

J A H R E S B E R I C H T 1 9 8 4

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, Th. Reißing

## VORWORT

Zum zehnten Mal möchte ich Ihnen mit dem vorliegenden Bericht über die Arbeiten, die an meinem Lehrstuhl durchgeführt worden sind, berichten. Nach den Aufbaujahren hat nun der Lehrstuhl ein festes Gefüge in Forschung und Lehre erhalten. Bisher konnten zahlreiche Projekte abgeschlossen werden. Über die Ergebnisse ist im Rahmen von Dissertationen und Veröffentlichungen berichtet worden. Besonders wichtig sind dabei diejenigen Vorhaben, die erfolgreich von der Hochschule in die Industrie überführt werden konnten. Auch wenn dies meistens den Übertritt von Mitarbeitern in die Industrie bedeutet und gleichzeitig empfindliche Lücken an der Hochschule hinterlassen werden, so sind dennoch in vielen Fällen dank der guten Zusammenarbeit neue Vorhaben formuliert und durchgeführt worden. Damit ist es möglich, unser Arbeitsprogramm stets nach den Erfordernissen der Praxis auszurichten und gleichzeitig aktuell zu bleiben. Als Beispiel möchte ich die Arbeiten auf dem Gebiet des Einsatzes von Arbeitsplatz- und Mikrocomputern in der elektrischen Energieversorgung erwähnen. Wichtige Entwicklungen rechtzeitig zu erkennen und in Forschungsprojekte umzusetzen, soll auch in Zukunft für unsere Arbeiten maßgebend sein.

Die zahlreichen Kontakte und Anregungen, die unsere Projekte in den vergangenen Jahren geprägt haben, möchte ich an dieser Stelle dankend erwähnen. Ich hoffe, daß der vorliegende Jahresbericht die Aktivitäten des Lehrstuhls in übersichtlicher Form dokumentiert und daß die Arbeiten 1985 ebenso vertrauensvoll und gut wie bisher weitergeführt werden können.

E. Handschin

## INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. PERSONAL	7
2. LEHRBETRIEB	8
2.1 Vorlesungen	8
2.2 Seminar	9
2.3 Praktika	9
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 in elektrischen Energiever- sorgungssystemen	38
3.3 Schutz- und Leittechnik	56
4. VORTRÄGE	68
4.1 Beiträge für das Kolloquium	68
4.2 Vorträge von Lehrstuhlmitgliedern	68
5. NATIONALE UND INTERNATIONALE BEZIEHUNGEN	70
6. VERÖFFENTLICHUNGEN UND BERICHTE	76
6.1 Veröffentlichungen	76
6.2 Forschungsberichte	79
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

Oberingenieur: Dr.-Ing. J. Voß bis 31.01.1984  
Dr.-Ing. Th. Reißing ab 01.02.1984

Akademische Gäste: Prof. Han-Suck Yim,  
Kon-Kuk-Universität Seoul

Wiss. Mitarbeiter: Dipl.-Ing. N. Aschöwer  
Dipl.-Ing. W. Ebbinghaus  
Dipl.-Ing. K. El-Homsi  
Dipl.-Ing. M. Gacka  
Dr.-Ing. H. Graf  
Dipl.-Ing. D. König  
Dipl.-Ing. A. Kubbe  
Dipl.-Ing. J. Lemaitre  
Dipl.-Ing. P. Stöber  
Dipl.-Ing. H. Slomski  
Dipl.-Ing. J.-G. Tebbe  
Dipl.-Ing. R. Woltemate

Technische Mitarbeiter: Frau H. Giersberg  
Ing.(grad.) W. Horenkamp  
Dipl.-Ing. H. Maiweg  
Frau R. Meier  
K.D. Tesch

Studentische Hilfskräfte: M. Aretz, N. Capetanos,  
E. Ebbinghaus, Ch. Günther,  
U. Kämmerer, H. Kaup,  
J. Lindemann, K. Mußhoff,  
G. Nimmrich, M. Schnurbusch,  
M. Seitz, Ch. Stute,  
W. Wöstenhöfer, M. Wuske

## 2. LEHRBETRIEB

### 2.1 Vorlesungen

Prof. Dr.-Ing. E. Handschin

Elektrische Energietechnik I (WS 1983/84)

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

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

Elektrische Energietechnik II (SS 1984)

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

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

Energieübertragungssysteme I (WS 1983/84)

Wahlpflichtvorlesung für Studenten der Fachrichtungen Energietechnik und Allgemeine Elektrotechnik im 7. Semester.

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

Energieübertragungssysteme II (SS 1984)

Wahlpflichtvorlesung für Studenten der Fachrichtungen Energietechnik und Allgemeine Elektrotechnik im 8. Semester.

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

Prof. Dr.-Ing J. Voß

Elektrizitätswirtschaft und Kraftwerke I (WS 1983/84)

Wahlpflichtvorlesung für Studenten der Fachrichtungen Energietechnik und Allgemeine Elektrotechnik 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 1984)

Wahlpflichtvorlesung für Studenten der Fachrichtungen Energietechnik und Allgemeine Elektrotechnik im 8. Semester.

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

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

Energieversorgung (WS 1983/84)

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.

2.3 Praktika

Im Rahmen des von allen Lehrstühlen und Arbeitsgebieten der Abteilung 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 der Abteilung 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 elektr. Energieversorgungssysteme  
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.

#### 2.4 Exkursionen

02.07.1984 Energietechnische Exkursion nach Berlin.

Besuch der PTB Braunschweig; Besichtigung des Lastverteilers und der Schaltleitung der BEWAG; Besichtigung der Firma Siemens (Schaltwerk/Dynamowerk) (gemeinsam mit Prof. Dr.-Ing. D. Peier, Lehrstuhl für Hochspannungstechnik und elektr. Anlagen)

### 3. FORSCHUNGS- UND ENTWICKLUNGSARBEITEN

Die im Berichtsjahr 1984 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 in elektrischen Energieversorgungssystemen.
3. Schutz- und Leittechnik.

Die erwähnten Ausführungen sind Kurzbeschreibungen der durchgeführten Projekte und sollen in knapper Form Problemstellungen und erreichte Ergebnisse aufzeigen. Am Ende der einzelnen Projektbeschreibungen sind die weiterführenden, ausführlichen Berichte erwähnt, die auf Anfrage gerne zugestellt werden.

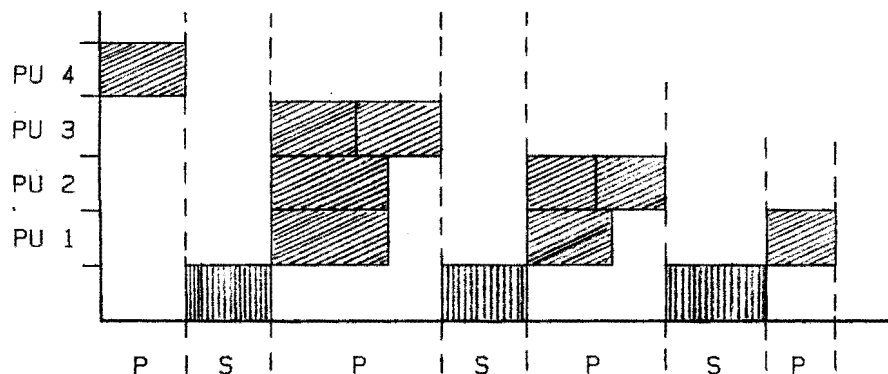
#### 3.1 Software-Entwicklung für die Betriebsführung und Planung elektrischer Energieversorgungssysteme

##### 3.1.1 Grenzen des Rechenzeitgewinns beim Einsatz von Mehrprozessoren

Um Aufgaben der Überwachung und Führung elektrischer Energieversorgungssysteme mit einem Mehrprozessorrechner durchführen zu können, ist es erforderlich, die jeweilige Aufgabenstellung in Teilaufgaben zu zerlegen, die parallel berechenbar sind. Dabei zerfällt jeder Algorithmus in mehrere Berechnungsabschnitte, in denen sich jeweils sequentielle und parallele Aktivitäten abwechseln (Bild 1). Unter dem Aspekt der optimalen Parallelisierung lassen sich nun mehrere allgemeingültige Maßnahmen zur Verkürzung der Rechenzeit angeben:

- a) Eine Verringerung des Datenaustausches führt zu einer Verkürzung der seriellen Phasen.

- b) Die Verteilung der anstehenden Aufgaben auf mehr Verarbeitungseinheiten (VE) hat eine Verkürzung der Parallelaktivitätsphasen zur Folge.
- c) Eine gleichmäßige Aufteilung der Teilaufgaben auf die VE bedingt die Reduktion der Parallelaktivitätsphasen.



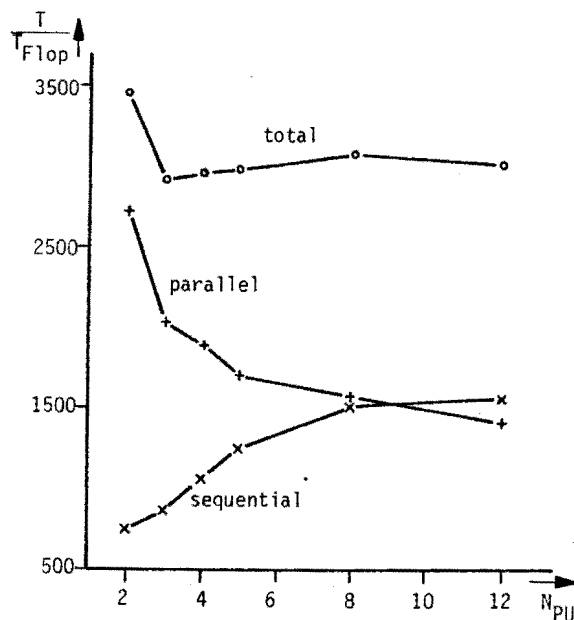
**Bild 1:** Typische Folge von Parallel- und Sequentiellaktivitäten eines Mehrprozessorrechners mit 4 Verarbeitungseinheiten (PU)

Am Beispiel der Lösung des Lastflußproblems sind die Abhängigkeiten der Einflußgrößen untereinander gut erkennbar. Dazu wird ein 25-knotiges Energieversorgungsnetz betrachtet, das in mehrere Teilnetze zur parallelen Berechnung aufzuteilen ist. Legen wir als Verfahren die Newton-Raphson-Methode zugrunde, so besteht die Lösung des Lastflußproblems aus der iterativen Berechnung der Leistungsabweichung an den Knoten und dem Lösen eines linearen Gleichungssystems.

	einfache Aufteilung	gleichmäßige Prozessor-Auslastung	minimaler Datenaustausch
Gleitkommaoperationen (Flops)	1982	1815	1716
Datenaustauschrate (Byte)	1528	1576	1312

**Tabelle 1:** Datenaustauschrate und Rechenzeit für eine Iteration der Lastflußberechnung für ein 25-knotiges Netz

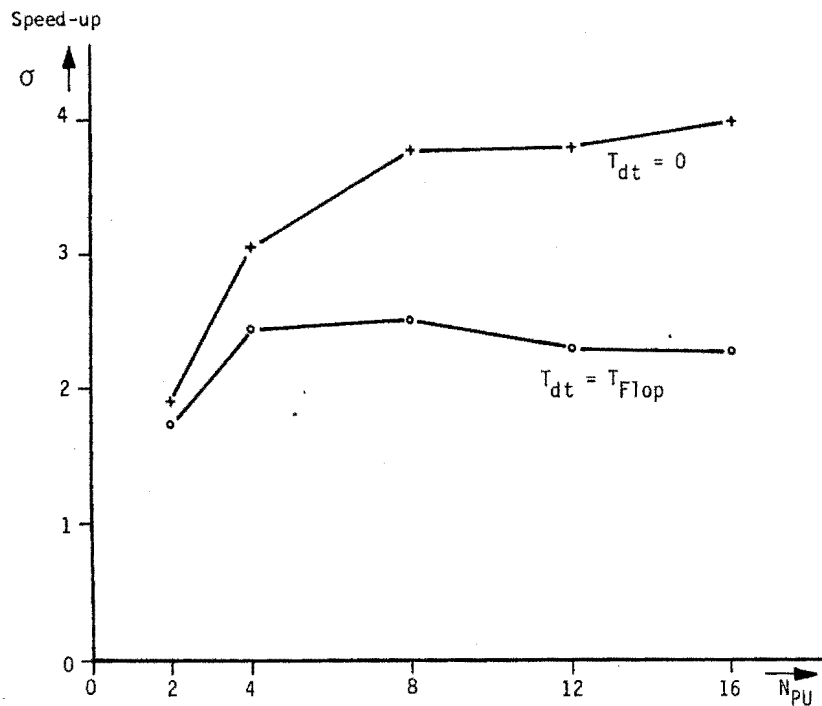
Tabelle 1 zeigt die Rechendauer und die Datenaustauschrate für eine Iteration der Lastflußberechnung des Netzes, wie sie sich durch Simulation einer parallelen Berechnung mit 5 VE ergibt. Die Aufteilung unter dem Gesichtspunkt einer gleichmäßigen Auslastung der parallelen VE führt zwar zu einer Verkürzung der Parallelaktivitätsphasen, jedoch auch zu einer Erhöhung der Datenaustauschrate, da eine andere Zuordnung der Knoten zu den Teilnetzen eine stärkere Verbindung dieser Netzteile untereinander bedingt. Die günstige Entwicklung der Rechendauer bei der Aufteilung nach einem minimierten Datenaustausch erklärt sich aus der Realisierung der direkten Lösung des linearen Gleichungssystems mittels Gauß-Elimination und Rückwärtssubstitution. Hierbei können umso mehr Gleichungen simultan behandelt werden, je geringer die Kopplung und damit die Datenaustauschrate zwischen den einzelnen Teilnetzen ist. Hierbei wird der sonst bei der Parallelisierung von direkten Berechnungsmethoden für lineare Gleichungssysteme übliche "Haydn-Effekt" weitgehend vermieden, bei dem sich im Zuge des Verfahrens immer weniger VE an der parallelen Berechnung beteiligen. Dieser Effekt bestimmt auch die Rechendauer für eine Iteration bei der Verteilung der anstehenden Aufgaben auf mehr VE (Bild 2).



**Bild 2:** Rechenzeit in Abhängigkeit der Anzahl der Verarbeitungseinheiten für eine Iteration der Lastflußberechnung

Im Verlauf der Gesamtverarbeitungszeit ergibt sich ein Optimum, dessen Lage bestimmt wird durch das Verhältnis der Rechenzeit für eine Gleitkommaoperation zur Datenaustauschzeit für ein Byte, welches spezifisch durch einen konkreten Multiprozessorrechner gegeben ist. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage nach einer Verbesserung der Gesamtrechenzeit durch eine Modifizierung der Bus-Struktur. Während bei einem Common-Bus-Rechner, bei dem alle VE über denselben Bus miteinander gekoppelt sind, der Datenaustausch rein sequentieller Natur ist, kann eine Parallelisierung der Datenströme erfolgen, wenn die einzelnen VE eines Multiprozessorrechners entsprechend der Topologie des Netzes miteinander kommunizieren können. Hätten alle VE darüber hinaus noch freien Zugriff auf die Speicher der mit ihnen verbundenen anderen Einheiten, so würde ein Datenaustausch ganz entfallen. Die Beschleunigung eines parallelisierten Verfahrens gegenüber einer rein sequentiellen Verarbeitung könnte dadurch beträchtlich gesteigert werden. Zusätzlich kann dann das Berechnungsproblem auf beliebig viele VE verteilt werden. Jedoch wird sich auch dann die Auslastung und damit die Wirtschaftlichkeit eines Multiprozessorrechners verschlechtern, da die Beschleunigung nicht linear mit der Anzahl der VE zunimmt.

Die Ergebnisse aus der Lastflußberechnung bezüglich der Rechenzeitbeschleunigung lassen sich auf die Untersuchung der transienten Stabilität insofern übertragen, als daß hier neben den Lastflußgleichungen, die das stationäre Verhalten des Netzwerks beschreiben, ein System von Differentialgleichungen, die das dynamische Verhalten der Generatoren beschreiben, durch numerische Integration simultan zu berechnen sind. Außer einem zusätzlichen Berechnungsaufwand, der knotenorientiert ist, ergibt sich kein zusätzlicher Datenaustausch zwischen den VE. Der Einfluß der Ordnung der Generatormodelle auf die Beschleunigung ist gering, da der Rechenaufwand zur numerischen Integration gegenüber der Lösung der algebraischen Lastflußgleichungen sehr klein ist.



**Bild 3:** Beschleunigung  $\sigma$  als Funktion der Anzahl der Verarbeitungseinheiten bei einer transienten Stabilitätsuntersuchung

Bild 3 zeigt die mögliche Beschleunigung  $\sigma$  bei der Berechnung des transienten Verhaltens eines 118-knotigen Netzes mit 54 Generatoren. Bei Vernachlässigung der Datenaustauschzeit kann im günstigsten Fall eine Beschleunigung von  $\sigma \approx 4$  erreicht werden. Eine Aufteilung des Algorithmus auf mehr als 8 VE führt nur noch zu einer unwesentlichen Verbesserung der parallelen Rechenzeit. Unter Berücksichtigung des Datenaustausches reduziert sich die Beschleunigung auf  $\sigma \approx 2$ .

Die erzielten Ergebnisse zeigen, daß beim Einsatz eines Mehrprozessorrechners für die Lastflußberechnung die Aufteilung des Algorithmus knotenorientiert erfolgen muß, um eine Minimierung des Datenaustausches erzielen zu können. Mit einem Common-Bus-Rechner ergibt sich dabei für die Anzahl der einzusetzenden Verarbeitungseinheiten eine Obergrenze, ab der die mögliche Beschleunigung der parallelen gegenüber der sequentiellen Berechnung nicht mehr steigerbar ist. Dies gilt ebenso für transiente Stabilitätsuntersuchungen, da hier der wesent-

liche Teil der Berechnung durch das Lösen der Lastflußgleichungen und nicht durch die numerische Integration gebildet wird.

D. König

Diese Arbeit wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert.

### 3.1.2 Ausfallsimulation im "on-line"-Einsatz

Bei der Konzeption zur Führung elektrischer Energieversorgungssysteme wird der technischen Betriebssicherheit des Netzes großes Gewicht beigemessen, um die vorhandenen Betriebsmittel optimal zu nutzen. Zu jedem Zeitpunkt muß der aktuelle Betriebszustand  $n-1$  betriebssicher sein. Das bedeutet, daß beim unvorhergesehenen oder bewußt herbeigeführten Ausfall eines beliebigen Übertragungselementes (Kabel, Freileitung, Transformator) oder einer Einspeisung das restliche Netzwerk sowohl in der Belastung der einzelnen Elemente nicht über 100% belastet als auch der Spannungsbetrag ein vorgegebenes Fehlerband nicht verletzen darf. Abgesehen vom Inselbetrieb (Berlin) sind im normalen Betriebszustand die individuellen EVU-Netze im Verbund betrieben resp. die einzelnen Spannungsebenen eines EVU's sind gekoppelt. Die Berechnung des gesamten Netzverbundes (einige tausend Knoten) würde zu utopischen Rechenzeiten und kaum zu installierenden Rechnerkapazitäten führen. Darum werden die den einzelnen Betreibern zugehörigen Bezirke untersucht. Um den Einfluß der Nachbarnetze auf das Eigennetz zu berücksichtigen, wird das umgebende Netz durch äquivalente Impedanzen nachgebildet. Die Nachbildung kann selbstverständlich nur so gut sein, wie die Information, die über die Nachbarnetze vorliegt. Die äquivalenten Impedanzen werden nach der Methode der Ward-Reduktion bestimmt. Änderungen im Verbund, die nicht unmittelbar an den Grenzknoten vorgenommen werden, wirken sich im allgemeinen unwesentlich auf das Eigennetz aus.

Regel: Je weiter Variationen im Verbundnetz vom Eigennetz entfernt liegen, desto geringer ist der Einfluß auf das Eigennetz. Es wird davon ausgegangen, daß die äquivalenten Impedanzen in

weiten Zeitabständen als konstant angesehen werden können und daher nur gelegentlich neu bestimmt werden müssen. Um die  $n-1$  Betriebssicherheit zu gewährleisten, werden in Abständen von einigen Minuten resp. bei größeren Umschaltungen oder Leistungsvariationen im Eigennetz Simulationsrechnungen durchgeführt. Ausgehend von einem konsistenten Datensatz (estimierter Schnappschuß des momentanen Betriebszustandes) wird jedes Betriebsmittel, bei dessen Ausfall mit großer Wahrscheinlichkeit ein kritischer oder gestörter Betriebszustand vorliegen kann, für die Simulationsrechnung "eliminiert". Diese simulierte Elimination von Betriebsmitteln kann zu einem Netzzustand führen, der mathematisch nicht berechenbar ist. Ein Netzzustand ist mathematisch berechenbar, wenn alle dem momentanen Netz zugeordneten Knoten über beliebige Zweige miteinander verbunden sind (Knotenadmittanzmatrix ist regulär, Rang der Matrix  $\hat{=}$  Anzahl Knoten - Slack, wenn der Slack eliminiert wird). Es wird für das Basisnetz und alle gewählten Ausfall-Betriebsmittel geprüft, ob mathematische Berechenbarkeit vorliegt und die daraus resultierende Information über mögliche Inseln gespeichert. Danach wird für das Basisnetz (ohne Betriebsmittelausfall) der Basisbetriebspunkt mittels entkoppelter Lastflußberechnung bestimmt. Dieser Betriebspunkt berücksichtigt die externen injizierten und extrahierten Leistungen. Nach der Basislastflußberechnung werden die äquivalenten Impedanzen in die Knotenadmittanzmatrix und in die Modellmatrizen einbezogen und eine fiktive Zusatzleistung den relevanten Knoten zugeordnet, so daß der Einfluß der äquivalenten Impedanzen für den Basisbetriebspunkt zu Null wird, da das umgebende Netz bereits durch die externen Leistungen an den Grenzknoten repräsentiert ist. Abweichungen vom Betriebspunkt führen zu Änderungen im Nachbarnetz, die dann bei der Ausfallsimulation berücksichtigt werden müssen. Es wird darauf hingewiesen, daß auch bei Basislastflußberechnungen im Eigennetz ohne erneute Kenntnis der Grenzknotenleistungen die äquivalenten Impedanzen berücksichtigt werden müssen.



