliche  
Intelligenz" zum Thema: "Expertensystem-Shells"  
bei der Infodas in Köln
- 10.09.1986 E. Handschin, H. Slomski  
Teilnahme an der IBM-Veranstaltung "Einsatz von  
Computern in der öffentlichen Verwaltung in  
Essen

- 11.09.1986 E. Handschin  
Teilnahme an der Beiratssitzung des  
VDE-Bezirksvereins Rhein-Ruhr in Essen
- 15.09.1986 P. Stöber, Ch. Stute  
Besuch beim Bergwerk Gewerkschaft Auguste  
Victoria in Marl zur Durchführung von Messungen  
von Oberschwingungen
- 16.09.1986 E. Handschin  
Leitung der Sitzung der VDE-Zweigstelle  
Dortmund
- 22.09. - E. Handschin  
24.09.1986 Besuch der ASEA-Transmission in Västeras,  
Schweden
- 01.10.- W. Horenkamp  
03.10.1986 Teilnahme am VDI-Seminar zum Thema: "Rechnerge-  
stützte Erfassung und Analyse analoger Meßwerte"  
in Düsseldorf
- 09.10.1986 W. Horenkamp, W. Ebbinghaus, F. Eickhoff  
Teilnahme am PMI-Applikations-Seminar in  
Düsseldorf
- 10.10.1986 E. Handschin  
Teilnahme an der AK-TR Sitzung in Dortmund
- 13.10. - E. Handschin  
15.10.1986 Teilnahme und Sitzungsleitung einer  
ETG-Fachveranstaltung innerhalb des  
VDE-Kongresses in Nürnberg
- 23.10.1986 E. Handschin  
Teilnahme an der VDE-Pressekonferenz in Essen  
zum Thema: "Ausstieg aus der Technik?"



- 28.10.1986 E. Handschin und Mitarbeiter  
VDE-Exkursion zu den Firmen Graetz in Bochum und  
Funke & Huster in Essen
- 04.11.1986 E. Handschin und Mitarbeiter  
Besprechung mit Herrn Dr. Lennartz und  
Mitarbeitern des Überlandwerks Nord-Hannover zum  
Thema "Automatisierung von Mittelspannungs-  
netzen"
- 05.11. - E. Handschin, W. Horenkamp, A. Kubbe  
26.11.1986 Ausstellung in der Stadtparkasse Dortmund über  
Meßwerterfassung und -verarbeitung in der elek-  
trischen Energieversorgung
- 06.11. - K.-D. Tesch  
07.11.1986 Teilnahme am Seminar: "Hausleittechnik" bei der  
Firma Busch-Jäger in Lüdenscheid
- 11.11.1986 E. Handschin und Mitarbeiter  
VDE-Exkursion zur AEG in Belecke
- 12.11.1986 E. Handschin  
Teilnahme an der Sitzung des CIGRE-Studien-  
komitees SC 39 in Stuttgart
- 21.11.1986 E. Handschin  
Besprechung mit Herrn Dr. Franzius, Siemens an  
der Universität Dortmund
- 26.11.1986 E. Handschin  
Leitung der VDE-Kontaktveranstaltung für  
Studenten der Universität Dortmund
- 01.12.1986 E. Handschin und Mitarbeiter  
Präsentation des BMFT-Projektes für  
Herrn Dipl.-Ing. Schütz, RAG, Essen

02.12. - F. Eickhoff, W. Ebbinghaus  
03.12.1986 Teilnahme am VDI-Seminar zum Thema: "Qualitäts-  
sicherung von Software" in München

09.12.1986 E. Handschin  
Teilnahme an der VDE-Hauptversammlung des  
Bezirksvereins Rhein-Ruhr in Dortmund

12.12. - W. Eghardt, W. Ebbinghaus  
14.12.1986 Besuch beim Bergwerk Auguste Victoria in Marl  
zur Überprüfung der Funktion von E.L.S.A.

## 6. VERÖFFENTLICHUNGEN UND BERICHTE

### 6.1 Veröffentlichungen

E. Handschin, Th. Reißing: "Frequenz- und Spannungsabhängigkeit von Verbrauchergruppen und Verbraucherteilnetzen", VDI Berichte 582, München, Februar 1986

Der vorliegende Beitrag behandelt die Auswirkung des Lastverhaltens auf die Sekundenreserve. Die heute bekannten Methoden der Lastmodellierung werden diskutiert, um so einen Kriterienkatalog zu erstellen, unter welchen Bedingungen welches Verfahren die besten Ergebnisse liefert. Da die Modellparameter stark von der Art des Versorgungsnetzes abhängig sind, wird mehr Gewicht auf die Vorgehensweise als auf einzelne Meßergebnisse gelegt. Die Bedeutung des Netzes, insbesondere des Verteilungsnetzes auf die Frequenz- und Spannungsabhängigkeit der Lasten wird erörtert. Hier zeigt sich, daß der Einfluß der Transformatoren und der Kompensationseinrichtungen sehr sorgfältig untersucht werden muß. An Hand einiger praktischer Beispiele wird die Sekundenreserve in Abhängigkeit des Lastverhaltens dargestellt.

