

JAHRESBERICHT 1980



LEHRSTUHL FÜR ELEKTRISCHE ENERGIEVERSORGUNG

UNIVERSITÄT DORTMUND

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

VORWORT

Der Austausch von Ergebnissen, Erfahrungen und neuen Aufgaben ist eine wichtige Brücke zwischen den einzelnen Hochschulinstitutionen und zwischen der Hochschule und der Industrie. Im Verlauf eines Jahres ergeben sich zahlreiche Gelegenheiten zu persönlichen Gesprächen, Vorträgen und Diskussionen. Trotzdem scheint es mir wichtig, einmal pro Jahr die wichtigsten Ergebnisse zusammenzufassen, um so Rückblick und Ausblick durchzuführen. Bei dieser Bestandsaufnahme bemühen wir uns zu prüfen, ob bei den abgeschlossenen Arbeiten alle Randbedingungen der Problemstellung berücksichtigt worden sind. Darüber hinaus verfolgen wir jedoch auch für die laufenden Projekte das Ziel einer möglicherweise notwendigen Kurskorrektur. Dabei sind wir natürlich auf die Wechselwirkung zwischen Hochschule und Industrie angewiesen. Nur so kann Qualität und Kontinuität der Hochschulforschung sichergestellt werden. Der Erfolg kann nicht nur darin gesehen werden, daß die Resultate unserer Überlegungen in Berichten und Veröffentlichungen dokumentiert sind. Beim Wechsel der Hochschulabsolventen in die Industrie muß sich das erarbeitete Wissen über ein möglichst breites Gebiet erstrecken. Aus unserer Sicht besteht dabei die Notwendigkeit zu prüfen, mit welchem Erfolg das vermittelte Wissen in der Berufspraxis eingesetzt werden kann. Auch in dieser Hinsicht ist der Jahresbericht als Informationsvermittlung zu verstehen. Die nach Schwerpunkten zusammengefaßten Kurzberichte zu den Forschungsprojekten sollen in knapper Form das Wichtigste unserer Arbeiten beschreiben. Darüber hinaus soll der Bericht jedoch auch für das kommende Jahr zeigen, wo sich unsere Arbeiten konzentrieren werden. In dieser Hinsicht möge der vorliegende Bericht auch für Sie von Interesse sein und so als Beitrag zur weiteren Zusammenarbeit seine Funktion erfüllen.

E. Handschin

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. PERSONAL	3
2. LEHRBETRIEB	4
2.1 Vorlesungen	4
2.2 Praktika	5
2.3 Exkursionen	7
3. FORSCHUNGS- UND ENTWICKLUNGSARBEITEN	8
3.1 Software-Entwicklung für die Netz- automatisierung	8
3.2 Statische und dynamische Simulation elektrischer Energieversorgungsnetze	22
3.3 On-line Führungs- und Regelalgorithmen für den Netz- und Kraftwerksbetrieb	30
4. VORTRÄGE	43
4.1 Beiträge für das Kolloquium	43
4.2 Externe Vorträge von Lehrstuhl- mitgliedern	43
5. NATIONALE UND INTERNATIONALE BEZIEHUNGEN	45
6. VERÖFFENTLICHUNGEN UND BERICHTE	49
6.1 Veröffentlichungen	49
6.2 Forschungsberichte	51
6.3 Diplomarbeiten	51
6.4 Studienarbeiten	52
6.5 Programmbeschreibungen	53
7. PROMOTIONEN	54

1. PERSONAL

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

Sekretariat: Frau I. Gasthaus

Oberingenieur: Dr.-Ing. J. Voß

Wiss. Assistenten: Dipl.-Ing. N. Aschöwer
Dipl.-Ing. E. Grebe
Dipl.-Ing. G. Howe
Dipl.-Ing. T. Reißing

Wiss. Angestellte: Dipl.-Ing. M. Gacka
Dipl.-Ing. H. Graf
Dipl.-Ing. R. Woltemate