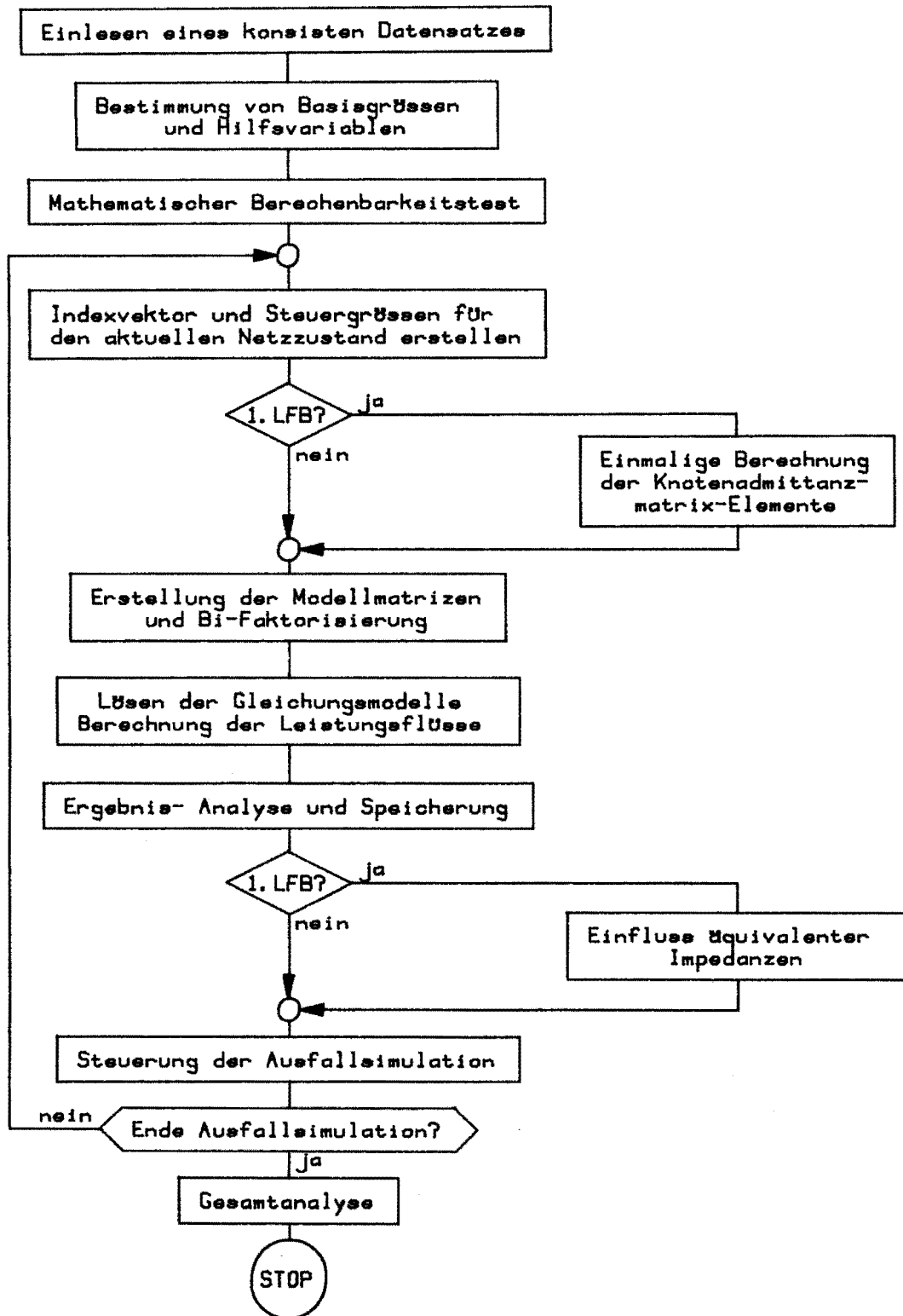


Bild 4: Schematischer Programmablauf der Ausfallsimulation

Im Anschluß daran werden alle relevanten Betriebsmittel sukzessive eliminiert und jeweils für das verbleibende Netzwerk,

sofern es mathematisch berechenbar ist, eine Lastflußberechnung durchgeführt und auf Grenzwertverletzung geprüft. Netzwerke, die mathematisch nicht berechenbar sind, können auf berechenbare Inseln überprüft und dann näher untersucht werden. Die Information über die bestehenden Insel-Topologien wird aus dem mathematischen Berechenbarkeitstest erhalten. Die weitere Vorgehensweise über Insel-Lastflußberechnung ist in der Theorie bekannt, jedoch programmtechnisch nicht realisiert.

Die Ergebnisse der Simulationsrechnungen werden herangezogen um gegebenenfalls Schaltmaßnahmen und/oder Last- bzw. Einspeisungs-Umverteilungen unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Aspekte durchzuführen. Dabei ist zu beachten, ob die Aktivitäten kurz-, mittel- oder langfristig wirksam sein sollen. Bevor möglich Schritte realisiert werden, ist jede Veränderung vorher durch eine Simulationsrechnung auf Erfolg zu prüfen.

Abschließend ist in Bild 4 ein schematisches Flußdiagramm über den Programmablauf dargestellt.

N. Aschöwer

Bericht: EV 8418, EV 8230, EV 8302

### 3.1.3 Berücksichtigung der automatischen Transformatorstufung in Lastflußberechnungen

In modernen Energieversorgungssystemen wird die Energieübertragung und -verteilung auf einer Anzahl von unterschiedlichen Spannungsebenen durchgeführt. Diese Spannungsebenen besitzen meistens mehrere Verbindungspunkte, die zur sicheren Netzführung und Energieversorgung beitragen.

In jedem Punkt, wo eine Änderung der Spannungsebene notwendig ist, müssen Transformatoren eingesetzt werden. In vielen Fällen werden Transformatoren benutzt, die eine dezentrale Spannungsregelungsfunktion haben. Diese Regelung, die meistens im Bezug auf eine Referenzspannung arbeitet, aktiviert die Stufung unter

Last, wenn die Referenzwerte unter- oder überschritten werden. Es handelt sich um ein langsam arbeitendes, nicht kontinuierliches Regelungskonzept.

Die Berücksichtigung und Modellierung von automatisch gestuften Transformatoren in stationäre Berechnungen, die oft als Basiswert für weitere Berechnungen herangezogen werden, ist in den meisten Energieversorgungssystemen oft nicht zu vernachlässigen. Aus dieser Überlegung wurde ein Algorithmus entwickelt, der sich mit sehr geringen Änderungen praktisch in alle Lastflußberechnungsmethoden einbauen läßt und die Modellierung der automatischen Stufung erlaubt. Dieses Verfahren wurde mit einer schnellen entkoppelten Lastflußberechnung getestet, wobei sich viele Vorteile gezeigt haben. Dieser Algorithmus arbeitet grundsätzlich wie folgt:

- a) Alle Knoten, in denen die Spannung durch automatische Transformatorstufung geregelt wird, werden als Typ 4 (PU-Knoten ohne Q-Grenzen) bezeichnet. Die unbekanntenen Stufungen werden mit 1.0 pu. initialisiert.
- b) Es wird wie üblich die Knotenadmittanzmatrix  $\underline{Y}_k$  aufgestellt und die Matrizen  $\underline{B}'$  und  $\underline{B}''$  bi-faktorisiert.
- c) Nach einer Lastflußiteration wird als zusätzliche Konvergenzbedingung getestet, ob die Blindleistungseinspeisungen in alle Knoten vom Typ 4 die Bedingung  $Q_G \leq \epsilon_Q$  erfüllen. Wenn ja, sind die Zustandsgrößen und Stufungen berechnet.
- d) Für  $Q_G > \epsilon_Q$  werden aufgrund von  $Q_G$  verbesserte Stufungen berechnet und die betroffenen Elemente der Knotenadmittanzmatrix gezielt geändert. Es wird keine neue Bi-Faktorisierung von  $\underline{B}'$  und  $\underline{B}''$  durchgeführt.
- e) Erneute Lastflußiteration.

Die Methode wurde mit verschiedenen Testnetzen geprüft und konvergiert in allen Fällen sehr schnell gegen eine Lösung. Die Iterationszahl und Rechenzeit unterscheidet sich kaum von dem Fall, daß keine automatische Stufung berücksichtigt wird.

### 3.1.4 Modell für Estimationsuntersuchungen

Für die sichere Betriebsführung eines Energieversorgungsnetzes wird eine vollständige und zuverlässige Datenbasis vorausgesetzt. Diese Datenbasis wird aufgrund von Messungen und Systeminformationen mit Hilfe der "State Estimation" von Meßfehlern bereinigt und um nicht gemessene Werte ergänzt ermittelt.

Für die Ermittlung einer "optimalen Estimation" ist die Wahl des Meßsystems maßgebend. Die in der Literatur verwendeten Verfahren sind in zwei Hauptverfahren einzugliedern, nämlich "Trial and Error-Verfahren" und "Systematische Meßgeräteplatzierungsverfahren". Diese Methoden können wegen des hohen Zeitaufwandes nur off-line, d.h. bei der Planung eines Meßsystems verwendet werden. Das off-line abgeleitete Verfahren soll auf seine Gültigkeit bei verschiedenen Netzzuständen untersucht werden. Ein möglicher Weg ist die "Monte-Carlo-Simulation" für verschiedene Netzbelastungen oder für verschiedene Netztopologien. Diese Methode ist aber zeitaufwendig und nur aussagekräftig, wenn man ausreichend viele Voruntersuchungen durchführt.

Es wird deshalb hier ein mathematisches Modell abgeleitet, mit dem man näherungsweise das Verhalten der Jacobi-Matrix  $\underline{H}$  bzw. der Estimationsmatrix  $\underline{A}$  aus dem Meß-, Netz- und/oder Lastzustand ermitteln kann. Es gilt:

$$\underline{H} \cong \underline{M} \cdot \underline{P} \cdot \underline{N} \cdot \underline{V} \cdot \underline{U}$$
$$\underline{A} \cong \underline{H}^T \cdot \underline{R}^{-1} \cdot \underline{H}$$

Bild 5 stellt das mathematische Modell in Form eines Blockschaltbildes dar. Mit diesem Modell kann das Verhalten des Meßsystems für jedes einzelne Kriterium (Beobachtbarkeit, Estimationsgenauigkeit, Entdeckbarkeit grober Meßfehler etc.) überprüft werden.

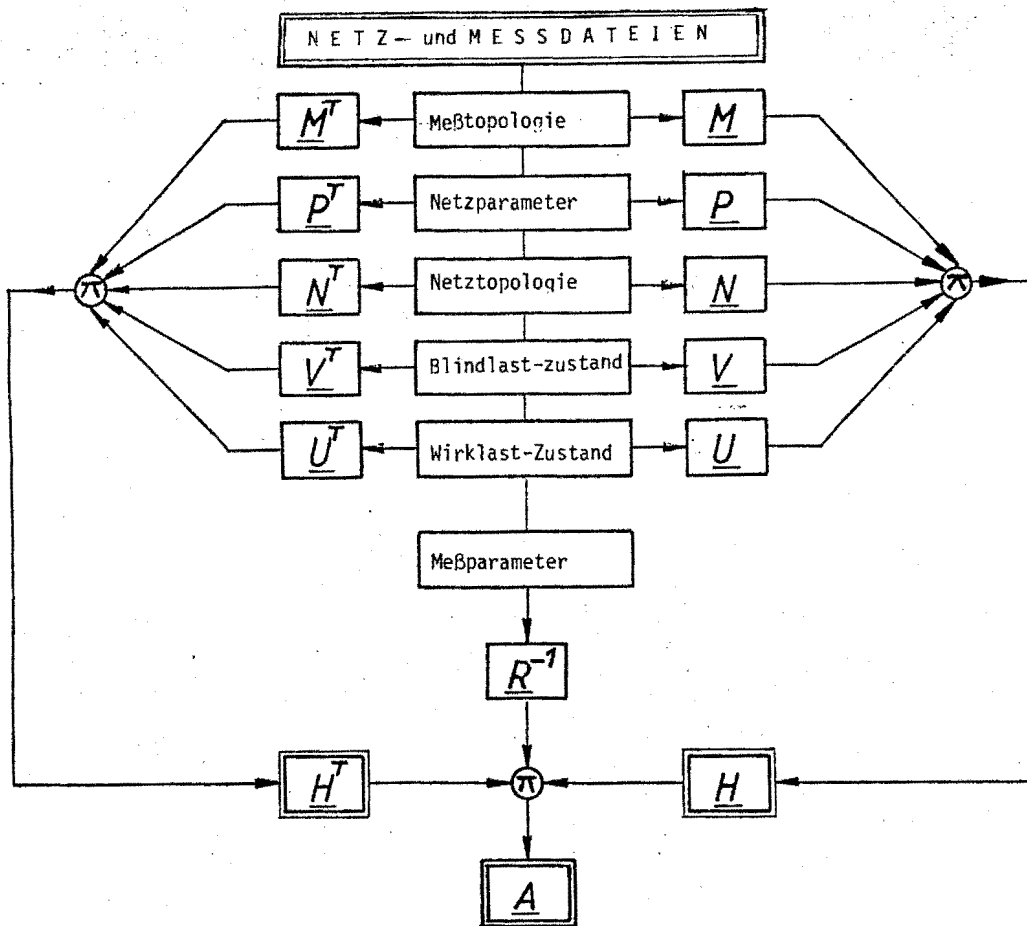


Bild 5: Modell für Estimationsuntersuchungen

Der Beobachtbarkeitstest anhand der Netz- und Meßtopologie bzw. der H-Struktur wird in der Praxis bevorzugt, weil dadurch ein schnelles Testergebnis erzielt werden kann. Das Ergebnis kann aber nur als globales Ergebnis betrachtet werden, weil die numerische Beobachtbarkeit mit der topologischen Beobachtbarkeit nicht identisch sein kann.

Bild 6 stellt symbolisch die zwei Bereiche "Beobachtbarkeit" und "Nichtbeobachtbarkeit" dar. Das Ergebnis eines topologischen Beobachtbarkeitstest ist punktförmig eingezeichnet, während das Ergebnis eines numerischen Beobachtbarkeitstest in dem umgebenden Bereich, dessen Größe (Radius) von den Parametern und dem numerischen Zustand abhängig ist, liegt. Während die Punkte (1) und (4) mit ihrer numerischen Umgebung vollständig nicht beobachtbar bzw. beobachtbar sind, können die Punkte (2) und (3) je nach dem Betriebszustand in die Punkte (2') bzw.

(3') übergehen, so daß die Beobachtbarkeit nicht jedem Fall gesichert ist.

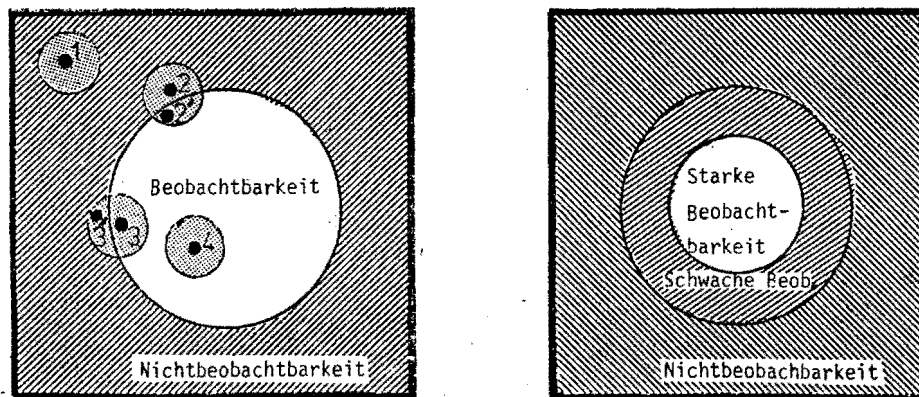


Bild 6: Bereiche der Beobachtbarkeit

Bei der Wahl eines Meßsystems geht es also nicht nur darum, ob das Meßsystem beobachtbar ist oder nicht, sondern auch um die Frage, wie weit das Meßsystem von der Nichtbeobachtbarkeitsgrenze entfernt liegt (Bild 6). Das vorgestellte Modell ermöglicht die Ermittlung der Empfindlichkeit und die Schätzung der Stärke eines Beobachtbarkeitstestes. Das vorgestellte Modell kann auch eingesetzt werden, um das Kriterium der Entdeckbarkeit grober Meßfehler für den on-line Betrieb zu überprüfen.

Von dem Modell wurde abgeleitet, daß die Sensitivitätsmatrix  $\underline{W}$  von den Netzbelastungen im Normalbetrieb nicht abhängig ist. Darüber hinaus werden die  $w_{ii}$ -Werte, die bei der Wahl eines Meßsystems als Maß der Entdeckbarkeit genommen werden, als konstant für verschiedene Netzbelastungen betrachtet.

Zahlreiche Untersuchungen verschiedener Testnetze und für verschiedene Netzbelastungen wurden mit Hilfe des vorhandenen Simulationsprogramms "SIMEST" (siehe Jahresbericht 1983) durchgeführt. Bild 7 stellt die ermittelte  $w_{ii}$ -Werte-Verteilung eines Meßsystems für zwei extreme (schwache und starke) Netzbelastungen bei der Verwendung des vollständigen (full-) Estimators dar. Die beiden Verteilungen sind zwar nicht genau identisch, sie verlaufen jedoch annähernd parallel, so daß kein dominanter Unterschied vorliegt. Bei der Verwendung des entkop-

pelten Estimators hat sich gezeigt, daß die  $w_{ii}$ -Verteilung sich überhaupt nicht ändert, was eine Bestätigung des Modellergebnisses bedeutet.

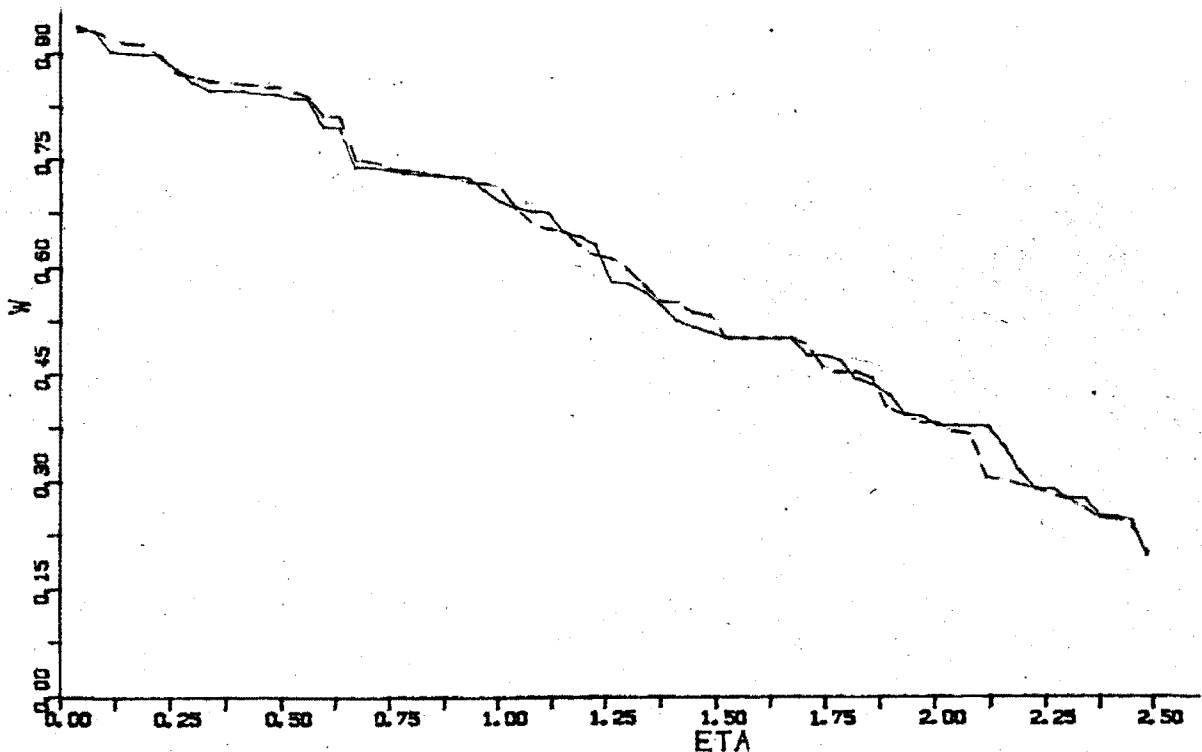


Bild 7: w-Wertevertelung eines Meßsystems für zwei extreme Netzbelastungen (full-Estimator)

Das untersuchte Modell kann im allgemeinen als Basis für die off-line durchgeführten Untersuchungen insbesondere zur Wahl eines optimalen Meßsystems angewendet werden. Alle Kriterien eines Meßsystem können dadurch ermittelt und deren Empfindlichkeit geschätzt werden, so daß die Optimalität im Gegensatz zu anderen Verfahren global und mehrdimensional erreicht wird.