E. Handschin, H. Slomski, E. Ortjohann, J. Voß: "Energieeinsatzoptimierung thermischer Kraftwerke", Elektrizitätswirtschaft, Jg. 85(1986), Heft 5

Ein mathematisches Verfahren zur Berechnung der optimalen Verteilung der gesamten Jahresarbeit auf charakteristische Tagesenergien der Kraftwerksblöcke und Strombezugsverträge eines Energieversorgungsunternehmens wird vorgestellt. Als Optimierungsverfahren wird die gemischt ganzzahlige lineare Programmierung eingesetzt. Durch die geschlossene analytische Form und das Zurückgreifen auf bewährte Standard-Software ist das sichere Erreichen des mathematischen Optimums gewährleistet. Außerdem ist die Voraussetzung eines konvexen Lösungsraumes nicht erforderlich. Der wesentliche Vorteil des beschriebenen

Verfahrens besteht darin, daß auch das An- und Abfahrverhalten der Kraftwerksblöcke mit in die Optimierung einbezogen wird. Das bedeutet, im Gegensatz zu Verfahren, die die Anfahrkosten nicht berücksichtigen, daß hierdurch eine signifikante Beeinflussung der Energieaufteilung stattfindet.

E. Handschin, W. Horenkamp, W. Hormann, E. Labohm, Th. Reißing: "Integrated Data Acquisition and Information Processing in Electric Energy Distribution Systems", Proc. of 2nd Int. IEE Conference on "Power System Monitoring and Control", Durham, (UK), July 8-11, 1986

Even in well planned medium and low voltage distribution systems loading measurements have to be performed at regular intervals. This way it becomes possible to compare load assumptions with the actual system behaviour and to modify them if necessary. A close coupling between operating states and the planning assumptions can be ideally realised with the measurement and computing equipment presented in this paper. In order to have reliable and accurate data concerning the load behaviour within the distribution system it is necessary to perform systematic measurements over arbitrary time intervals in different parts of the distribution system.

## 6.2 Forschungsberichte

F. Eggimann, E. Handschin: "Einführung in die Detektions- und Estimationstheorie", EV 8602

J. Lemaitre: "Insel- und Verbundnetzdyamik", Februar 1986, EV 8604

D. König: "Parallelisierung stationärer Berechnungsverfahren elektrischer Energieversorgungssysteme", Februar 1986, EV 8610

W. Ebbinghaus, F. Eickhoff, W. Horenkamp: "Technische Beschreibung CMOS-CPU-Karte, Vers. 1.1", April 1986, EV 8611

W. Ebbinghaus, F. Eickhoff, W. Horenkamp: "Technische Beschreibung der CMOS-E/A-Karte, Vers. 1.0", April 1986, EV 8612

P. Stöber: "Identifikation und Simulation der Lastmodelle", Juni 1986, EV 8618

J. Lemaitre: "Estudio del comportamiento dinámico de frecuencia en el Sistema Eléctrico Boliviano", September 1986, EV 8625

K. El-Homsi: "Trainingssimulator mit State-Estimator für die Netzzustandsüberwachung, Konzeption und technische Realisierung", Dezember 1986, EV 8635

K. El-Homsi: "Bibliographie und Literaturstudie zur Theorie und zum Einsatz des State-Estimation im Netzbetrieb", Dezember 1986, EV 8636

K. El-Homsi: "Bibliographie und Literaturstudie zur Konzeption und zum Einsatz von Trainingssimulatoren im Netzbetrieb", Dezember 1986, EV 8637

W. Ebbinghaus: "Konzeption eines integrierten Schutzsystems", Dezember 1986, EV 8638

E. Arias: "Elektrische Energieversorgung in Kolumbien",  
Dezember 1986, EV 8643

### 6.3 Diplomarbeiten

W. Eghardt: "Entwicklung eines Prototyp-Mikrorechnerreglers für  
die automatische Abstimmung einer Erdspule", Juni 1986, EV 8617

A. Höltermann: "DFG-Rechner-Verbund für gemischt zentrale/de-  
zentrale Meßwerterfassung- und verarbeitung", Juli 1986, EV  
8619

F. Eickhoff: "Entwurf und Implementierung eines Betriebssoft-  
warepaketes für sicherheitsrelevante Anwendungen mit einem  
Doppelrechnersystem", Juli 1986, EV 8622

G. Hemmer: "Graphisches Ausgabesystem zur Darstellung von Netz-  
bildern und Meldungen am Drehstromnetzmodell", September 1986,  
EV 8626

Ch. Stute: "Dämpfung von Oberschwingungen und Blindleistungs-  
kompensation mit Saugkreisen", Oktober 1986, EV 8633

M. Schwunk: "Konzept zur zentralen Steuerung und Überwachung  
der 110 kV Rundsteuersender", Dezember 1986, EV 8640

J. Dennersmann: "Frequenzabhängige Netzersatzschaltungen für  
die Berechnung elektromagnetischer Ausgleichsvorgänge",  
Dezember 1986, EV 8641