Wiss. Mitarbeiter: Dipl.-Ing. P. Machado
Dipl.-Ing. A. Ramos
Dipl.-Ing. E. Ricke
Dipl.-Ing. M. Schilling

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

Student. Hilfskräfte: A. Bücken
G. Hager
V. Hering
K. Homann
H.-D. Honselmann
K.-F. Hopp
A. Kuhlmann
W. Lisakowski
B. Lütke-Daldrup
N. Mannebach
G. Mark
R. Stöppler

2. LEHRBETRIEB

2.1 Vorlesungen

a) Elektrische Energietechnik I (WS 1979/80)

Obligatorische Vorlesung für alle Studenten der Abteilung Elektrotechnik im 5. Semester. Ca. 40 Stunden Vorlesungen und Übungen.

Inhalt: Grundlagen der elektrischen Energietechnik; Grundzüge der elektrischen Maschinen.

b) Elektrische Energietechnik II (SS 1980)

Obligatorische Vorlesung für alle Studenten der Abteilung Elektrotechnik im 6. Semester. Ca. 50 Stunden Vorlesungen und Übungen.

Inhalt: Grundlagen und Aufbau der elektrischen Energieversorgungssysteme, Einführung in die Berechnung des stationären Netzzustandes sowie transients Vorgänge.

c) Energieübertragungssysteme I (WS 1979/80)

Wahlpflichtvorlesung für Studenten der Fachrichtung Energietechnik und Allgemeine Elektrotechnik im 7. Semester. Ca. 40 Stunden Vorlesungen und Übungen.

Inhalt: Energiesystemberechnung im stationären Zustand; Optimierung; dynamisches Netzverhalten; symmetrische Kurzschlüsse; Estimation.

d) Energieübertragungssysteme II (SS 1980)

Wahlpflichtvorlesung für Studenten der Fachrichtung Energietechnik und Allgemeine Elektrotechnik im 8. Semester. Ca. 35 Stunden Vorlesungen und Übungen.

Inhalt: Symmetrische Komponenten, unsymmetrische Betriebszustände; statische und dynamische Stabilität.

e) Elektrizitätswirtschaft und Kraftwerke I (WS 1979/80)

Inhalt: Prozeßautomatisierung und Kraftwerksautomatisierung; Einführung in die Prozeßautomatisierung; Entwurf von Abtastregelkreisen; Dynamisches Verhalten von Kraftwerken, Entwurf einer digitalen Regelung für ein Dampfkraftwerk.

f) Elektrizitätswirtschaft und Kraftwerke II (SS 1980)

Inhalt: Daten und Kosten von Übertragungselementen und Kraftwerken; Planspiel "Elektrizitätswirtschaft".

g) Energiewirtschaft

Seminar für Studenten der Fachrichtung Energietechnik und allgemeine Elektrotechnik im 8. Semester; ca. 25 Stunden.

Inhalt: Energiewirtschaft; Einsatz von Kabeln und Freileitungen unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten; Kosten von Umspannwerken; Kalkulatorische Kostenrechnung der Energieversorgungsunternehmen.

2.2 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 drei Versuche angeboten:

a) Schutzeinrichtungen

Behandlung der wichtigsten Schutzmaßnahmen beim Anschluß elektrischer Verbraucher.

b) Messung von Energie und Leistung

Behandlung der verschiedenen 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 gemeinsam organisierten Fortgeschrittenen-Praktikums für alle Studenten des 5. und 6. Semesters werden vom Lehrstuhl für elektrische Energieversorgung folgende Versuche angeboten:

a) Gasdurchschlag bei Wechselspannungsbeanspruchung

Untersuchung der Isoliereigenschaften von Luft unter Wechselspannungsbeanspruchung bei verschiedenen Drücken (Paschen-Gesetz).

b) Prüfung von Isolierstoffen der Hochspannungstechnik entsprechend den VDE-Vorschriften