Für diesen Zweck werden für jedes qualitative Kriterium ein oder mehrere quantitative Indikatoren eingesetzt (Bild 8). Jedoch widersprechen sich einige Kriterien, so daß sie nicht gleichzeitig optimiert werden können. Bei der Wahl eines optimalen Meßsystem muß deshalb ein Kompromiß gefunden werden, der den Hauptindikatoren optimal genügt, damit von einem globalen

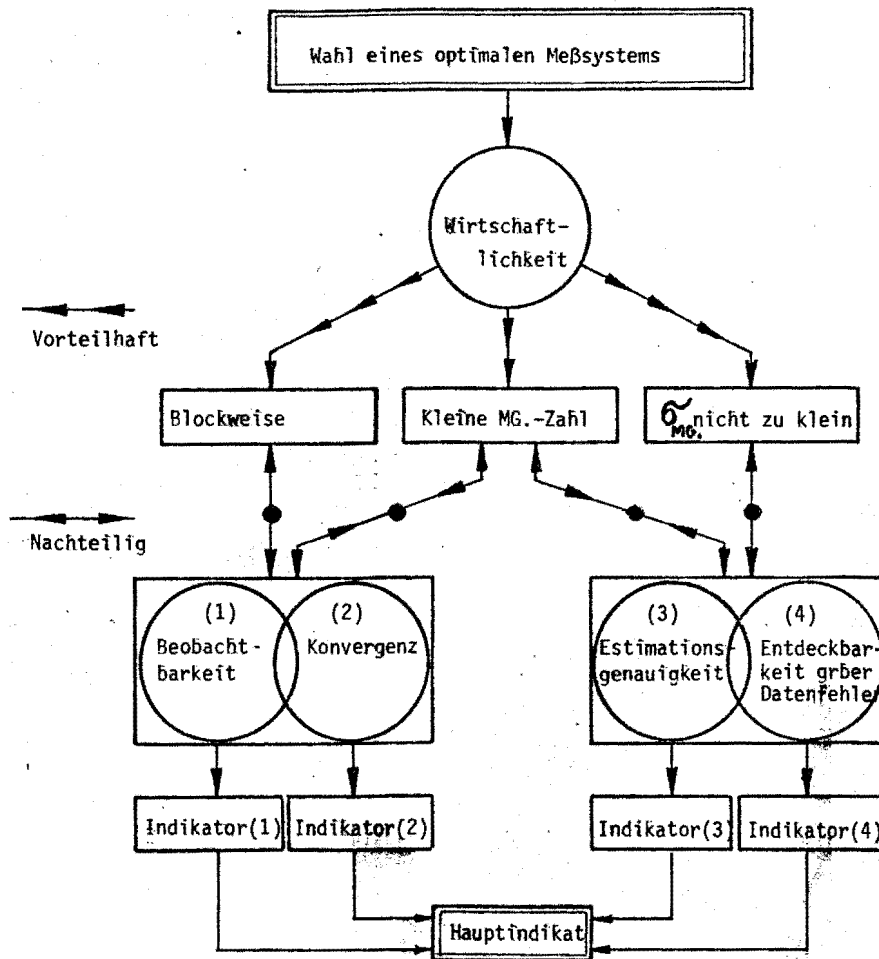


Bild 8: Kriterien zur Wahl eines optimalen Meßsystems

Optimum gesprochen werden kann. Die Untersuchungen zur Wahl eines optimalen Meßsystems nach dieser Methode werden noch durchgeführt.

K. El-Homsi

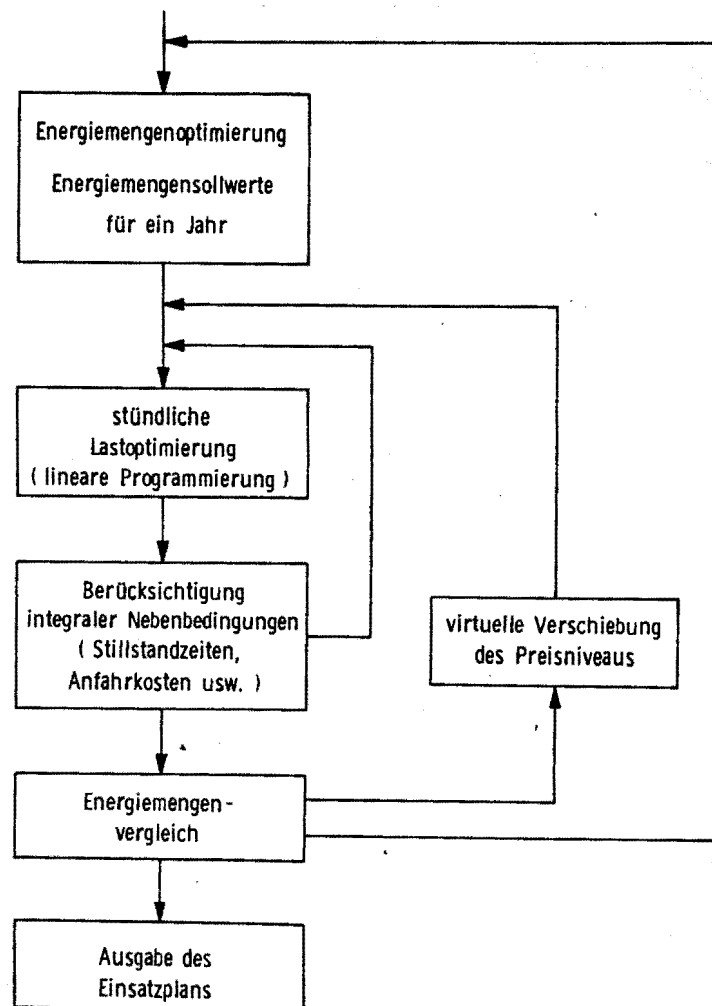
### 3.1.5 Langfristige Kraftwerkseinsatzplanung im thermischen Verbund

Zur wirtschaftlichen Betriebsführung eines Energieversorgungsunternehmens gehört auch die Aufgabe, den Primärenergieverbrauch und die dadurch entstehenden Kosten zu minimieren. Um den wirtschaftlichen Einsatz der Kraftwerksblöcke und Strom-



bezugsverträge langfristig planen zu können, muß ein optimaler Kraftwerkseinsatzplan erstellt werden. Dabei müssen neben den technischen Randbedingungen, wie minimale Stillstands- und Betriebszeiten, Mindest- und Maximalleistungen, Reserveleistungen, Anfahrkosten, vor allem auch die Energiemengenbeschränkungen für heimische Steinkohle und Exportkohle und die damit verbundenen Tarifzonen berücksichtigt werden. Unterschiedliche Preiserhöhungen der verschiedenen Energieträger Gas, Kohle und Öl erschweren zusätzlich die Aufgabe.

Aufgrund der großen Zahl von Variablen ( $10^6 - 10^8$ ) ist eine geschlossene Lösung nicht mehr sinnvoll. Es wird daher eine Teilung in zwei Optimierungsaufgaben vorgenommen. Zum einen eine Energiemengenoptimierung mit den Nebenbedingungen, die



**Bild 9:** Iterationsalgorithmus für die langfristige Kraftwerkseinsatzplanung

sich auf Beschränkungen von Energiemengen, auf Tarifzonen und Preiserhöhungen beziehen. Zum anderen eine stündliche Leistungsoptimierung, bei der die Ergebnisse der Energiemengenoptimierung als Randwerte einfließen. Der Iterationsalgorithmus erlaubt nun durch virtuelles Verschieben des Preisniveaus die Einhaltung dieser Randwerte (Bild 9). Alle betrieblichen Nebenbedingungen fließen direkt in die stündliche Optimierungsrechnung ein. Man erhält so die Lösung, die im Rahmen der Lastprognosegenauigkeit ausreichend dicht am globalen Optimum liegt. Basis für die Optimierungsrechnung ist die lineare Planungsrechnung, bei der heute auf äußerst leistungsfähige Rechnerprogramme zurückgegriffen werden kann.

Anhand von mehreren Modellbeispielen und Vergleichsrechnungen wird die Wirksamkeit des Verfahrens verdeutlicht. Bezüglich einer ausreichend kurzen Rechenzeit ist der stündlichen Leistungsoptimierung besondere Beachtung zu schenken. Durch vereinfachte Leistungsberechnungen sind auch größere Modelle (25 und mehr Kraftwerkseinheiten) in genügend kurzer Rechenzeit zu optimieren.

H. Slomski, J. Voß

Berichte: EV 8302, EV 8328

### 3.1.6 Knotenbezogene Lastprognose

Zur sicheren und wirtschaftlichen Verteilung der Leistung in elektrischen Energieversorgungssystemen ist die zu erwartende Leistungsanforderung in den einzelnen Verteilstationen (Knoten) von besonderem Interesse. Die knotenbezogene Lastprognose soll hierbei jedoch nicht primär als Hilfsmittel für die Einsatzplanung von Kraftwerken bzw. bei der Betriebsplanung von Höchstspannungsanlagen Anwendung finden, sondern für die Betriebsführung im Hoch- und Mittelspannungsbereich dienen.

Mit der Klassifizierung der Verbraucher in verschiedene Gruppen werden typische Verbraucher-Normalkurven dieser Gruppen und die

Auswirkungen von äußeren Einflüssen auf diese Normalkurven durch ein lineares Modell ermittelt. Mit Hilfe der jeweiligen Verbraucherstruktur, den berechneten Normalwerten der einzelnen Verbrauchergruppen und den prognostizierten oder vorgegebenen äußeren Einflüssen (Temperatur, Niederschlag u.s.w.) werden die zukünftigen Lastanforderungen jeder einzelnen Gruppe und damit der einzelnen Verteil-Stationen bestimmt.

Grundvoraussetzung für das hier angewendete Verfahren ist die Kenntnis über die Verbraucherstruktur jedes einzelnen Knotens. Typisiert in verschiedene Gruppen (unterschiedliche Haushaltsgruppen, Gewerbegruppen, Speicherheizung, öffentliche Beleuchtung u.s.w.) wird der Jahresverbrauch dieser Gruppen an den einzelnen Knoten als Maß für die Verbraucherstruktur verwendet. Als Ansatz für die Ermittlung von Verbraucher-Normalkurven bzw. zur Prognose der Lastanforderungen an den Verteilstationen wird das lineare Modell

$$\underline{P} = \underline{A} (\underline{x} + \underline{\Delta x})$$

verwendet. Hierbei gibt der Vektor  $\underline{P}$  die einzelnen Knotenleistungen, die Matrix  $\underline{A}$  die Verbraucherstruktur, der Vektor  $\underline{x}$  die Verbraucher-Normalwerte und der Vektor  $\underline{\Delta x}$  die Änderung der Verbraucher-Normalwerte auf Grund äußerer Einflüsse an. Dieses lineare Modell beschreibt die Knotenlast als Summe der Lastanforderungen der an ihn angeschlossenen Verbrauchergruppen. Bei der Wahl der diskreten Zeitpunkte eines Tages für die Bestimmung der Verbraucher-Normalwerte und der späteren Prognose kann auf ein äquidistantes Zeitraster für die Messung der Knotenleistungen verzichtet werden.

Mit Hilfe der linearen Estimation werden aus ausgesuchten Lastdaten der Vergangenheit die Normkurven der Verbraucher bestimmt. Auswahlkriterien sind hierbei äußere Einflußfaktoren wie Temperatur, Helligkeit usw. Diese Einflußfaktoren sollen vorgegebenen Normalwerten (z.B. mittlere Werte für eine Jahreszeit) entsprechen, wobei  $\underline{\Delta x} \approx \underline{0}$  gesetzt werden kann. Hierbei wird gleichzeitig der Gültigkeitszeitraum der Verbraucher-Normalkurven (z.B. eine Jahreszeit) bestimmt.

Zur knotenbezogene Lastprognose ist für die verwendeten äußeren Einflußfaktoren deren Auswirkungen auf die Lastanforderungen der einzelnen Verbrauchergruppen zu bestimmen. Bei Annahme eines linearen Einflußmodells können die Modellparameter nach demselben Verfahren wie die Verbraucher-Normalkurven bestimmt werden. Es ist für jede Verbrauchergruppe ein separates Modell für jeden der verwendeten Einflußfaktoren zu ermitteln.

Durch die Prognose bzw. Vorgabe der Einflußfaktoren im zu prognostizierenden Zeitraum kann dann für jede Verbrauchergruppe deren Lastanforderung an die einzelnen Verteil-Stationen bestimmt werden. Hierbei wird die Verbraucherstruktur als über einen größeren Zeitraum konstant angenommen. Saisonbedingte Verbraucher (z.B. Speicherheizungen in der Heizperiode) sind dabei zu berücksichtigen.

Dieses Verfahren wird z.Z. an Lastdaten von Kabelabgängen in der 10 kV Mittelspannungsebene erprobt. Als maßgebender Einflußfaktor wird hier die Temperatur herangezogen. Grundsätzlich können jedoch neben meteorologischen Einflußfaktoren auch kurzfristige und langfristige Besonderheiten (kulturelle und politische Besonderheiten, Feiertage, Kurzarbeit usw.) beachtet werden.

Die in der Erprobung befindlichen Programme dienen dazu, neben der Güte der Prognoseresultate auch die Fragen nach der Verwendbarkeit der als Zwischengröße für die Prognose verwendeten Verbraucher-Normalkurven und den berechneten Einflußmodellen hinsichtlich ihrer Aussagefähigkeit zu klären. Hierbei wird besonders der Übergang von einer einzigen Verbraucherstruktur zu tageszeitabhängigen Strukturen (z.B. für den Tag und für die Nacht) zu betrachten sein.

J.-G. Tebbe

### 3.1.7 Langzeitkabelüberwachung

Im Bereich der Mittel- und Niederspannungsnetze ist die genaue Kenntnis der Auslastung einzelner Kabelabgänge von großem Interesse. Diese Aufgaben werden bis heute mit x-t-Schreibern durchgeführt. Nachteilig bei diesem Aufzeichnungsverfahren ist die Begrenzung der möglichen Kanalzahlen bei vorgegebener Auflösung. Weiterhin ist die Auswertung der aufgenommenen Meßdaten sehr zeitaufwendig.

Die Entwicklung preiswerter Einplatinencomputer und Datenspeicher ermöglicht den Aufbau kompakter und intelligenter Meßwert-erfassungssysteme. Auf der Basis eines preisgünstigen Einplatinenrechners wurde ein Meßwert-erfassungssystem, welches die speziellen Erfordernisse einer Langzeitkabelüberwachung berücksichtigt, entwickelt. Bild 10 zeigt den prinzipiellen Aufbau der Kabelüberwachungsanlage. Das Gerät kann mit maximal 32 Kanälen bestückt werden, wobei Kanal 1 bis 30 zur Strommessung und die Kanäle 31/32 für sonstige Signale, wie z.B. Temperaturmessung oder zur Aufzeichnung von Rundsteuerbefehlen belegt werden können.

Die Strommessung in Niederspannungsverteilanlagen erfolgt durch das Austauschen der NH-Sicherungspatronen gegen eine verkürzte NH-Sicherungspatrone mit aufgestecktem Kleinstromwandler und Kompaktmeßwertumformer. Der Signalwandler besteht aus einem Umsetzer, welcher den Mittelwert  $I_i$  des Stromeffektivwertes über 5s bestimmt. Der Index  $i$  zählt die 5s-Zeitintervalle innerhalb einer Viertelstunde; d.h.  $i = 1, 2, \dots, 180$ . Daraus läßt sich der Viertelstundenmittelwert  $I_{\text{mittel}} = (1/180) \cdot \sum I_i$  berechnen. Ferner wird in jedem Viertelstundenintervall der maximale und der minimale 5s-Strommittelwert  $I_{\text{max}}$  resp.  $I_{\text{min}}$  bestimmt.

Die so ermittelten Stromwerte ( $I_{\text{max}}$ ,  $I_{\text{min}}$ ,  $I_{\text{mittel}}$ ) werden zusammen mit Datum, Uhrzeit und Kabelidentifikation im Viertelstunden-Rhythmus auf einer Floppy-Disk abgespeichert. Bei maximaler Kanalzahl ergibt sich eine durchgehende Aufzeichnungsdau-

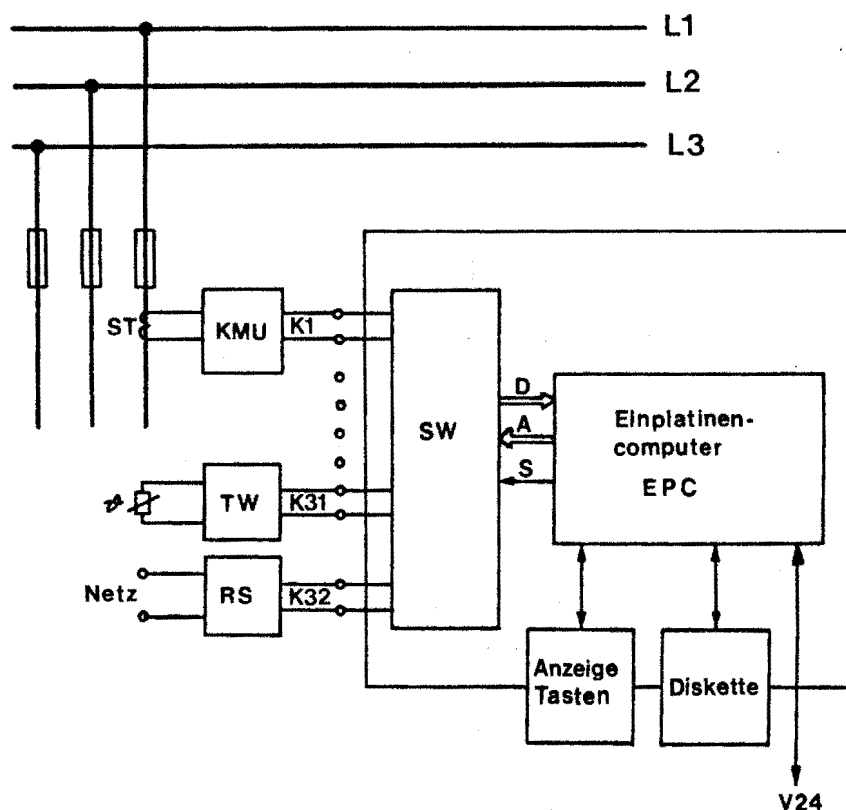


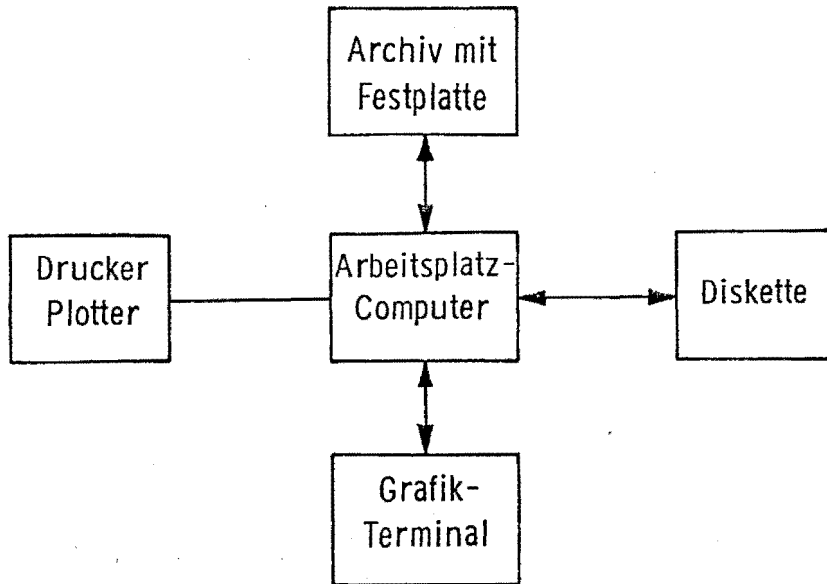
Bild 10: Kabel-Überwachungsanlage

ST Aufsteckwandler für NH-Sicherung, KMU Kompakt-Meßwertumformer, SW Signalwandler (I/f), TW Temperaturmessung, RS Rundsteuersignalwandler

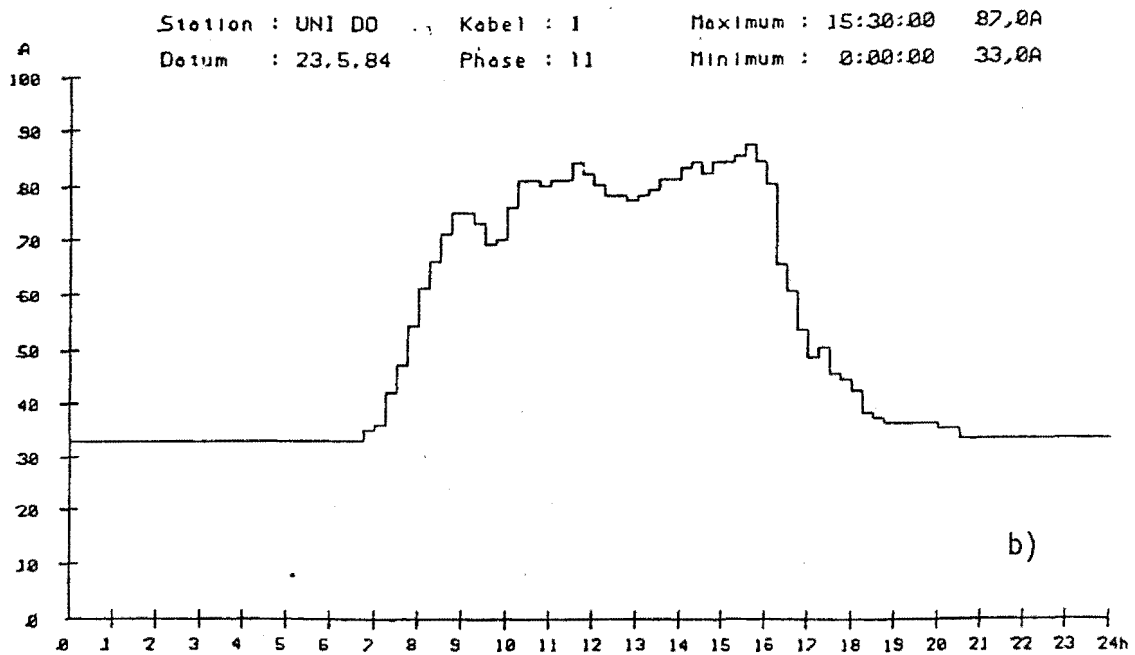
er von ca. zwei Monaten. Die Auswertung der Meßdaten wird auf einem zentralen Arbeitsplatzrechner vorgenommen (Bild 11a). Eine mögliche Ergebnisdarstellung zeigt Bild 11b. Die Langzeitüberwachung gibt somit Auskunft über die Auslastung wichtiger Kabel, die Lastentwicklung über einen längeren Zeitraum, das Verbraucherverhalten, Hinweise für die Erweiterung resp. Erneuerung der Kabel sowie gezielte Unterlagen für die optimale Kapazitätsausnutzung des Netzes über Rundsteueranlagen. Gegenüber herkömmlichen Verfahren bietet das hier gezeigte Überwachungssystem ein sehr gutes Preis/Leistungs-Verhältnis.