M. Seitz: "Erstellung von Betriebssoftware für ein redundantes  
Mikrorechnersystem für Schutz- und Überwachungsaufgaben",  
Dezember 1986, EV 8642

#### 6.4 Studienarbeiten

G. Hoppe: "Datenfernübertragung zwischen einem zentralen Auswertungsrechner und dezentralen digitalen Meßwertersassungssystemen", Januar 1986, EV 8613

M. Schwunk: "Untersuchung zur Tastsynchronität von 110 kV-Rundsteuersendern im VEW-Netz", Januar 1986, EV 8601

Ch. Günther: "On-Line Estimation für ein Drehstrom-Netzmodell", Februar 1986, EV 8605

W. Austermann: "Untersuchung der Synchronmaschine am starren Netz im Zeitbereich der Spannungsregelung", Februar 1986, EV 8606

P. Sudhaus: "Erweiterung eines Grafiksoftwarepaketes für ein universelles Meßwertersassungssystem", Februar 1986, EV 8608

J. Dennersmann: "Berechnung der Kurzschlußimpedanz von Hochspannungsleitungen mit inhomogener Erdseilstromverteilung", März 1986, EV 8607

P. Meyer: "Einbau eines Blindleistungs-Spannungsmodells in der Mittelzeitdynamik", April 1986, EV 8609

G. Tschirsch: "Aufbau und Test eines Meßcomputers zur Lastmodell-Parameteridentifikation", April 1986, EV 8621

B. Krause: "Konzeption und Bau eines Datenaufzeichnungsgerätes in CMOS-Technologie", August 1986, EV 8634

A. Garus: "Schnelle Berechnung der optimalen Leistungsaufteilung für 24 Stunden im Rahmen langfristiger Kraftwerkseinsatzplanung", August 1986, EV 8627

## 6.5 Programmbeschreibungen

P. Stöber, Ch. Stute: "Look, Suchen von Zeichenketten in beliebigen Dateien", Mai 1986, EVP 8601

A. Höltermann: "DFÜ-Rechnerverbund für gemischt zentrale/dezentrale Meßwerterfassung und -verarbeitung", Juli 1986, EVP 8602

A. Kubbe: "PLO, Ausgabe von Diagrammen auf Terminal, Drucker und Plotter", August 1986, EVP 8603

A. Kubbe: "Kreis, Interaktive Bildschirmgrafik", August 1986, EVP 8604

K. El-Homsi: "Digital-Trainingssimulator mit State Estimator für die Zustandsüberwachung elektrischer Netze", Dezember 1986, EVP 8605

K. El-Homsi: "Hybrid-Trainingssimulator mit State Estimator für die Zustandsüberwachung am Drehstrom-Netzmodell", Dezember 1986, EVP 8606

K. El-Homsi, M. Krabs: "Literaturdatenverwaltung auf dem Arbeitsplatzrechner", Dezember 1986, EVP 8607



## 7. PROMOTIONEN

Pestka, Joachim: "Elektromagnetische Beeinflussung infolge hochfrequenter Ausgleichsvorgänge im Hochspannungsnetz"

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. E. Handschin
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. D. Peier

Tag der mündlichen Prüfung: 22.10.1986

Durch ständig größeren Einsatz von elektronischen Überwachungs-, Steuer- und Regelsystemen, die kostengünstig nur in Form hochintegrierter Schaltkreise einsetzbar sind, gewinnt die hochfrequente Beeinflussung von Sekundärleitungen zunehmend an Bedeutung. Das Zusammenwirken von Hochspannungsleistungsgeräten und empfindlicher Elektronik auf engem Raum ist und wird ein wichtiges technisches Problem bleiben. Im Rahmen dieses Problemkreises schafft diese Arbeit grundsätzliche Möglichkeiten zur Berechnung und Abschätzung hochfrequenter Beeinflussungsspannungen und leitet aus den rechnerisch abgeleiteten Zusammenhängen gezielte Schutzmaßnahmen zur Verringerung von transienten Überspannungen her. Die Basis für die Behandlung der hochfrequenten Beeinflussungsvorgänge stellen folgende vier in der Literatur umfangreich beschriebenen Problemkreise dar:

- Beschreibung von Ausgleichsvorgängen auf Leitungen mit Wellengleichungen
- Wellengleichungen für gekoppelte Leitungen
- Beeinflussungsberechnungen für stationäre 50-Hz-Vorgänge
- Messungen transienter Überspannungen

Diese Arbeit beschäftigt sich mit den analytischen Grundlagen zur Bestimmung der hochfrequenten Beeinflussungen in einem beliebigen Mehrleitersystem und bei beliebigem Näherungsverlauf auf der Basis von Wellengleichungen. Zur Berechnung dieser Beeinflussungen zwischen Leitern bei transienten Vorgängen wurde in dieser Arbeit eine Methode entwickelt, die die Beeinflussung von Wellen einer Leitung auf Wellen einer zweiten Leitung in allgemeiner Form beschreibt und eine numerische

Lösung des Problems ermöglicht. Die theoretisch gefundenen Lösungen konnten dabei zum einen durch Grundsatzmessungen im Labor und zum anderen durch Netzmessungen bestätigt werden.