W. Horenkamp, Th. Reißing

Bericht: EV 8410



a)



b)

Bild 11: a) Zentrales Auswertungssystem

b) Ergebnisdarstellung auf dem Bildschirm

### 3.1.8 Berechnung des Leistungsbedarfs industrieller Großabnehmer

Die Kosten, die einem Industrieunternehmen für den Bezug elektrischer Energie entstehen, setzen sich aus einem leistungs- und einem arbeitsabhängigen Anteil zusammen. Der Arbeitspreis (DM/kWh) und der Leistungspreis (DM/kW) sind in den geltenden Tarifbestimmungen festgelegt. Der Arbeitspreis ist für die tatsächlich bezogene Energie zu entrichten, während der Leistungspreis für die Kosten zu bezahlen ist, die dem Stromversorgungsunternehmen für die Bereitstellung von Leistung entstehen, zum Beispiel für die zusätzliche Reservehaltung von Kraftwerksleistung. Die abgerechnete Leistung ergibt sich - je nach geltendem Recht - zum Beispiel

- aus der tatsächlich aufgetretenen Leistungsspitze oder
- aus einem mit dem Stromversorgungsunternehmen vereinbarten Leistungsgrenzwert, dessen Überschreitung mit unverhältnismäßig hohen Kosten bestraft wird.

Die Leistung geht hierbei nicht als Momentanleistung ein, sondern als ein über eine Viertelstunde gemittelter Wert. Die Vereinbarung einer "Viertelstunden-Höchstleistung" bedeutet also, daß je Viertelstunde nur eine begrenzte Energiemenge bezogen werden soll. Dadurch eröffnet sich die Möglichkeit, vor Ablauf einer Viertelstunde den zu erwartenden Leistungsmittelwert hochzurechnen ("Maximumrechnung") und - insbesondere bei stark schwankendem Verbrauch - zu beeinflussen. Durch geschickte Steuerung des Verbrauchs - d.h. durch kurzzeitiges Abschalten einzelner dafür geeigneter Verbraucher - lassen sich die extremen Leistungsspitzen kappen und somit die leistungsabhängigen Kosten reduzieren, ohne die Produktion wesentlich zu behindern. Auf die Fülle von Detailfragen, die bei der Auswahl der abzuschaltenden Verbraucher zu klären sind, wird an dieser Stelle nicht weiter eingegangen.



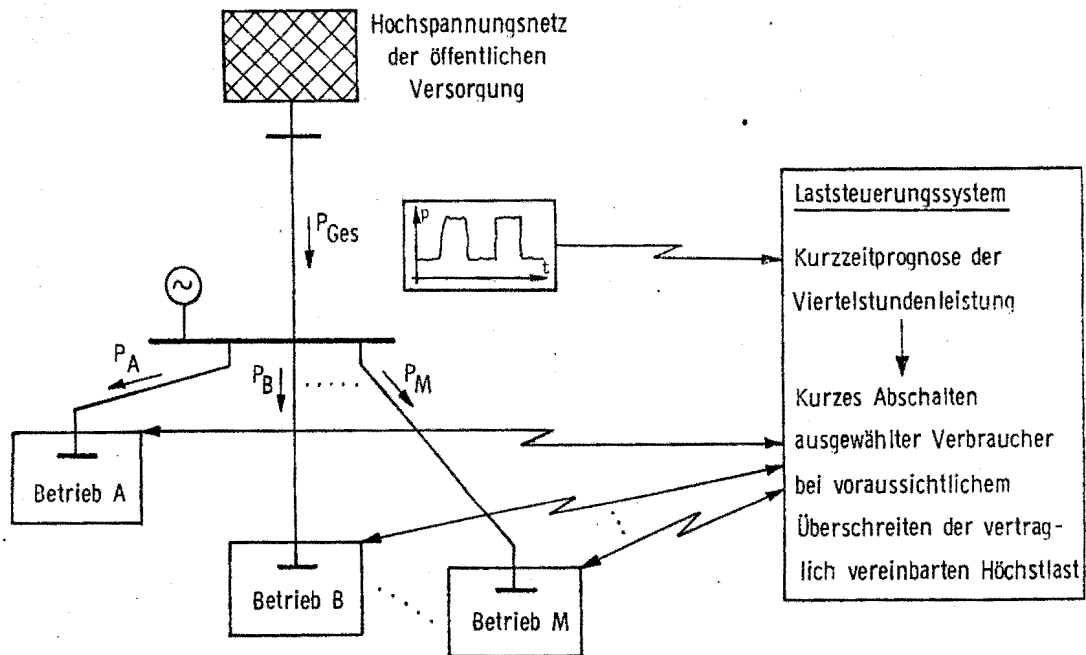


Bild 12: Stromversorgung eines Werkes mit mehreren Betrieben, das mit einem Laststeuerungssystem ausgerüstet ist

Für ein Unternehmen mit einem derartigen Laststeuerungssystem stellt sich das Problem, abhängig von der zu erwartenden Produktion die benötigte Höchstlast zu bestimmen, bzw. einen Zusammenhang zu prognostizieren zwischen der gewählten Höchstleistung und der Häufigkeit der sich daraus ergebenden notwendigen Verbraucherabschaltungen. Die Kenntnis des genannten Zusammenhangs schafft die Grundlage für eine Gesamtkostenoptimierung von Stromkosten und den Kosten, die durch die Verbraucherabschaltungen entstehen.

Bild 12 zeigt exemplarisch die Stromversorgung eines Werkes mit insgesamt M einzelnen Betrieben und einem werkseigenen Kraftwerk, das zunächst nicht betrachtet werden soll. Der gesamte Leistungsbedarf des Werkes ist demzufolge identisch mit der Summe der Bezüge der einzelnen Betriebe.

Zur Leistungsbedarfsprognose für das gesamte Werk wurde ein Verfahren erarbeitet, das wie folgt zusammenfassend beschrieben werden kann:

- Aufstellen eines "Plans" für jeden Betrieb, aus dem (zum Beispiel für jede Schicht) die geplante Fahrweise zu entnehmen ist. Der Fahrplan muß den gesamten Prognosezeitraum umfassen.
- Beschreibung des Leistungsverhaltens eines jeden Betriebes in jeder Schicht durch das die Fahrweise charakterisierende Histogramm.
- Berechnung des Leistungsverhaltens des gesamten Werkes in jeder Schicht durch Faltung der Histogramme aller Betriebe.

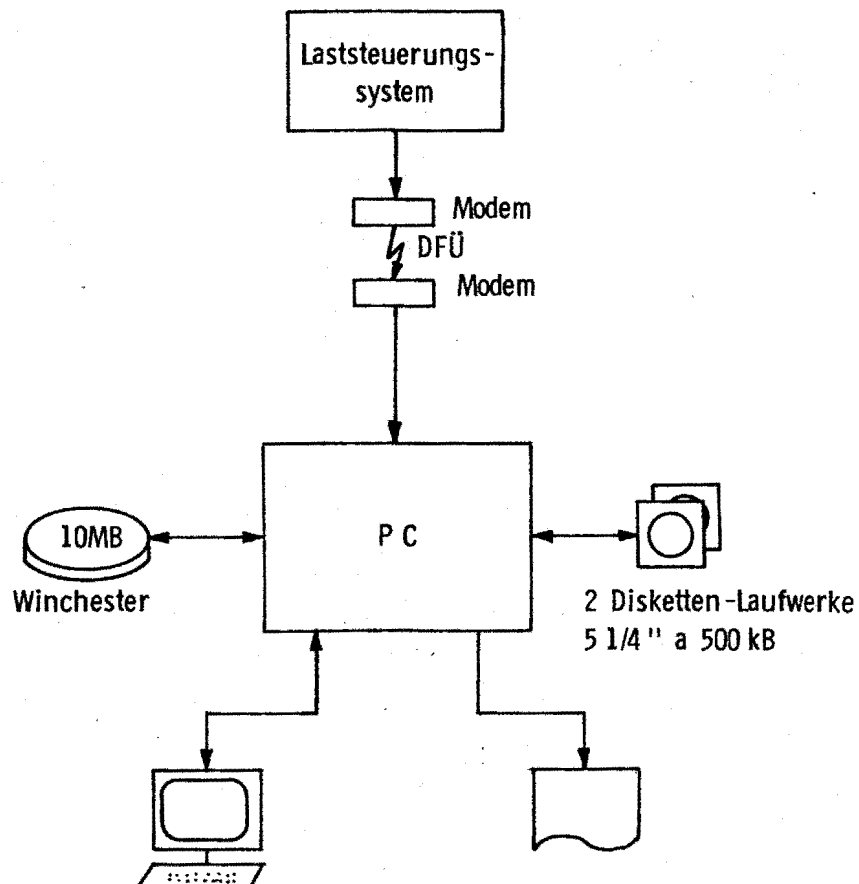


Bild 13: Rechnerkonfiguration des Lastprognosesystems

Der hohe Bedarf an auszuwertenden Daten, die relativ zeitaufwendigen Rechnungen sowie der Wunsch, bei der Ermittlung der benötigten Höchstleistung mehrere Varianten untersuchen zu können, läßt den Einsatz eines Rechners sinnvoll erscheinen. Ein am Arbeitsplatz verfügbarer Rechner ermöglicht es dem mit dieser Aufgabe betrauten Mitarbeiter unter anderem,

- am Arbeitsplatz, d.h. unter Zugriff auf alle benötigten Unterlagen, interaktiv die optimale Höchstleistung zu bestimmen
- auf Änderungen des Fahrplans und
- auf nur kurzfristig erkennbare äußere Einflüsse schnell zu reagieren
- bei innerbetrieblichen Veränderungen, die neue Histogramme erforderlich machen, die wesentlichen Einflußfaktoren zu ermitteln.

Ein derartiges System zur Leistungsbedarfsanalyse (Bild 13) wird derzeit von einem großen Unternehmen der Hüttenindustrie voraussichtlich im Jahre 1985 in Betrieb genommen.

Th. Reißing

### 3.2 Simulation statischer und dynamischer Vorgänge in elektrischen Energieversorgungssystemen

#### 3.2.1 Digitale Simulation technischer Systeme mit einem Arbeitsplatzcomputer

Dem Digitalrechner kommt heute bei der dynamischen Simulation eine zunehmend größere Rolle dadurch zu, daß der Anwender von Problemen der Programmierung weitgehend enthoben wird, indem durch Spezial-Software die Lösung der Differentialgleichungen durch numerische Integration vorgenommen wird. Diese Technik der "digitalen Simulation", die gegenüber der "Analogsimulation" den Vorteil höherer Genauigkeit und einfacherer Anwendbarkeit bietet, blieb bislang jedoch auf größere Rechenanlagen beschränkt, da nur mit ihnen die für diese Anwendung erforderliche Datenverarbeitungsleistung erbracht werden konnte (Rechenzeit, Genauigkeit, Speicherbedarf). Durch die rasante Entwicklung der Mikroelektronik ist es jedoch möglich, die inzwischen sehr leistungsfähigen Arbeitsplatzcomputer auf diesem Gebiet einzusetzen, um so zu einer wesentlich verbesserten Mensch-Maschine-Interaktion vor und während der Simulation zu gelangen. Darüber hinaus wird die interaktive digitale Simulation durch die reduzierten Ausstattungskosten für die Hardware einem breiteren Anwendungsspektrum zugänglich werden.

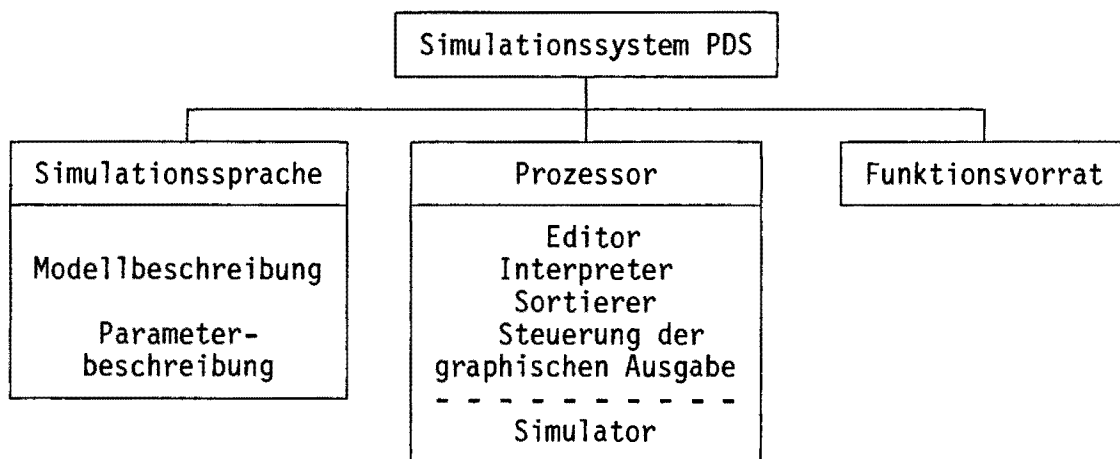


Bild 14: Der Aufbau des Simulationssystems PDS

Ausgehend von den Erfahrungen mit dem Programmsystem CSP, über das an dieser Stelle in der Vergangenheit ausführlich berichtet wurde, konnte in diesem Jahr ein Simulationsprogramm für einen Personal-Computer entwickelt werden, dessen Aufbau in Bild 14 dargestellt ist. Während die Simulationssprache des neuen Simulationssystem PDS (Personal Dynamic Simulator) mit der des CSP übereinstimmt, wurde bei der Entwicklung des Prozessors - der Gesamtheit aller erforderlichen Programme - ein anderer Weg beschritten. Die mit dem Editor, der auf die speziellen Belange der interaktiven dynamischen Simulation zugeschnitten ist, eingebene Modell- und Parameterbeschreibung wird durch den Interpretierer und den Sortierer selbständig in eine Rechenvorschrift umgesetzt, die durch den Simulator während der Simulation abgearbeitet wird. Der zeitliche Verlauf beliebiger Modellvariablen kann dabei auf einem graphischen Bildschirm simultan ausgegeben oder nach Ablauf der Simulation durch einen Plotter gezeichnet werden. Durch die interpretierende Bearbeitung der mathematischen Modelle können gegenüber dem Programmsystem CSP - das als Übersetzungssystem konzipiert ist - ähnlich einem Analogrechner auch während der Simulation die Modellparameter geändert werden. Die Ablaufsteuerung erfolgt hierbei in Menütechnik.

Die sogenannte Benutzeroberfläche des Programmsystems PDS ermöglicht eine verbesserte Mensch-Maschine-Kommunikation, die es gestattet, Modell- und Parametervariationen leicht durchzuführen. Durch die anschauliche graphische Aufbereitung der Ergebnisse und deren Speicherung ist jederzeit eine vergleichende Wertung sowie eine gute Dokumentation möglich.

D. König

### 3.2.2 Dynamische Untersuchungen elektrischer Energieversorgungssysteme im Mittelzeitbereich

Das Mittelzeitmodell behandelt diejenigen dynamischen Vorgänge, die im Zusammenhang mit der Erhaltung bzw. Wiederherstellung des Gleichgewichts zwischen der gesamten elektrischen Last und

der mechanischen Antriebsleistung der Turbinen stehen. Für die Anwendung dieses Modells wird vorausgesetzt, daß die Vorgänge der Kurzzeitdynamik gegenüber denen der Mittelzeitdynamik genügend schnell ablaufen - was anhand einer Eigenwertanalyse des Kurzzeitmodells zu prüfen ist - und daß eine zeitliche Trennung möglich ist. Dieses Modell, das durch eine einheitliche Systemfrequenz charakterisiert ist, eignet sich sehr gut für die Untersuchung verschiedener dynamischer Vorgänge in elektrischen Energieversorgungssystemen, die sowohl für die Planung als auch für die sichere Betriebsführung von großer Bedeutung sind. Für diese Aufgabe wurde das Programm MITDYS (Mid-Term Dynamic Simulating Program) aufgebaut, das durch interaktive Steuerung das gewünschte Modell für die Simulation im Mittelzeitbereich erstellt und mit dem vorhandenen Programmsystem CSP die Simulation durchführt.

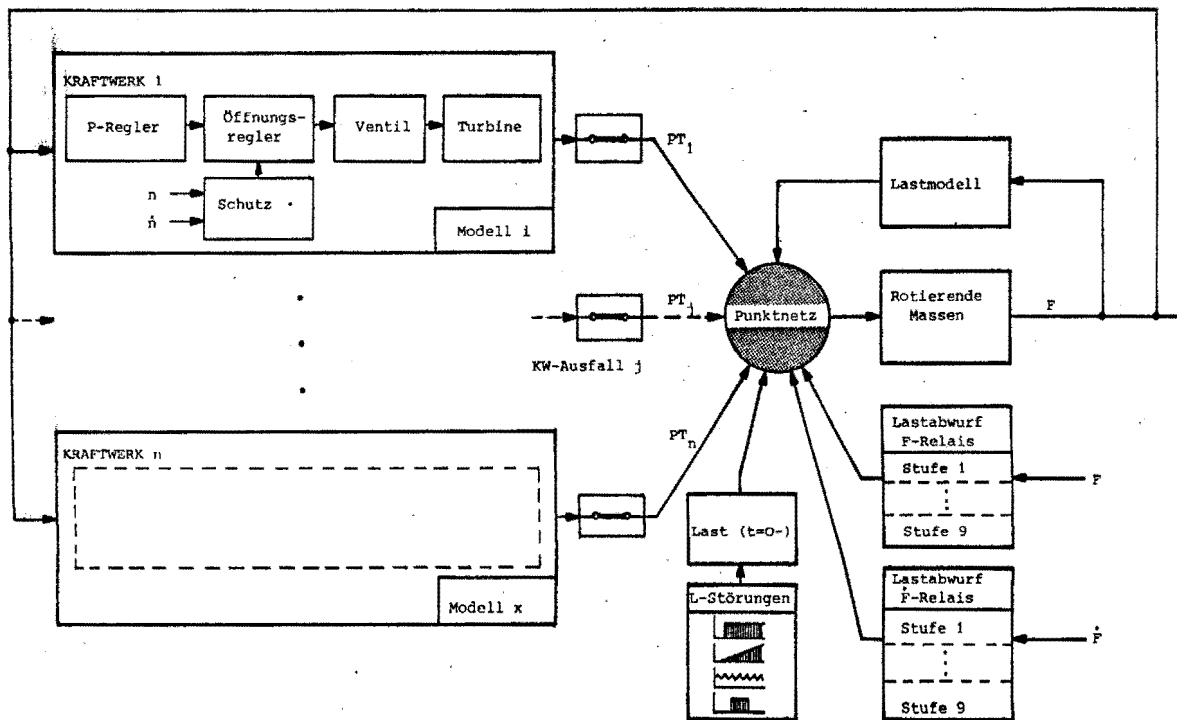


Bild 15: Konfiguration eines Modells für den Mittelzeitbereich

Für die Erstellung des Simulationsmodells stehen für den Anwender verschiedene Kraftwerksmodelle, Lastmodelle, Lastabwurfmodelle sowie Modelle für Kraftwerksausfälle und Laststörungen zur Verfügung. Alle diese Teilmodelle sind in Form von Strukturunterprogrammen in einer Programmbibliothek abgelegt. Durch

die interaktive Beschreibung der Modellstruktur setzt das Programm aus den Teilmodellen das gewünschte Gesamtmodell zur Simulation zusammen. Die erforderlichen Parameter werden danach im Terminal-Modus abgefragt.

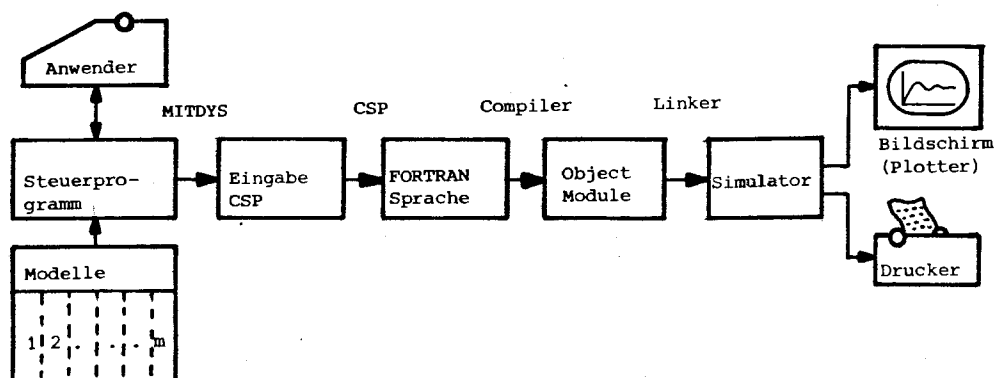


Bild 16: Ablaufschema zum Aufbau der Modellstruktur

In Bild 15 ist eine einfache Konfiguration eines Modells im Mittelzeitbereich dargestellt. Bild 16 zeigt die verschiedenen Möglichkeiten zum Aufbau der Modellstruktur. Im allgemeinen ist es möglich, ein System aufzubauen, das folgende Teilmodelle enthält:

Kraftwerkspark (n Kraftwerke)

- Unterschiedliche Kraftwerksmodelle (z.Z. 7)

Lastabwurfmodell

- Lastabwurf mit f-Relais (Zeitverzögerung einstellbar)
- Lastabwurf mit  $df/dt$ -Relais (Zeitverzögerung einstellbar)

Lastmodell und Laststörungen

- Lastmodelle (f-Abhängigkeit der Lasten)
- Störungen: sprungförmige Laständerung  
impulsförmige Laständerung  
rampenförmige Laständerung  
Lastrauschen

Kraftwerksausfall

- Kraftwerkstrennung vom Netz

Die bisherige Erfahrung mit dem Programm zeigt interessante Anwendungsgebiete wie z.B.:

- a) Optimales Lastabwurfmodell und Stufung  
Die Simulation zeigt, daß dieses Konzept für thermische und hydraulische Systeme sehr unterschiedlich sein kann.
- b) Untersuchung von Kraftwerksausfällen und notwendiger Kraftwerksreserve  
Wichtig um das n-1 Prinzip im dynamischen Verhalten von Kraftwerk und Netz zu überprüfen.
- c) Auswirkung von verschiedenen Laststörungen auf die Regelanrichtungen und das Systemverhalten
- d) Einfluß von Parametervariationen in den Modellen auf das Systemverhalten

Das Programm gestattet auch, ohne Aufwand Änderungen in der Modellstruktur oder von bestimmten Parametern durchzuführen. Für die Ausgabe der Ergebnisse werden die interessierenden Systemgrößen aus einem "Ausgabe-Menü" gewählt, nach der Simulation gedruckt und in einer Plot-Datei gespeichert. Die gewonnenen Kurvenverläufe können hiermit auf dem Bildschirm abgebildet oder mittels Plotter gezeichnet werden.

Der Einbau weiterer Modelle in das Programm MITDYS ist vorgesehen und ohne großen Aufwand möglich.

J. Lemaitre

### 3.2.3 Dynamisches Spannungsverhalten im Kurzzeitbereich

Es ist zwar prinzipiell möglich, für das gesamte Energieversorgungsnetz ein in allen Frequenzbereichen gültiges mathematisches Modell zu formulieren, jedoch würde die Lösung des Differentialgleichungssystems wegen der umfangreichen Parametrisierung und der begrenzten Rechnerkapazität nicht möglich sein. Es ist deshalb notwendig, ein in seinem Gültigkeitsbereich



datei erstellt, aus der in einem Auswertungsverfahren nach der Simulation die interessierenden Größen bestimmt und graphisch dargestellt werden können. Zur Demonstration des Programms wird der Polradwinkel  $\delta_1$  dargestellt. Im Bild 20 wird nach einem Leitungsausfall ein neuer stabiler Arbeitspunkt gefunden, während im Bild 21 nach einer Kurzunterbrechung der Generator im Kurzzeitbereich nicht mehr stabilisiert wird.

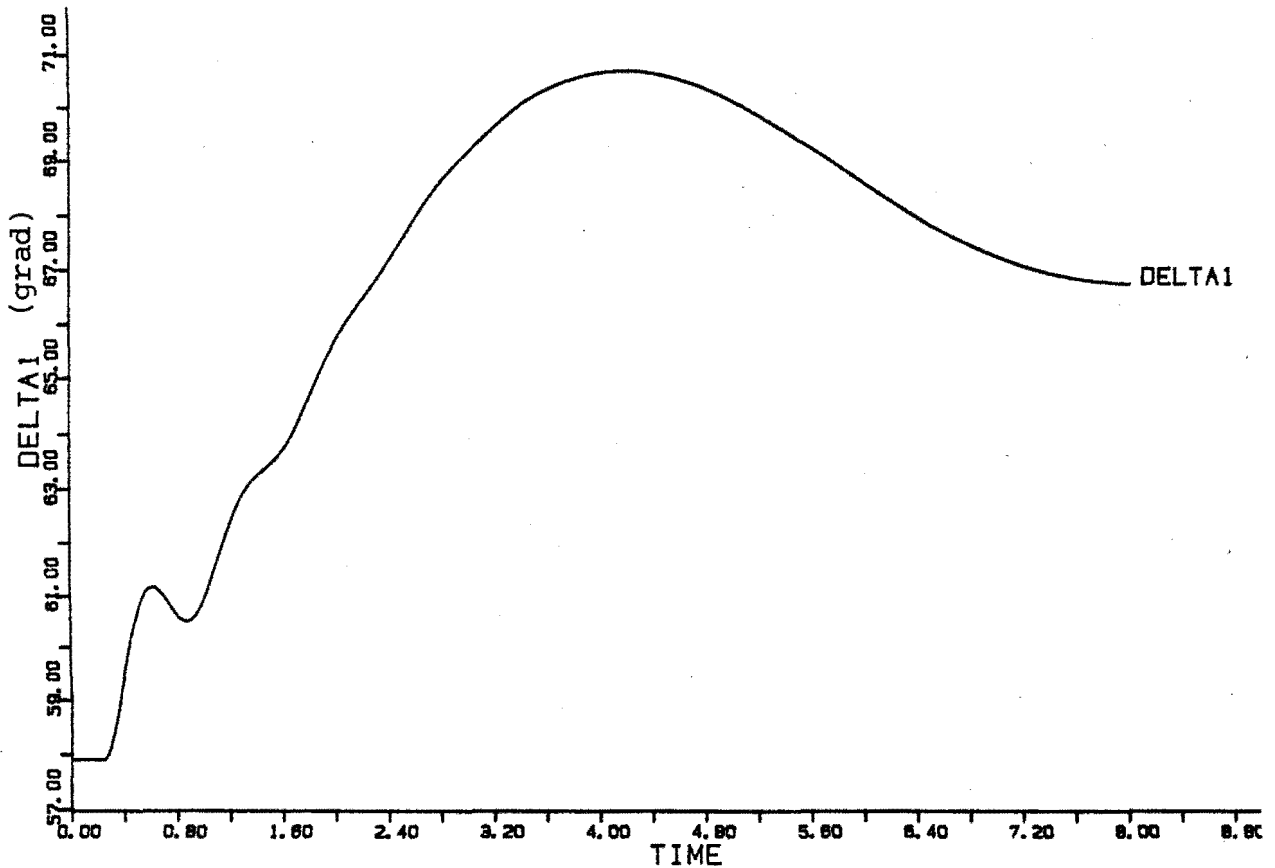


Bild 20: Verlauf des Polradwinkels nach einem Leitungsausfall

In weiteren Simulationen wurden die Leistungsfähigkeit des Programms nachgewiesen und die Ergebnisse mit anderen Verfahren verglichen. Durch die einfache Umsetzung des dynamischen Modells in einen Simulator mit Hilfe des Programms CSP (Continuous Simulating Program) konnte das Modell in sehr übersichtlicher Form beschrieben werden, so daß die Aufmerksamkeit des Anwenders sich mehr auf die technische Aufgabenstellung als auf die Programmierung und Mathematik konzentrieren kann. Die be-

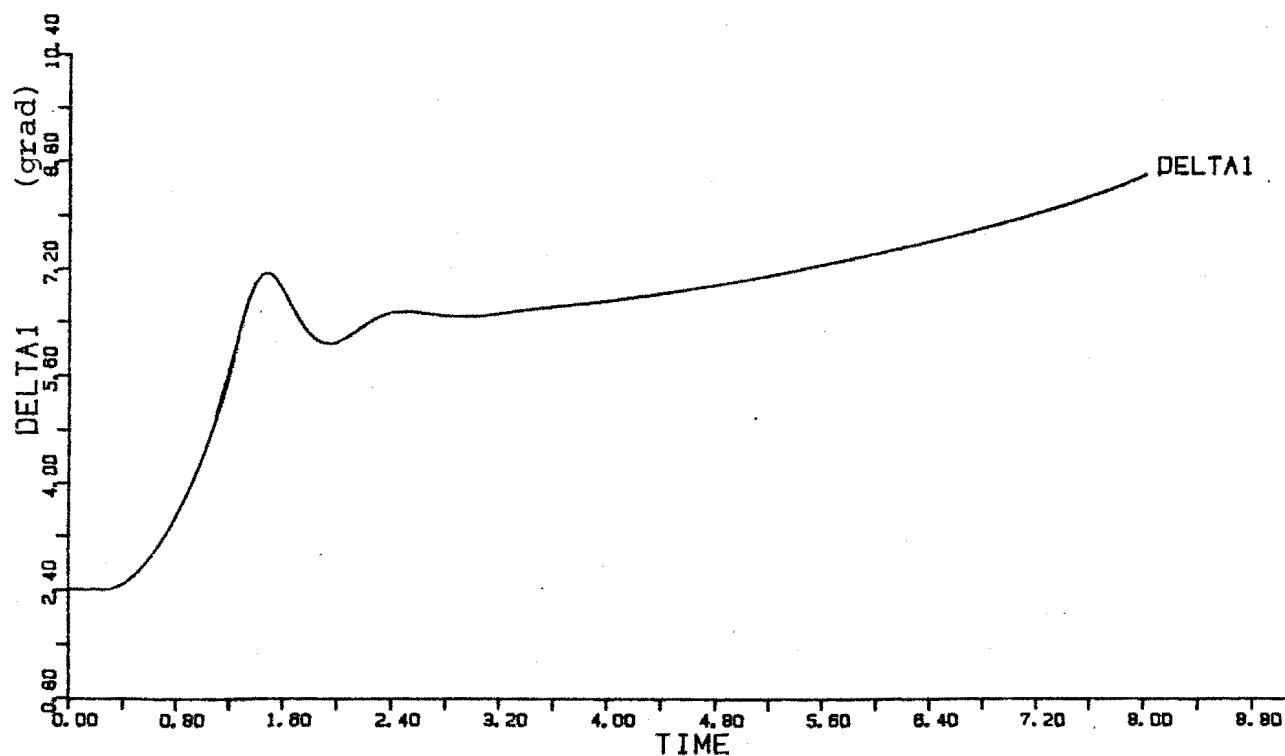


Bild 21: Verlauf des Polradwinkels nach einer Kurzunterbrechung

stehende Programmversion wird zur Zeit erweitert zur Untersuchung verschiedener Erregersysteme und soll in einem weiteren Ziel den gemeinsamen Einfluß von Spannungs- und Leistungsregelung auf die Stabilität simulieren.

P. Stöber

### 3.2.4 Spannungs-Blindleistungsregelung in elektrischen Energieversorgungsnetzen

In den vergangenen Jahren sind verschiedene Regelungsalgorithmen für die sekundäre Spannungs-Blindleistungsregelung vorgestellt worden, mit denen das Spannungsband im Netz und die Blindleistungsverteilung auf die im Netz eingesetzten Generatoren beeinflußt werden kann.

Berechnet werden durch das Regelungsgesetz die Stellgrößen, die aus Messungen der Knotenspannungen und Blindleistungseinspeisungen abgeleitet werden, und durch die der gewünschte Einfluß auf den Netzzustand genommen wird.

Bei der ausschließlichen Regelung der Knotenspannungen im Netz ergeben sich relativ klar umrissene Gebiete, in denen der im Gebiet liegende Generator die Spannung des gesamten Gebietes beeinflusst. Hierbei werden keine Blindleistungsflüsse beachtet, die zwischen den Gebieten auftreten und die zu erheblicher Blindleistungsungleichverteilung der im Netz eingesetzten Generatoren führen können. Bild 22 zeigt die in einem Ausschnitt des europäischen Verbundnetzes entstehenden Gebiete.

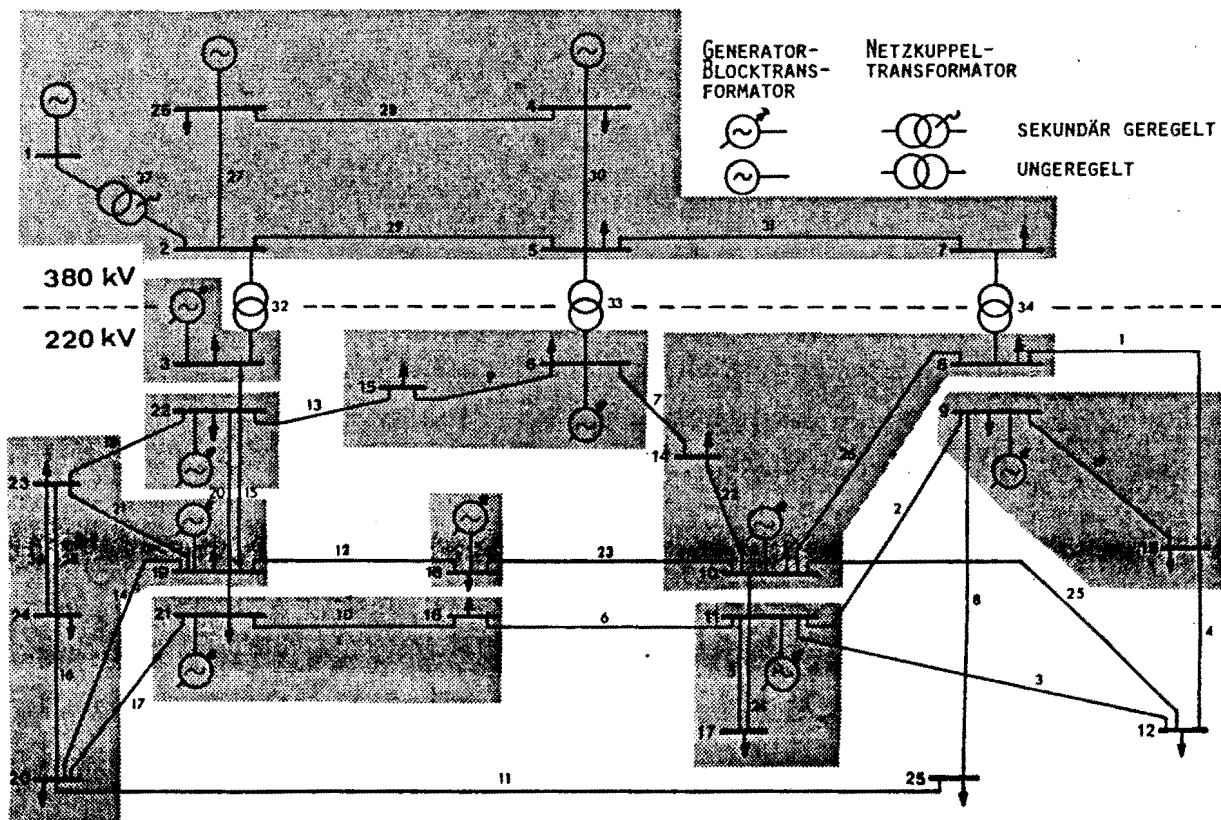
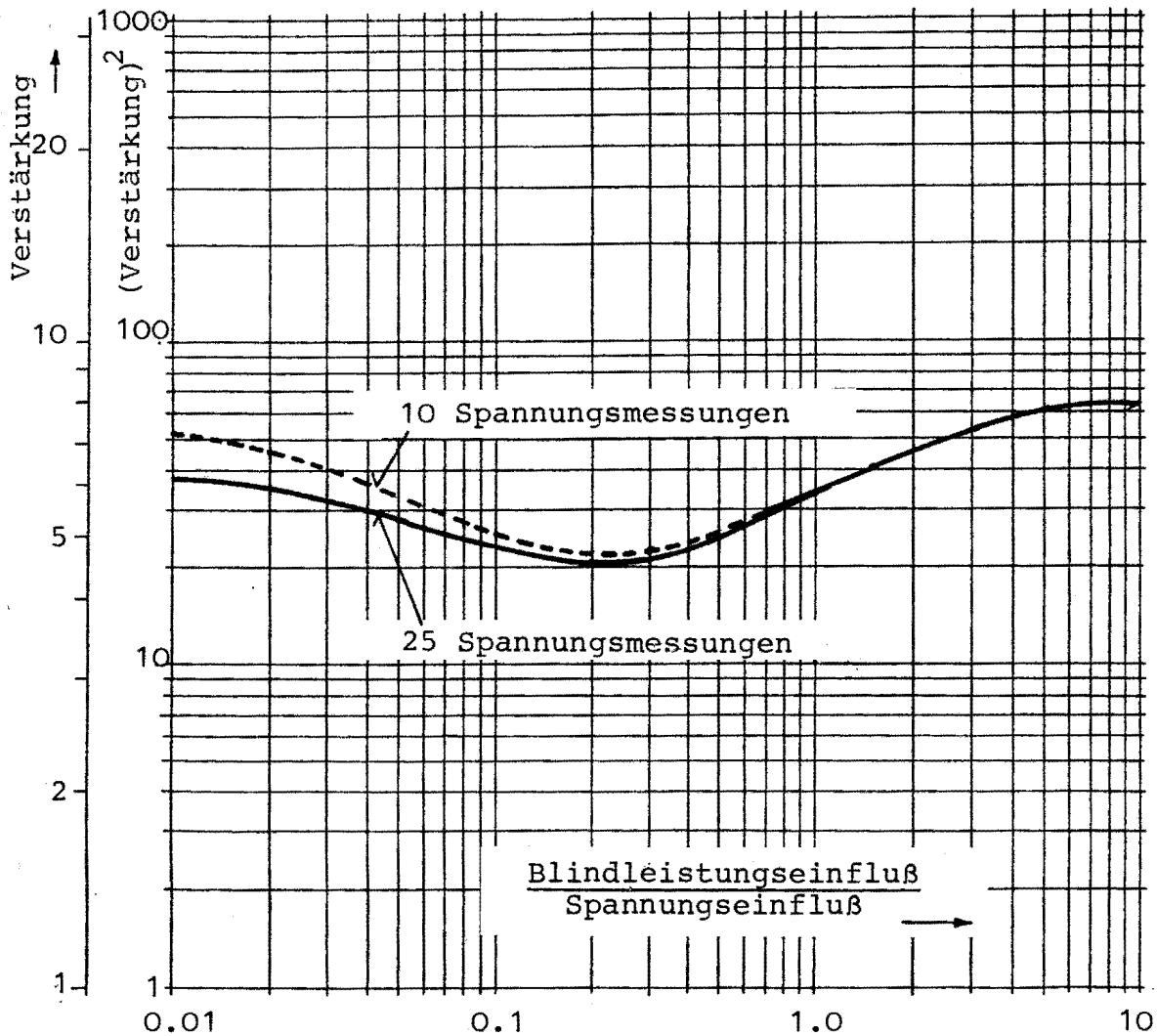


Bild 22: Gebiete, in denen von dem jeweiligen Generator das Spannungsniveau beeinflusst wird

Bei Anwendung der Blindleistungsregelung mit dem Ziel der Gleichverteilung der Blindleistung auf die eingesetzten Generatoren ist es notwendig, die Blindleistungssollwerte so vorzugeben, daß sich auch die gewünschte Spannung im Netz einstellt. Hierbei können regional unterschiedliche Spannungen nur schwer ausgeglichen werden. Die gleichzeitige Berücksichtigung von Spannungsabweichungen und Blindleistungsabweichungen ergibt dagegen eine relativ gute Anpassung an beide Regelungsziele.



**Bild 23:** Verstärkungsfaktoren zur Bestimmung der Stellgröße in Abhängigkeit der Berücksichtigung der Blindleistungseinspeisung zur Knotenspannung

Der redundante Satz von Meßwerten kann weiterhin bewirken, daß kleinere Verstärkungsfaktoren bei der Berechnung der Stellgrößen aus den Meßwerten auftreten, d.h. daß sich die statistischen Fehler schwächer bemerkbar machen. In Bild 23 beschreibt der Faktor  $k_{GE}$  den Einfluß der Spannung relativ zur Blindleistungsverteilung. Einmal kann bei annähernd gleichen Verstärkungsfaktoren sowohl eine Spannungs- wie auch Blindleistungsregelung durchgeführt werden. Erst die richtige Parameterwahl führt zur Nutzung der Redundanz und zum Minimum der Verstärkungsfaktorkurve. Die vergrößerte Anzahl von Spannungsmessungen (bei der durchgezogenen Linie wurden alle Spannungen im Netz gemessen) bringt dagegen nur einen minimalen

Einfluß auf die Verkleinerung der Verstärkungsfaktoren (bei der gestrichelten Linie wurden nur die Spannungen an den Generator-knoten gemessen), der sich abschwächt, wenn mehr Gewicht auf die Blindleistungseinspeisungen verlagert wird.

H.H. Graf

### 3.2.5 Entwurf eines robusten Spannungsreglers für Synchrongeneratoren

In letzter Zeit traten bei großen Kraftwerksblöcken mit hohen Übertragungsentfernungen die Probleme der Instabilitäten auf, die sich in Form von länger anhaltenden oder sich aufschaukelnden Polradpendelungen bemerkbar machten. Um diese Schwierigkeiten zu beseitigen und stabilen Betrieb zu gewährleisten, wurde der Entwurf eines robusten Spannungsregelsystems durchgeführt. Durch die Berechnung der Realteile der Systemeigenwerte kann das Dämpfungsverhalten des Generators bestimmt werden. Die Imaginärteile ergeben die Schwingungsfrequenz. Der Regler muß sowohl im normalen als auch im nicht normalen Betrieb des Generators die Spannung schnell und genau ausregeln und Polradpendelungen stark dämpfen. Unter "nicht normalem Betrieb" sind folgende Zustände zu verstehen:

- Betrieb bei minimaler Last
- Betrieb bei hoher externer Impedanz
- Betrieb bei schwacher Erregung

Bei der Reglersynthese sind alle praktisch meßbaren Zustandsgrößen zurückgeführt worden. Das Zustandsmodell wurde auf der Grundlage des Generatormodells nach Zollenkopf aufgestellt. Die Rückführungsparameter sollen so bestimmt werden, daß die Eigenwerte des geschlossenen Regelkreises für jeden betrachteten Fall in einem vorgegebenen Gebiet der Eigenwertebene liegen. Während einige der Parameter als Konstante eingesetzt werden, ergeben sich die restlichen freien Parameter aus dem Entwurf. Da das System auf Steuerungsnormalform transformiert wurde, ist ein Steuerbarkeitstest notwendig. Durch den Zusammenhang zwi-

schen den Koeffizienten des charakteristischen Polynoms und der Systemmatrix in Steuerungsnormalform können beliebige Anforderungen an das Systemverhalten - z.B. bestimmte Dämpfungsverhältnisse - erfüllt und die entsprechenden Rückführungsparameter ermittelt werden. Die Schnittmenge der Rückführungsparameterbereiche, die sich für die einzelnen Betriebsfälle ergeben, bildet den zulässigen Parameterbereich. In der Modellstruktur sind die Spannungs- und Turbinenregelung als Verzögerungsglieder erster Ordnung vereinfacht dargestellt. Die Untersuchungen wurden sowohl mit als auch ohne Berücksichtigung der Turbinenregelung unter Variation wichtiger Systemparameter durchgeführt.

Yim, Han-Suck

### 3.2.6 Modellierung der Spannungs- und Frequenzabhängigkeit von Verbrauchergruppen

Im vorliegenden Berichtszeitraum wurden im wesentlichen drei Arbeiten zu diesem Themenbereich durchgeführt:

- Untersuchung des spannungs- und frequenzabhängigen Lastverhaltens von reinen Wohngebietslasten
- Entwicklung einer Methode zur Untersuchung der Empfindlichkeit der Lastcharakteristik bezüglich Variationen der Lastzusammensetzung
- Entwicklung einer schnellen digitalen Präzisionsmeßeinrichtung zur Leistungs-, Spannungs- und Frequenzmessung

Das allen Arbeiten zugrunde gelegte mathematische Modell wurde aus dem Exponentialansatz

$$P = P_0 \left(\frac{U}{U_0}\right)^{p_u} \left(\frac{f}{f_0}\right)^{p_f} \quad ; \quad Q = Q_0 \left(\frac{U}{U_0}\right)^{q_u} \left(\frac{f}{f_0}\right)^{q_f}$$

durch Linearisierung im Arbeitspunkt abgeleitet und um einen Term, der die Beschleunigungsleistung der Verbraucher mit rotierenden Massen bei Frequenzänderung beschreibt, erweitert:

$$\frac{\Delta P}{P_0} = p_u \frac{\Delta U}{U_0} + (T_p s + p_f) \frac{\Delta f}{f_0}$$
$$\frac{\Delta Q}{Q_0} = q_u \frac{\Delta U}{U_0} + (T_q s + q_f) \frac{\Delta f}{f_0}$$

Die Inanspruchnahme elektrischer Energie durch die Verbraucher unterliegt tageszeitlichen Schwankungen. Dieses Verhalten ist nicht nur in der sich verändernden Belastungshöhe zu beobachten, sondern auch in der sich ändernden Reaktionen der Last auf Spannungs- und Frequenzänderungen. Die Methode der linearen Lastmodellierung gestattet es, aus der Kenntnis der Netzparameter des Verteilnetzes und des U-f-Verhaltens der Knoten-Wirk- und Blindlasten auf analytischem Wege ein Modell für das Lastverhalten einer Verbrauchergruppe zu bestimmen, wie es sich an der Einspeisung aus dem Hochspannungsnetz zeigt.

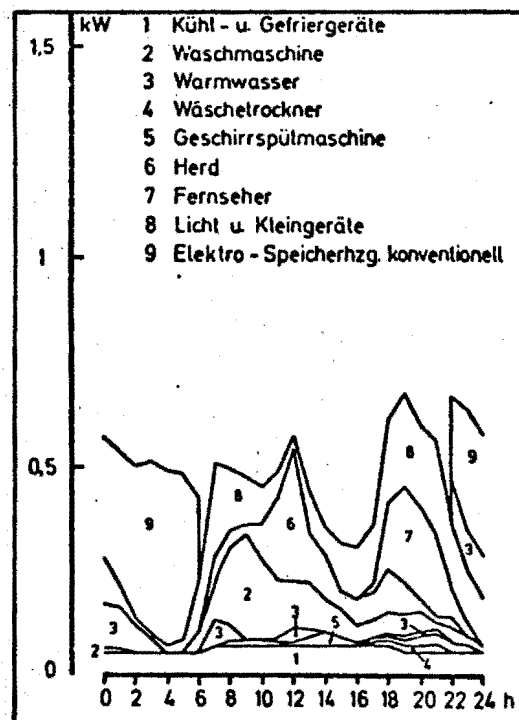


Bild 24: Typischer Tagesgang eines privaten Haushaltes mit Nachtspeicherheizung an einem Winterwerktag, aufgeschlüsselt nach den verschiedenen Haushaltsgeräten

Grundlage dieser Untersuchung ist die aus der Analyse vieler privater Haushalte statistisch ermittelte Tagesbelastungskurve

(Bild 24) an einem Normalarbeitstag im Winter 1975, wobei eine Aufschlüsselung nach den unterschiedlichen Haushaltsgeräten erfolgte. (Diese Kurve wurde der Literatur entnommen). Durch Einsetzen der U-f-Abhängigkeit dieser Geräte kann der Tagesgang der Lastcharakteristik dieser Haushaltslast berechnet werden (Bild 25), wie er sich um Beispiel am Ortsnetztransformator eines Wohngebietes zeigt. Die Spannungsabhängigkeit der Wirklast liegt zwischen  $p_u = 1$  und 2 (und kann folglich nicht durch einen ohmschen Widerstand mit  $p_u = 2$  ersetzt werden). Bei der Spannungsabhängigkeit der Blindlast mit Werten zwischen 2 und 3.3 zeigt sich deutlich der Einfluß der Magnetisierungskennlinie der Eisenkerne von Antriebsmotoren und Drosselspulen.

Für ein 10 kV- Mittelspannungsverteilnetz, das ausschließlich derartige Wohngebietslasten versorgt, läßt sich die U-f-Charakteristik der Leistungsaufnahme aus dem überlagerten Hochspannungsnetz rechnerisch ermitteln. Für die U-f-Abhängigkeit der Wirklast ergeben sich gegenüber den Niederspannungslasten nur unwesentliche Veränderungen. Dagegen wird die Blindlastcharakteristik deutlich verändert. Bild 26 zeigt diesen Effekt, der im wesentlichen durch den Blindleistungsbedarf der 10 kV-Betriebsmittel zu erklären ist.

Das hier beschriebene Verfahren zur Ermittlung der Lastcharakteristik von Verbrauchergruppen setzt die Kenntnis der Lastzusammensetzung voraus, die aufgrund der Vielzahl der Verbraucher niemals genau ermittelt werden kann. Die benötigten Daten sind folglich mit einer gewissen Unsicherheit behaftet, die sich auch in den Lastmodellparametern der 10 kV-Last niederschlägt. Beschreibt man die Unsicherheit in den Parametern der Haushaltslasten durch voneinander unabhängige Normalverteilungen, so ergibt sich bereits durch die einfache Aufsummierung der Knotenlasten des 10 kV-Netzes für die Gesamtlast eine Reduktion der auf den Erwartungswert bezogenen Streuung. Es konnte im Rahmen einer Studienarbeit gezeigt werden, daß diese Reduktion durch den Einfluß des Netzes in der Regel noch weiter verstärkt wird. Als Konsequenz hieraus zeigt sich, daß Unsicherheiten



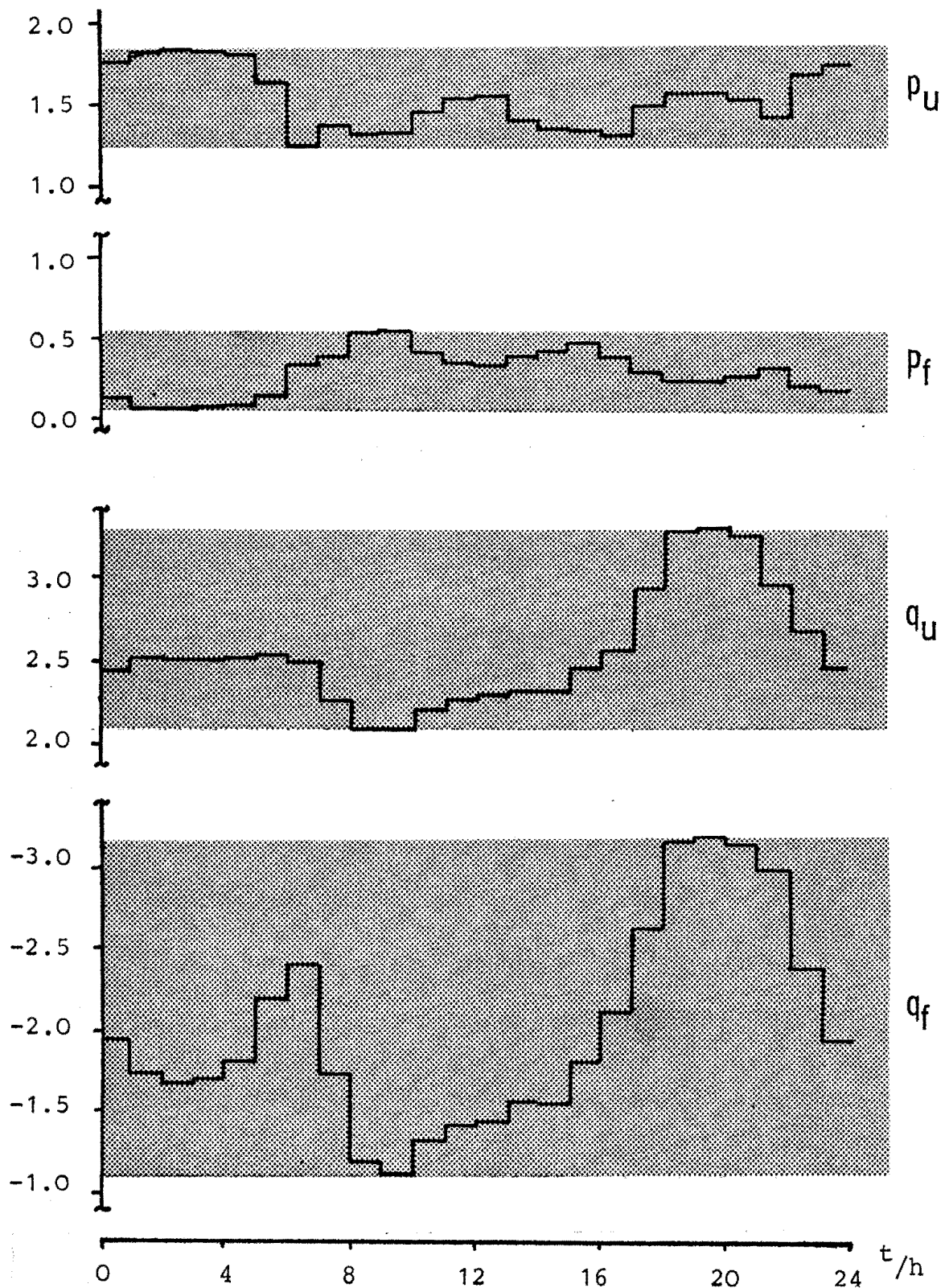


Bild 25: Tagesgang der U-f-Charakteristik der Last eines 10/0.4 kV-Ortsnetztransformators, die ausschließlich aus privaten Haushalten mit dem oben dargestellten Lastgang besteht

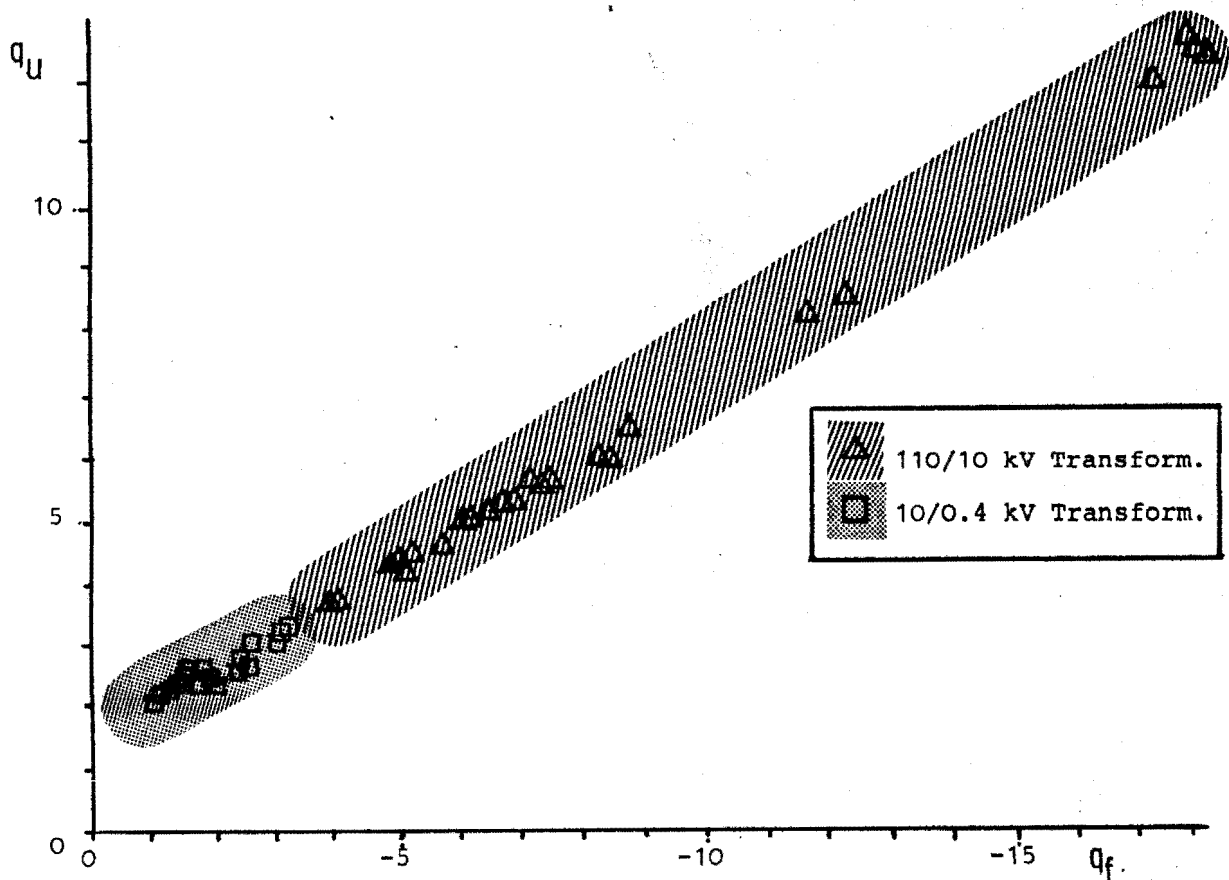


Bild 26: Variationsbereich der Blindlastcharakteristik einer ausschließlich aus privaten Haushalten bestehenden Verbrauchergruppe an unterschiedlichen Knoten des 10 kV-Verteilnetzes, aufgetragen für einen Winterwerktag

bezüglich der Kenntnis der Lastzusammensetzung in Kauf genommen werden können und keineswegs zu unbrauchbaren (weil zu ungenauen) Modellen führen.

Um die hier beschriebenen, rein theoretischen Ergebnisse abzusichern, sind im kommenden Jahr Messungen in mehreren Netzen geplant. Für diese Messungen wurde eine portable digitale Meßeinrichtung entwickelt, die unter Einsatz eines neuen Meßprinzips eine schnelle Präzisionsmessung des Spannungseffektivwertes, der Frequenz sowie von Wirk- und Blindleistung durchführt. Da keine Meßumformer - deren Einschwingzeit im Bereich von 0.3s bis 1s liegen - verwendet werden, können dynamische Vorgänge im

Bereich von 0 bis 20 Hz vor Ort aufgezeichnet und an zentraler Stelle ausgewertet werden. Im Störschreiberbetrieb können bis zu 18 Ereignisse auf einer Diskette gespeichert werden.

Th. Reißing

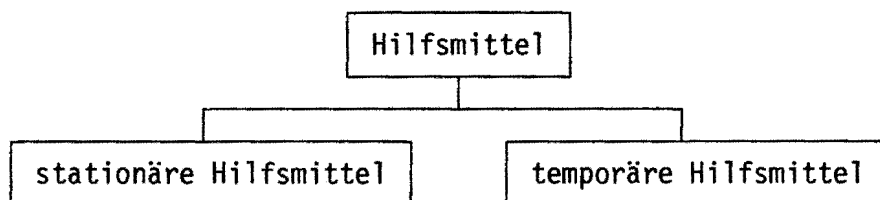
Berichte: EV 8403, EV 8417

### 3.3 Schutz- und Leittechnik

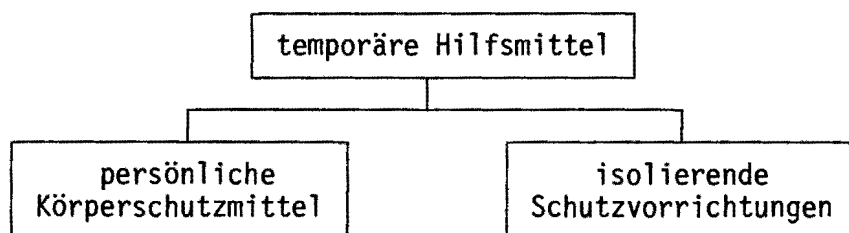
#### 3.3.1 Arbeitsschutz in elektrischen Anlagen

Das Forschungsprojekt "Berührungsschutz für die Arbeit in Niederspannungsverteilungs- und Verbraucheranlagen" dient der Untersuchung vorhandener temporärer und stationärer Hilfsmittel. Diese Hilfsmittel werden aus der Sicht des Benutzers sowie unter Berücksichtigung der vorgefundenen Randbedingungen im Hinblick auf Arbeiten in der Nähe spannungsführender Teile bewertet.

Die angebotenen Hilfsmittel zur Vermeidung und zum Schutz vor Störlichtbögen sowie von Körperdurchströmungen lassen sich in zwei Gruppen aufteilen. So stellte sich im Verlauf der Untersuchung folgende Aufteilung als zweckmäßig heraus:



Eine weitere Unterteilung ist bei den temporären Hilfsmitteln sinnvoll:



In verschiedenen Industrie- und Energieversorgungsunternehmen wurden Einsatz und Einsatzmöglichkeiten der Hilfsmittel stu-

diert. Es stellte sich heraus, daß folgende temporäre Hilfsmittel für das Arbeiten in der Nähe unter Spannung stehender Teile benutzt werden:

- Arbeitsanzug
- Gummihandschuhe
- Helm mit Gesichtsschutz
- NH-Sicherungsgriff mit Stulpe
- Standortisolierung (Isoliermatten, Sicherheitsschuhe)
- Abdecktücher mit Klammern
- Tüllen
- Freileitungsabdeckungen

Folgende Hilfsmittel werden selten eingesetzt:

- isolierender Schutzanzug
- Rumpfschutz
- Formteile
- Abdecktücher mit vorgefertigten Aufhängevorrichtungen
- Faltabdeckungen und Abdeckplatten

Folgende stationäre Hilfsmittel werden in Verteilanlagen eingesetzt:

- Formteile (ortsfest)
- Trennstege
- Sammelschienenabdeckungen
- flexible Abdeckschläuche
- Schrumpfschlauch
- Abdeckplatten

Die bei den Untersuchungen erzielten Ergebnisse führen zu einer Normierung der Hilfsmittel und Anlagen. Weitere Ansatzpunkte ergeben sich für die technischen und gestalterischen Möglichkeiten bei der Planung von Verteiler- und Verbraucheranlagen, die dem Personen- und Anlagenschutz dienen. Es wurden Forderungen für das Arbeiten in der Nähe unter Spannung stehender Teile entwickelt, die den Einsatz der Hilfsmittel erleichtern.

Die Forderungen richten sich:

- an die Ausbildung und Unterweisung des Personals
- an die konstruktiven Maßnahmen, die den Einsatz der Hilfsmittel ermöglichen
- an die Gestaltung und den Aufbau von Niederspannungsanlagen.

W. Horenkamp, J.-G. Tebbe, K.-D. Tesch

Bericht: EV 8429

### 3.3.2 Untersuchung der elektrischen Vorgänge bei einem Erdschluß im Mittelspannungsnetz des deutschen Steinkohlebergbaus

Dieses vom BMFT geförderte Forschungsvorhaben wird bis Ende 1984 abgeschlossen sein. Im Jahr 1984 wurden folgende Teiluntersuchungen durchgeführt:

- a) Grundsätzliche Untersuchung verschiedener Sternpunktbehandlungen.
- b) Ermittlung der kritischen Höhe des Fehlerstroms.
- c) Entwicklung eines Schutzgeräte-Konfigurators zur selektiven Erdschlußabschaltung.
- d) Untersuchung des Einflusses des Spannungsabfalls in den Leitungen auf die Höhe des Reststromes am Fehlerort.
- e) Konzeption eines Schutzkriteriums für vermaschte Netze.
- f) Untersuchungen über die Anwendbarkeit und die Einsatzmöglichkeiten des Querdifferenzschutzprinzips.

Im Januar 1985 wird über die Ergebnisse des gesamten Forschungsvorhabens ein Schlußbericht veröffentlicht.

R. Woltemate, M. Gacka

### 3.3.3 Automatische Bestückung eines induktiv geerdeten Netzes mit Erdschlußfassungsgaräten

Am Lehrstuhl für elektrische Energieversorgung wird seit einigen Jahren ein Forschungsvorhaben durchgeführt, dessen Ziel es ist, die selektive Erdschlußfassung mit automatischer Abschaltung in den induktiv geerdeten Kabelnetzen Untertage zu verbessern.

Aus diesem Grund wurde ein Programm entwickelt, das für ein solches Netz eine optimale Bestückung mit Erdschlußfassungsgaräten durchführt und die erforderlichen Einstelldaten ermittelt. Die eingesetzten Geräte müssen in der Lage sein, die Richtung eines Erdschlusses zu erkennen und eine einstellbare Verzögerungszeit besitzen.

Ein allgemeines fehlerhaftes Netz besteht aus einer Fehlerstelle, mehreren Kompensationsspulen und den Netzwerkelementen (Kabel, Freileitungen), die beliebig geführt sein können. Für die Betrachtung von Erdschlüssen können Transformatoren, deren Sternpunkte nicht beide geerdet sind, als Grenze des fehlerhaften Netzes angesehen werden. Die Aufgabe des Netzschutzes besteht darin, das gegebene Netz so in zwei Teile zu zerschneiden, daß der Fehler in dem einen, die Einspeisungen mit den Kompensationsspulen in dem anderen Netzteil liegen. Um zu erkennen, ob der Fehler innerhalb oder außerhalb des überwachten Netzbezirkes liegt, mißt man die Nullströme an den Schnittstellen. Aus der Summe aller Nullströme kann die Fehlerrichtung bestimmt werden. Im Idealfall wird der Fehlerort von mehreren konzentrischen Schutzringen umgeben, die zeitlich gestaffelt sind, so daß ein Reserveschutz gegeben ist. Da die Meßstellen in einem allgemeinen Netz oft weit auseinander liegen, kann ein solches Konzept nur mit großem Aufwand realisiert werden. Die Untertagenetze des Bergbaus weisen jedoch Strukturen auf, die diesem Konzept entgegenkommen:

- es gibt nur eine Einspeisung mit einer Löserspule
- die Netze sind strahlenförmig gebaut.

Um kostspielige und störanfällige Übertragungseinrichtungen zu vermeiden, werden nur solche Netzbezirke geschützt, die lediglich über einen Knoten mit dem restlichen Netz verbunden sind, d.h. die erforderlichen Daten können an einem Ort erfaßt und ausgewertet werden.

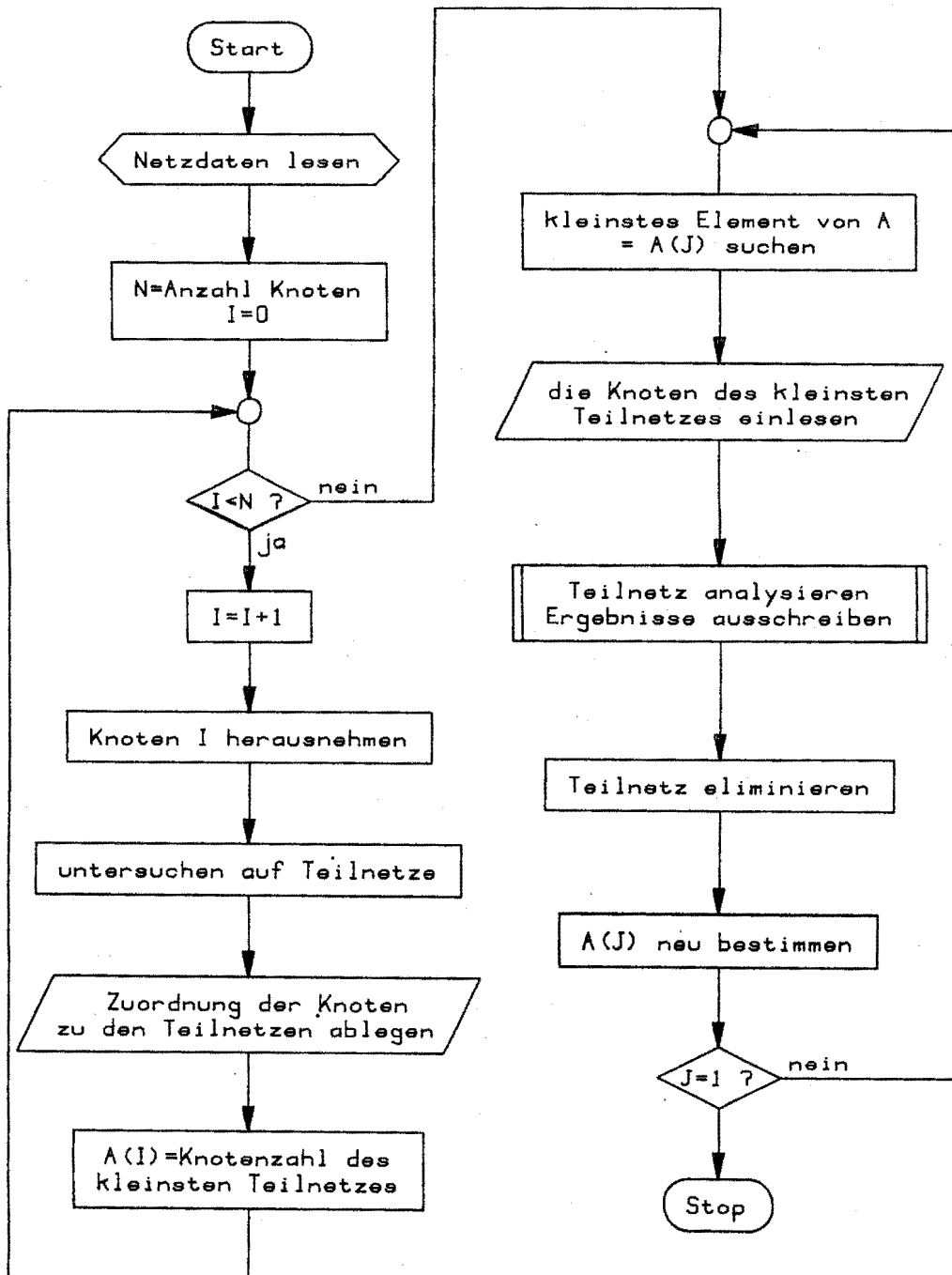


Bild 27: Ablaufdiagramm des Programms zur optimalen Bestückung eines Netzes mit Erdschlußfassungsgerten



Das Programm geht daher wie im folgenden beschrieben vor (Bild 27). Die Knoten des Netzes werden nacheinander herausgenommen und es wird überprüft, ob Teilnetze entstehen, die keine Verbindung zur Einspeisung haben. Anschließend werden die Teilnetze, beginnend mit dem kleinsten, untersucht und in drei Gruppen eingeteilt:

- Stichleitungen
- Ringe (einschließlich Parallelstrecken)
- vermaschte Netzteile

Bei Stichleitungen wird das Verhältnis der Erdkapazität des geschützten Kabels zur Kapazität des restlichen Netzes berechnet, so daß ein Anhaltspunkt gegeben ist, ob z.B. amplitudenabhängige Geräte eingesetzt werden können und wie groß der einzustellende Ansprechwert sein muß. Bei Ringen einschließlich Parallelstrecken wird der Einsatz des Querdifferenzschutzprinzips, wie er schon in früheren Jahresberichten von M. Gacka beschrieben wurde, vorgeschlagen.

Ist der Einsatz von Erdschlußerfassungsgeräten vorgesehen, die die Phasenlage des Nullstromes auswerten, so können in den Ring auch kurze Stichleitungen und kleinere vermaschte Netzteile angeschlossen sein, falls sie nur über einen Knoten mit dem Ring verbunden sind. Diese angeschlossenen Netzteile und Stichkabel liefern im allgemeinen einen reinen Blindstrom, der das Querdifferenzschutzprinzip dann nicht beeinträchtigt, wenn nur der Realteil des Nullstromes für die Fehlererfassung genutzt wird.

Zur Überwachung vermaschter Netzteile muß die Summe aus den Nullströmen aller Kabel gebildet werden, die den zu überwachten Netzteil speisen. Im Fehlerfall wird das gesamte Teilnetz abgeschaltet, falls keine untergeordneten Geräte ansprechen.

Nachdem die Untersuchung eines Teilnetzes abgeschlossen ist, wird die zugehörige Zeitstufe ermittelt, die Knoten und Leitungen eliminiert und durch eine Ersatzkapazität ersetzt.

Damit ist gewährleistet, daß das Netz, beginnend mit den letzten Stichleitungen, schrittweise in Richtung Einspeisung aufgearbeitet wird.

R. Woltemate

### 3.3.4 Messung der symmetrischen Komponenten mit Hilfe eines Mikroprozessors

Die schnelle Erfassung und Verarbeitung elektrischer Größen ist insbesondere in der Schutztechnik von großer Bedeutung. Diese Aufgaben lassen sich vorteilhaft mit Hilfe dezentral eingesetzter Mikrorechner lösen.

Auf der Basis der Analogtechnik lassen sich verschiedene Filter der symmetrischen Komponenten aufbauen. Die Ausgangssignale solcher Filter könnte man digitalisieren und weiter mit der Digitaltechnik verarbeiten. Diese Lösung ist unbefriedigend, da man viel größere Universalität eines Erfassungsgerätes erzielen könnte, in dem man die Phasengrößen digitalisiert und erst dann rechnerisch mit Hilfe eines Mikroprozessors in symmetrische Komponenten zerlegt. So kann man auf einfache Weise (Modifizierung des Programms) z.B. nur die Komponenten berechnen, die benötigt werden und mit verschiedenen logischen Funktionen weiter verknüpfen. So kann z.B. ein Signal ausgelöst werden, wenn eine Komponente einen definierten Pegel überschreitet. Es ist sehr einfach die Nullkomponente einer elektrischen Größe zu bilden. Summiert man nämlich die digitalisierten Momentanwerte der Phasengrößen, so erhält man sofort die Momentanwerte der Nullkomponente. Die Beziehung

$$3G_0 = G_A + G_B + G_C \quad (1)$$

gilt sowohl für komplexe Größen, wie auch für reelle Momentanwerte.

Anders stellt sich das Problem für die Mit- und Gegenkomponente dar. Die Transformationsvorschrift für die Mitkomponente

$$3\bar{G}_1 = \bar{G}_A + a\bar{G}_B + a^2\bar{G}_C \quad (2)$$

beinhaltet den komplexen Faktor  $a = e^{j120^\circ}$  und gilt im Sinne von Fortescue nur für komplexe Phasengrößen. Physikalisch lassen sich nur die reellen Momentanwerte erfassen. Würde man die Werte  $g_A$  mit  $a \cdot g_B$  und  $a^2 \cdot g_C$  addieren, so würden s.g. "symmetrische Momentanwerte" errechnet werden, die eine völlig andere physikalische Bedeutung haben als die symmetrischen Komponenten von Fortescue. Für die Bewältigung dieses Problems wurde folgender Weg eingeschlagen:

- Die reellen Momentanwerte müssen um den Imaginärteil ergänzt werden. Es gilt:

$$\text{Im } \bar{g} = \sqrt{\hat{G}^2 - (\text{Re } \bar{g})^2}$$

$\text{Re } \bar{g} = g$  ist der gemessene reelle Momentanwert.  $\hat{G}$  ist die Amplitude (Maximum der Menge "g")

- Aus den so gewonnenen komplexen Momentanwerten  $\bar{g} = g + j\text{Im } \bar{g}$  werden nach Vorschrift (2) die komplexen Momentanwerte der Mitkomponente  $\bar{g}_1$  errechnet.
- Die Realteile der  $\bar{g}_1$  - Werte sind die Momentanwerte der Mitkomponente.

So lassen sich weiter auch die Amplitude und die Phasenlage der Mittelkomponente gegenüber einer gewählten Referenzgröße einfach bestimmen. Das gleiche gilt für die Gegenkomponente, man muß nur die Transformationsvorschrift (2) durch die für die Gegenkomponente gültige ersetzen. Nach diesem Prinzip wurde ein Gerät auf der Basis eines Einplatinenrechners gebaut und erprobt. Es soll weiter ausgebaut werden für die Realisierung verschiedener Schutzfunktionen.

M. Gacka

Bericht: EV 8407

### 3.3.5 Netzurückwirkungen durch Oberwellen

Mit dem Einsatz der nichtlinearen Elemente der Leistungselektronik wird das speisende Netz zusätzlich durch erhöhte Blindleistung und durch Oberwellen belastet. Die Betriebsmittel der Leistungselektronik enthalten unabhängig davon, ob sie einen Gleichstrom- oder einen Drehstromantrieb speisen, im allgemeinen auf der Netzspannungsseite eine Phasenanschnittsteuerung. Die periodischen, mit der Grundfrequenz synchronen Schaltvorgänge erzeugen dabei Oberschwingungen, deren Frequenz im Idealfall ein ganzzahliges, von der Pulszahl des Stromrichters abhängiges Vielfaches der Grundfrequenz des Netzes ist.

Um ein schnelles, für die Praxis hinreichend genaues mathematisches Modell zu finden, werden folgende Voraussetzungen gemacht:

- das System befindet sich im stationären Zustand
- das Spektrum des Oberwellenstroms des Stromrichters ist aus einer Fourieranalyse bekannt
- zunächst wird nur 1 Oberwellenerzeuger im Netz angenommen. Bei mehreren Einspeisungen wird das Ergebnis durch Superposition abgeleitet
- alle Betriebsmittel im Netz sind symmetrisch, das Netz wird symmetrisch durch Oberwellen belastet
- alle Berechnungen werden reell durchgeführt

Mit diesen Voraussetzungen und der linearen Modellierung aller Netzelemente, Einspeisungen und Lasten durch Impedanzen bzw. Admittanzen erhält man ein passives Netzwerk (Bild 28).

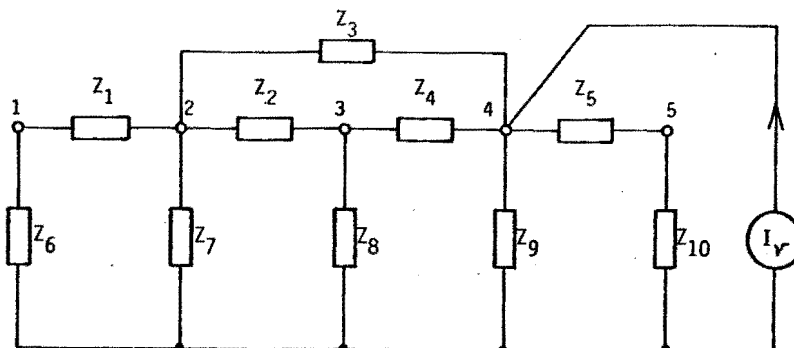


Bild 28: Beispiel 5-knotiges Netz

Dabei werden die Betriebsmittel wie folgt nachgebildet:

Leitungen und Kabel: Die Elemente des  $\Pi$ -Ersatzschaltbildes werden durch die Lösung der Leitungsgleichungen bestimmt.

Transformatoren:  $\Pi$ -Ersatzschaltbild

Rotierende Lasten und Generatoren: Kurzschlußadmittanz

Übrige Lasten: Admittanz im Nennbetrieb

Netze: Netzimpedanz

Der eingespeiste Oberwellenstrom hat die Eigenschaften eines eingepprägten Stroms und wird daher als ideale Stromquelle nachgebildet. Damit sind alle Vorbedingungen erfüllt, um mit dem Ansatz der Knotenpotentialanalyse

$$\underline{\bar{I}}_v = \underline{\bar{Y}}_v \cdot \underline{\bar{U}}_v$$

die komplexe Oberwellenspannung für jede Ordnungszahl an jedem Netzknoten zu bestimmen.

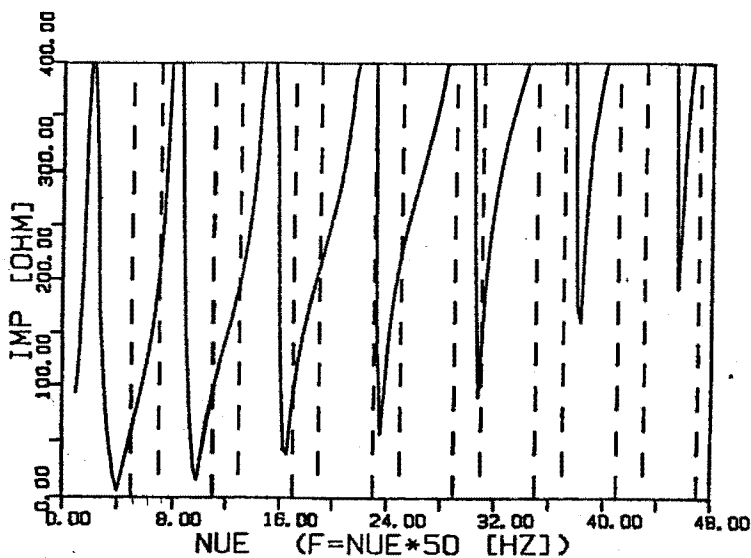


Bild 29: Netzimpedanz ohne Filter

Das Oberwellenprogramm bietet zunächst die Möglichkeit, interaktiv Netzdateien zu generieren oder bestehende Dateien für das Programm aufzubereiten. Da die Netzdaten mit Parameterunsicherheiten verbunden sind, die gerade an Resonanzstellen kritisch

sind, wird für die allgemeine Berechnung der Oberwellenausbreitung der Oberwellenstrom im gesamten Frequenzbereich konstant angenommen. Die komplexen Netzimpedanzen und Knotenspannungen werden für die spätere Auswertung in einer Ergebnisdatei abgelegt. In der Planung einer Anlage mit starker Oberwellenbelastung ist zunächst der Verlauf der Netzimpedanz von Interesse, der zum Beispiel für ein 4-knotiges Strahlennetz im Bild 29 dargestellt ist.

Da im Bild 29 die Netzimpedanz für die 5. Oberwelle relativ groß ist und die Netzimpedanz im Bereich der 5. Oberwelle eine große Steigung aufweist, soll die 5. Oberwelle durch ein Filter kompensiert werden.

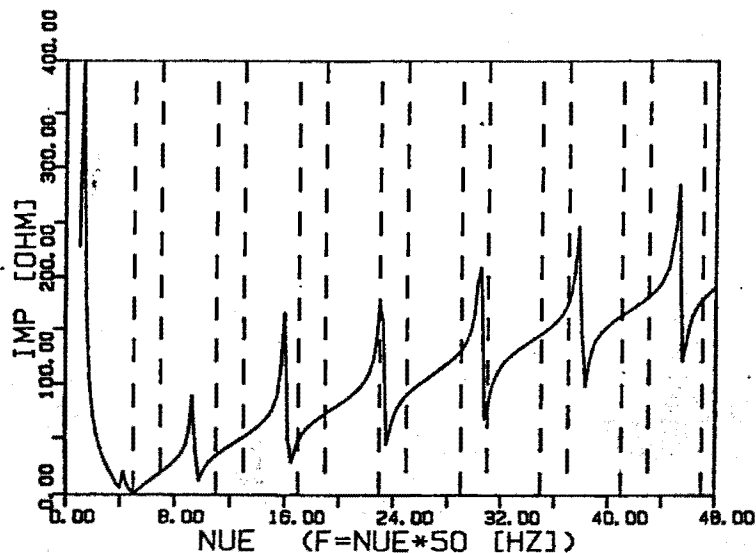


Bild 30: Netzimpedanz mit Filter

Das Bild 30 zeigt, daß nicht nur die 5. Oberwelle kurzgeschlossen ist, sondern das gesamte Dämpfungsverhalten des Netzes verbessert wurde. Zusätzlich kann durch eine geeignete Dimensionierung des Filterkreises eine statische Blindleistungskompensation erreicht werden.

Für weitere Auswertungen der Oberwellenberechnung wurden selbständige Zusatzprogramme erstellt:

- tabellarischer Ausdruck der Netzimpedanz oder einzelner Knotenspannungen im Frequenzbereich
- Vergleich zweier Ergebnisse
- Berechnung von Effektivwerten und Klirrfaktoren aller Knotenspannungen bei vorgegebenem Spektrum des Oberwellenstroms
- Darstellung der Netzimpedanz nach Betrag und Phase im Frequenzbereich
- Darstellung beliebiger Knotenspannungen nach Betrag und Phase im Frequenzbereich bei konstantem oder beliebig vorgegebenem Spektrum des Oberwellenstroms.

Damit sind die Möglichkeiten der Auswertungsverfahren noch längst nicht erschöpft, und weitere Verfahren sind bereits in der Programmierung.

P. Stöber

#### 4. VORTRÄGE

##### 4.1 Beiträge für das Kolloquium

- 10.04.1984 Prof. Dr. Pundt, TU Dresden  
"Planungs- und Betriebsprobleme von Hochspannungsnetzen im Hinblick auf die Sternpunktterdung"
- 29.05.1984 Dr.-Ing. H.H. Graf, Universität Dortmund  
"Einfluß einer sekundären Spannungs- Blindleistungsregelung auf das Verhalten elektrischer Energieversorgungsnetze"
- 24.10.1984 Dipl.-Ing. Feher, Budapest  
"Arbeiten unter Spannung in Ungarn"
- 07.11.1984 Dipl.-Ing. Stolte, Bad Homburg  
"Entwicklung, Stand und Aussichten der Bahn-  
elektrifizierung auf dem Erdball"
- 27.11.1984 Dipl.-Ing. Labohm, VEW Dortmund  
"Synthetische Belastungsermittlung von Betriebsmitteln im Nieder- und Mittelspannungsnetz"

##### 4.2 Vorträge von Lehrstuhlmitgliedern

- 29.03.1984 E. Handschin und A. Ramusch  
"Grundsatzfragen der Energieverteilung",  
Aussprachetag der FGH in Mannheim
- 11.05.1984 E. Handschin und W. Brandes  
"Einführungsvortrag über Dynamik-Modelle"  
AK-TR Forum "Netzdynamik" in Dortmund



- 26.05.1984 E. Handschin  
"Einsatz von Arbeitsplatzcomputern in der elektrischen Energieversorgung",  
VDE-Seminar "Einsatz von Arbeitsplatzcomputern in der Technik", Universität Dortmund
- 26.05.1984 Th. Reißing  
"Berechnung des elektrischen Leistungsbedarfs für industrielle Großabnehmer",  
VDE-Seminar "Einsatz von Arbeitsplatzcomputern in der Technik", Universität Dortmund
- 21.08.1984 Th. Reißing  
"Parallel Processing for Transient Stability Analysis", 8th PSCC, Helsinki
- 18.09.1984 D. König  
"Dynamische Simulation technischer Systeme mit einem Arbeitsplatzcomputer", IBM-Forum für Wissenschaft und Verwaltung, Göttingen
- 06.11.1984 H.S. Yim  
"Entwurf einer robusten Spannungsregelung", Universität Dortmund
- 27.11.1984 K. El-Homsi  
"State Estimation", Universität Dortmund
- 18.12.1984 D. König  
"Dynamische Simulation mit einem Arbeitsplatzcomputer", Universität Dortmund

5. NATIONALE UND INTERNATIONALE BEZIEHUNGEN

- 13.01.1984 E. Handschin, Th. Reißing, P. Stöber  
Besprechung mit Herrn Meiselbach und Herrn Hünefeld, beide von der Westfälischen Berggewerkschaftskasse Bochum, über Oberwellenausbreitung in Untertagenetzen
- 25.01.1984 E. Handschin, Th. Reißing  
Besprechung mit Herrn Dr. Heilemann, EVS, über Lastmodellierung, in Dortmund
- 27.01.1984 E. Handschin  
Kontaktgespräch zwischen der Universität Dortmund und dem Vorstand der Hoesch Hüttenwerke AG, Dortmund
- 01.02. - E. Handschin  
03.02.1984 Besuch der Technischen Hochschule Budapest (Prof. Dr. Geszti)
- 06.02.1984 Th. Reißing  
1. Sitzung der Arbeitsgruppe "Blindleistung" des GMR/ETG-Fachausschusses "Netzregelung" in Stuttgart
- 13.02.1984 E. Handschin, N. Aschöwer, Th. Reißing, J.-G. Tebbe  
Besprechung mit Herrn Dr. Freund und Mitarbeitern, Technische Werke Stuttgart, über knotenbezogene Lastprognose, in Stuttgart
- 15.02.1984 E. Handschin, M. Gacka, H. Maiweg  
Besprechung mit Herrn Danke, Calor Emag, über ein neues Prinzip zum Schutz von Parallelkabeln bei einpoligen Erdschlüssen

- 29.02.1984 E. Handschin  
Besprechung mit Herrn Freund, BAG Niederrhein,  
über Probleme bei der Erdschlußfassung im  
Steinkohlebergbau
- 14.03.1984 E. Handschin, Th. Reißing  
Besprechung mit Herrn Schmidt und Mitarbeitern,  
Hoesch, über Leistungsbedarfsprognose
- 21.03.1984 E. Handschin  
Sitzung des Arbeitskreises "Technisches Rechnen"  
der FGH in Brauweiler
- 29.03.1984 E. Handschin  
FGH-Aussprachetag "Rechnergestützte Betriebsfüh-  
rung" in Mannheim
- 30.03.1984 E. Handschin, D. König, Th. Reißing  
Präsentation des Simulationsprogrammes CSP beim  
RWE, Essen
- 03.04.1984 E. Handschin, R. Woltemate  
Besprechung mit Herrn Dr. Herms und Herrn  
Freund, Schachtanlage Lohberg
- 05.04.1984 D. König, Th. Reißing  
Besuch der Hannover-Messe
- 06.04.1984 E. Handschin  
Sitzung des Deutschen Arbeitskreises zum  
CIGRE-Studienkomitee SC-39
- 09.04.1984 W. Horenkamp, K.-D. Tesch  
Besuch der Hannover-Messe
- 10.04.1984 E. Handschin und Mitarbeiter  
Besuch von Herrn Prof. Pundt, TH Dresden, in  
Dortmund

- 11.04.1984 K.-D. Tesch  
Besuch des Vortrages von Herrn OI W. Kathrein,  
"Zweckmäßige Anordnung von Betriebsmitteln in  
Schaltanlagen" an der FH Dortmund
- 03.05.1984 E. Handschin, R. Woltemate  
Besprechung mit Herrn Dipl.-Ing. Freund, BAG  
Niederrhein, über transiente Erdschlußvorgänge
- 09.05.1984 E. Handschin  
Vorstands- und Beiratssitzung des VDE-Bezirks-  
vereins Rhein-Ruhr
- 11.05.1984 E. Handschin, Th. Reißing  
AK-TR-Forum "Netzdynamik" in Dortmund
- 17.05.1984 E. Handschin, P. Stöber  
Besprechung mit Herrn Christian, AEG-Telefunken,  
Frankfurt, über die Ausbildung und Forschung am  
Lehrstuhl EV
- 17.05.1984 Th. Reißing  
2. Sitzung der Arbeitsgruppe "Blindleistung" des  
GMR/ETG-Fachausschusses "Netzregelung" in  
Frankfurt
- 18.05.1984 E. Handschin  
Besprechung mit Herrn Kempny und Herrn  
Dr. Göttmann, Uhde Dortmund, über elektrische  
Energieversorgung
- 26.05.1984 E. Handschin und Mitarbeiter  
VDE-Seminar "Einsatz von Arbeitsplatzcomputern  
in der Technik", Universität Dortmund
- 27.05. - E. Handschin  
28.05.1984 Besichtigung der GROWIAN und der Firma Siemens  
Hamburg

- 13.06.1984 Th. Reißing  
Besprechung mit Herrn Hormann und Mitarbeitern,  
VEW, über Kabelbelastungsmessung im Mittel- und  
Niederspannungsnetz
- 14.06.1984 E. Handschin, Th. Reißing  
Besprechung mit Herrn Schmidt und Mitarbeitern,  
Hoesch, über Leistungsbedarfsprognose
- 15.06.1984 E. Handschin, M. Gacka, H. Maiweg  
Besprechung mit Herrn Danke und Herrn Kauders  
über ein neues Prinzip zum Schutz von Parallel-  
kabeln bei einpoligen Erdschlüssen
- 25.06.1984 E. Handschin, Th. Reißing, P. Stöber  
Besprechung mit Herrn Dir. Schmidt, Herrn Näser  
und Mitarbeitern, BEWAG, über Netzdynamik und  
Lastmodellierung
- 10.07.1984 E. Handschin und Mitarbeiter  
Besuch von Herrn Dr. Petroianu und Mitarbeitern,  
BBC Ladenburg, in Dortmund
- 12.07.1984 Th. Reißing  
3. Sitzung der Arbeitsgruppe "Blindleistung" des  
GMR/ETG-Fachausschusses "Netzregelung", in  
Frankfurt
- 31.07.1984 E. Handschin, M. Gacka, H. Maiweg  
Besprechung mit Herrn Danke, Calor Emag, über  
ein neues Prinzip zum Schutz von Parallelkabeln  
bei einpoligen Erdschlüssen
- 01.08.1984 E. Handschin  
Sitzung der VDE-Zweigstelle Dortmund bei der  
Firma AEG, Dortmund

- 03.08. - E. Handschin  
06.09.1984 Gastvorlesungen an der Qinghua Universität in  
Beijing, China
- 14.08.1984 M. Gacka, R. Woltemate  
Besprechung mit Herrn Danke, Calor Emag, und  
Herren vom TÜV Essen über die Möglichkeit einer  
neuen Sternpunktbehandlung im Bergbau
- 20.08.1984 P. Stöber  
Besprechung mit Herrn Dr. Koetzold und Herrn Dr.  
Brauner, AEG Frankfurt, über Netzdynamik und  
Netzurückwirkungen in Frankfurt
- 20.08. - Th. Reißing  
24.08.1984 Besuch der PSCC-Konferenz in Helsinki
- 07.09. - E. Handschin  
08.09.1984 Besprechung an der Jaotong Universität in Xian  
über Partnerschaftsvertrag mit der Universität  
Dortmund
- 18.09. - W. Horenkamp, D. König  
20.09.1984 Präsentation eines Programmsystems zur dyna-  
mischen Simulation technischer Systeme mit einem  
Arbeitsplatzcomputer, IBM-Forum für Wissenschaft  
und Verwaltung in Göttingen
- 01.10. - Th. Reißing  
03.10.1984 Besuch der Technischen Universität Budapest;  
Besprechung mit Herrn Prof. Geszti und Mitar-  
beitern über Lastmessungen und Spannungs- Blind-  
leistungsverhältnisse im ungarischen Netz
- 15.10. - E. Handschin  
17.10.1984 VDE-Kongress in Frankfurt

- 18.10.1984 Th. Reißing  
4. Sitzung der Arbeitsgruppe "Blindleistung" des  
GMR/ETG-Fachausschusses "Netzregelung" in  
Frankfurt
- 19.10.1984 W. Horenkamp, K.-D. Tesch  
Besuch der Elektrotechnik-Messe in Dortmund
- 29.10.1984 E. Handschin  
Sitzung des GMR/ETG-Fachausschusses "Netzrege-  
lung" in Frankfurt
- 30.10.1984 E. Handschin  
Sitzung des Arbeitskreises "Technisches Rechnen"  
in Mannheim
- 05.11.1984 E. Handschin, Th. Reißing, P. Stöber  
Besprechung mit den Herren Dr. Koetzold,  
Dr. Brauner, Dr. Cuno und Mitarbeitern, AEG  
Frankfurt, über Netzdynamik und Netzurückwirkun-  
gen
- 20.11.1984 E. Handschin  
Sitzung der VDE-Zweigstelle Dortmund bei der  
Firma BBC, Dortmund
- 06.12.1984 E. Handschin, N. Aschöwer, Th. Reißing,  
J.-G. Tebbe  
Besprechung mit Herrn Dr. Freund und Mitar-  
beitern, Technische Werke Stuttgart, über kno-  
tenbezogene Lastprognose, in Stuttgart
- 11.12.1984 E. Handschin  
Hauptversammlung des VDE-Bezirksvereins  
Rhein-Ruhr in Dortmund

## 6. VERÖFFENTLICHUNGEN UND BERICHTE

### 6.1 Veröffentlichungen

E. Handschin (Herausgeber): "Einsatz von Arbeitsplatzcomputern in der Technik", Fachbuch VDE Verlag, Berlin, Offenbach

Das vorliegende Fachbuch über den Einsatz von Arbeitsplatzcomputern in der Technik ist von Anwendern für Anwender geschrieben. Dementsprechend ist weniger Gewicht auf die mikroelektronische Seite der Rechner als vielmehr auf die möglichen Anwendungsbereiche gelegt worden. Dabei mußte eine gewisse Auswahl getroffen werden, um den Rahmen des Buches nicht zu sprengen. Trotzdem ist zu wünschen, daß die Ausführungen repräsentativ für viele andere Einsatzmöglichkeiten sind. Es entspricht der Zielsetzung dieses Buches, Anregungen zu vermitteln, wie und unter welchen Bedingungen die reichhaltigen Möglichkeiten eines Arbeitsplatzcomputers sinnvoll genutzt werden können. Die rasante Entwicklung sowohl der Hard- wie auch der Software erschweren es dem Anwender, einen vollständigen Überblick über den Stand der Technik zu behalten. Trotzdem ist es wichtig, immer wieder die zu bearbeitenden Probleme vor dem Hintergrund neuer Technologien zu prüfen, um möglichst rechtzeitig neue Lösungsmöglichkeiten zu erkennen und zu nutzen. In dieser Hinsicht wird in diesem Buch versucht, die Anforderungen aus der Technik mit den Möglichkeiten der Rechnertechnologien zu vergleichen und da, wo sich neue Lösungen anbieten, diese zu beschreiben.

E. Handschin: "Einsatz von Arbeitsplatzcomputern in der elektrischen Energieversorgung", Kapitel 4 des oben genannten VDE-Fachbuches

Für den erfolgreichen und effizienten Einsatz von Arbeitsplatzrechnern in der elektrischen Energieversorgung sind die Anforderungen und Aufgabenstellungen sorgfältig zu spezifizieren und den Fähigkeiten der verfügbaren Rechner gegenüberzustellen. Die



Aufgaben lassen sich in drei Kategorien einteilen:

- technisch-wissenschaftliche Probleme
- prozeßorientierte Datenerfassung und -auswertung
- organisatorische Probleme der Büroautomation

Das Ziel der Ausführungen besteht darin, einige typische Einsatzmöglichkeiten im folgenden vorzustellen. Dazu wird auf die Aufgabenstellungen allgemein und die heute verfügbaren Rechnermöglichkeiten eingegangen.

Th. Reißing: "Berechnung des elektrischen Leistungsbedarfs für industrielle Großabnehmer", Kapitel 5 des oben genannten VDE-Fachbuches

Für ein Unternehmen mit einem Laststeuerungssystem stellt sich das Problem, abhängig von der zu erwartenden Produktion die benötigte Höchstlast zu bestimmen, bzw. einen Zusammenhang zu prognostizieren zwischen der gewählten Höchstleistung und der Häufigkeit der sich daraus ergebenden notwendigen Verbraucherabschaltungen. Die Kenntnis des genannten Zusammenhangs schafft die Grundlage für eine Gesamtkostenoptimierung von Stromkosten und den Kosten, die durch die Verbraucherabschaltungen entstehen.

E. Handschin, W. Brandes: "Kurz- und Mittelzeitdynamik elektrischer Energieversorgungsnetze", etz-Archiv 12/84, Bd.6

Die seit einiger Zeit vereinzelt beobachteten schwach oder teilweise sogar ungedämpften Pendelerscheinungen im deutschen und westeuropäischen Verbundnetz haben das Thema "Netzdynamik" erneut in den Vordergrund betrieblicher und netztheoretischer Diskussionen gestellt. Unter Benutzung vereinfachter Formeln werden die dynamischen Vorgänge beschrieben, die infolge eines gestörten Gleichgewichts zwischen Erzeugung und Verbrauch elektrischer Energie auftreten. Der Einfluß der elektrischen und mechanischen Kenngrößen moderner Grenzleistungsblöcke, ihrer

Betriebsweise und der Netzgestaltung auf die Netzdynamik wird betrachtet. Mathematische Modelle und Verfahren zur Simulation der netzdynamischen Vorgänge auf dem Digitalrechner werden vorgestellt.

E. Handschin: "Auswirkungen des Exports elektrischer Energie auf die Reserveleistung", Bulletin SEV/VSE Nr. 16/1984

Die internationale Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Versorgung mit elektrischer Energie ist eine wichtige Voraussetzung für die wirtschaftliche und sichere Bereitstellung elektrischer Energie. Über die Thematik "Verbundbetrieb" ist schon sehr viel aus technischer, wirtschaftlicher und politischer Sicht veröffentlicht worden. Im Rahmen des vorliegenden Beitrags werden wichtige Aspekte des Verbundbetriebes im Hinblick auf die Thematik des Energieaustausches angesprochen.

E. Handschin, A. Ramusch: "Rechnergestützte Betriebsführung elektrischer Verteilungsnetze", Tagungsband der FGH, Dezember 1984

Für den Betrieb elektrischer Energieübertragungssysteme spielt die moderne Netzleittechnik eine entscheidende Rolle. Der große Informationsumfang, der im Hinblick auf die sichere und wirtschaftliche Betriebsführung von Schaltungen Ingenieuren zu bewältigen ist, macht den Rechnereinsatz zu einem unumgänglichen Hilfsmittel. Nach den bisher vorliegenden Betriebserfahrungen im Bereich der Hoch- und Höchstspannungsnetze ist abzusehen, daß die rechnergestützte Betriebsführung auch für Verteilungsnetze erfolgreich eingesetzt werden kann. Dabei müssen jedoch die zahlreichen Unterschiede zwischen Übertragungs- und Verteilungssystem beachtet werden, die sowohl bezüglich Topologie, Betriebsmittel und Betriebsbedingungen sorgfältig zu analysieren sind. Der Zielsetzung des Aussprachetages entsprechend sollen in diesem einleitenden Grundsatzreferat die betrieblichen Zielsetzungen formuliert werden, um dann anhand eindeu-

tiger Begriffe und Definitionen die Diskussionsbeiträge auf ein einheitliches Fundament stellen zu können.

E. Handschin, D. König, Th. Reißing: "Parallel Processing For Transient Stability Analysis", 8th PSCC Conference Proceedings, Helsinki

Due to the increasing size of generating units together with the corresponding energy transmission problems the topic of transient stability analysis receives new interest not only for geographical large networks. Furthermore operational interest requires on-line transient stability analysis. The present computer technology based on serial data processing does not offer sufficient capacity to solve the very many simulation equations in adequate time. The key to an effective and fast solution is offered by the new computing architectures using many processing units in a parallel fashion.

## 6.2 Forschungsberichte

N. Aschöwer: "Einführung in die on-line Ausfallsimulation", EV 8418

J.-G. Tebbe: "Knotenbezogene Lastprognose", EV 8428

## 6.3 Diplomarbeiten

H. Kaup: "Untersuchung des spannungs- und frequenzabhängigen Lastverhaltens von Wohngebieten", Diplomarbeit, September 1984, EV 8403

J.-G. Tebbe: "Untersuchung zur knotenbezogenen Lastprognose", Diplomarbeit, Mai 1984, EV 8406

U. Petersen: "Digitale Langzeitmessung der Strombelastung von Mittel- und Niederspannungskabeln", Diplomarbeit, Dezember 1984  
EV 8410

M. Wuske: "Schnelle digitale Präzisionsmessung von Wechselstromgrößen", Diplomarbeit, November 1984, EV 8424

A. Kubbe: "Dynamisches Verhalten im Kurzzeitbereich", Diplomarbeit, November 1984, EV 8425

U. Kämmerer: "State Estimation mit Mehrprozessorrechnern", Diplomarbeit, Dezember 1984, EV 8426

W. Ebbinghaus: "Aufbau eines selektiven Erdschlußerfassungsgerätes für Drehstromnetze mit einem Mikrorechnersystem", Diplomarbeit, November 1984, EV 8427

#### 6.4 Studienarbeiten

U. Freise: "Dem Stromverbrauch privater Haushalte zugrundeliegende Gerätestruktur - Literaturstudie", Studienarbeit, Februar 1984, EV 8401

U. Petersen: "Erweiterung eines intelligenten Meßwerterfassungssystems", Studienarbeit, Januar 1984, EV 8402

H. Kaup: "Empfindlichkeit äquivalenter Lastmodelle auf Variationen der Lastzusammensetzung", Studienarbeit, Februar 1984, EV 8403

R. Polduwe: "Modellierung des dynamischen Verhaltens von Asynchronmaschinen", Studienarbeit, Februar 1984, EV 8404

A. Kubbe: "Dynamische Optimierung eines katalytischen Verbrennungsprozesses", Studienarbeit, Februar 1984, EV 8405

G. Hemmer: "Zerlegung der gemessenen Dreiphasengrößen in symmetrische Komponenten mit Hilfe eines Mikrorechners", Studienarbeit, Mai 1984, EV 8407

J. Lindemann, W. Wöstenhöfer: "Implementierung von Lastflußrechnungen auf Arbeitsplatzcomputern", Studienarbeit, Juni 1984, EV 8409

A. Höltermann, R. Zippel: "Rechnergestütztes Protokoll- und Kommunikationssystem für Rundsteuersender, Informations- und Dialogknoten für den Betrieb von 50 Rundsteuersendern", Studienarbeit, März 1984, EV 8411

U. Heseler: "Erweiterung der verfügbaren Parameterräume bei der robusten Spannungsregelung von Synchronmaschinen", Studienarbeit, Mai 1984, EV 8414

N. Capetanos: "Konzeption eines Kriteriums für die automatische Abstimmung einer Erdschlußlöschspule mit einem Einplatinencomputer", Studienarbeit, Juli 1984, EV 8416

K. Mußhoff: "Berechnung und Messung der Oberwellenausbreitung am Netzmodell", Studienarbeit, November 1984, EV 8423

#### 6.5 Programmbeschreibungen

J.-G. Tebbe: "Lastprognoseverfahren PROGLA, Spitzenlastprognoseverfahren PEAK7", EVP 8401

H.H. Graf: "SBR - Programme zur Spannungs-Blindleistungsregelung", EVP 8402

## 7. PROMOTIONEN

Graf, Hans-Helmut: "Einfluß einer sekundären Spannungs-Blindleistungsregelung auf das Verhalten elektrischer Energieversorgungsnetze"

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. E. Handschin
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. J. Voß

Tag der mündlichen Prüfung: 30. April 1984

Für die sekundäre Spannungs-Blindleistungsregelung wird in der Arbeit ein Entwurfsverfahren für einen robusten Regler vorgestellt, mit dem definierte Anforderungen an das Verhalten elektrischer Energieversorgungssysteme realisiert werden können.

Zu den definierten Anforderungen gehört, daß in der Regelung nur einfach zu messende Größen verarbeitet werden und ein Regelungsziel realisiert wird, mit dem die Blindleistungseinspeisungen weitgehend gleichmäßig aufgeteilt werden und gleichzeitig eine Spannungshaltung gewährleistet wird. Ist trotz sorgfältiger Auswahl des Regelungszieles nicht zu vermeiden, daß Grenzwerte bei den Generatoreinspeisungen verletzt werden, so ist es möglich, den Regler derart modifiziert einzusetzen, daß gezielte Grenzwertverletzungen abgebaut werden, solange die Blindleistungsreserve des Netzes ausreicht.

Durch Einführung des Reglers in das mathematische Modell des Netzes wird es möglich, das Netzverhalten unter Einfluß der Regelung abzuschätzen. Dazu gehört die Berechnung, welchen Einfluß einzelne große Meßfehler oder statistisch verteilte Meßungenauigkeiten auf den Netzzustand ausüben, bzw. wie sich diese Fehler zur Stellgrößenbestimmung verstärken. Ferner ist abschätzbar, ob der Regelkreis auch bei geänderten Systemparametern einsatzbereit bleibt, wobei dies besonders bei Ausfallsituationen, die das n-1 Prinzip nicht verletzen, interessant ist.

Aufgrund von Beispielrechnungen werden diese Eigenschaften für ein realistisches Netz dargestellt. Als eigentliches Regelungsziel wird ein quadratisches Kriterium verwendet, das Spannungsabweichungen und Blindleistungseinspeisungen berücksichtigt. Durch die Einfügung der Blindleistungseinspeisung wird nicht nur eine gleichmäßige Generatorbelastung erreicht, sondern die Regelung auch für Ausfallsituationen besonders robust. Da der Regler beliebig vorgebbare Netzzustände bestmöglich einstellt und das Regelgesetz nur aus einfachen Matrizenoperationen besteht, eignet er sich besonders zur Realisierung von Lastflußoptimierungen. Er kann auch im Rahmen der Netzüberwachung in Leitzentren eingesetzt werden, um kontinuierlich notwendige Korrekturen am Blindleistungshaushalt zu berechnen.