Untersuchung des Isoliervermögens von Isolatoren sowie von Transformatoröl bei Wechsel- und Stoßspannungsbeanspruchung.

c) Messung hoher Gleich-, Wechsel- und Stoßspannungen

Einführung und Grundlagen der speziellen Methoden zur Messung hoher Spannungen, Erzeugung und Messung hoher Gleich- und Stoßspannungen, Vergleich verschiedener Wechselspannungsmethoden.

d) 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.

e) Planung elektrischer Energieversorgungssysteme

Planung eines Energieversorgungsnetzes bei vorgegebener Lage von Verbrauchern und Kraftwerken unter Einbehaltung umfangreicher Randbedingungen. Überprüfung der gewählten Struktur durch Lastflußberechnung. Simulation einer Einfachstörung.

f) Selektive Netzschutzeinrichtungen

Behandlung der verschiedenen Meßverfahren zur Kurzschlußerfassung in Mittel- und Hochspannungsnetzen insbesondere des Distanzschutzes.

2.3 Exkursionen

9. Mai 1980	Braunkohletagebau und -kraftwerk Frimmersdorf der RWE, Frimmersdorf
19. Juni 1980	Umspannstation Kusenhorst der VEW und Kraftwerk Scholven der VEBA-Kraftwerke Ruhr, Gelsenkirchen
6. November 1980	Netzleitstelle Merheim der Gas- und Elektrizitätswerke AG, Köln
17. November 1980	Pumpspeicherkraftwerk der Preussen Elektra, Kraftwerksgruppe Waldeck/Edersee

3. FORSCHUNGS- UND ENTWICKLUNGSARBEITEN

Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten des Berichtsjahres lassen sich alle den bereits früher definierten drei Schwerpunkten zuordnen.

1. Software-Entwicklung für die Netzautomatisierung (Systemüberwachung und -führung)
2. Statische und dynamische Simulation elektrischer Energieversorgungssysteme
3. On-line Führungs- und Regelalgorithmen für den Netz- und Kraftwerksbetrieb.

Der vorliegende Bericht enthält Zusammenfassungen der erreichten Ergebnisse. Um den Rahmen des Jahresberichtes nicht zu sprengen, werden hier nur Kurzfassungen der Arbeiten aufgeführt. Für die ausführliche Berichterstattung wird auf die in Abschnitt 6 zusammengestellten Veröffentlichungen, Berichte und Promotionsarbeiten verwiesen, die auf Anfrage gerne zugestellt werden.

3.1 Software-Entwicklung für die Netzautomatisierung

Die theoretischen Grundlagen für die moderne Netzleittechnik-Software wurden in den letzten Jahren weitgehend festgelegt. Da die Implementierung der heute bekannten Methoden große Anstrengungen erfordert, haben sich die bisherigen, breiten Aktivitäten auf diesem Gebiet in zwei spezielle Richtungen entwickelt. Zum einen wurden bezüglich der praktischen Implementierung einige Untersuchungen durchgeführt, um so einen Beitrag in Richtung der Anwendung zu erbringen. Dabei sind die Themen der Lastprognose, der optimalen Lastflußrechnung, der Ausfallsimulation und der Beobachtbarkeit für Estimationsprogramme bearbeitet worden. Zum anderen ist im Rahmen eines neuen Forschungsvorhabens eine Aufgabe aus dem großen Gebiet der Energieverteilung

aufgegriffen worden. Ausgehend von den Arbeiten auf dem Gebiet der Lastfluß- und Kurzschlußberechnungen ist das Problem der selektiven Erdschlußerfassung in Verteilungsnetzen des Steinkohlebergbaus bearbeitet worden.

3.1.1 Wirk- und Blindleistungsoptimierung mit Sicherheitsnebenbedingungen

Bei dem Einsatz von Optimierungsverfahren für stationäre Wirk- und Blindleistungsoptimierung innerhalb der on-line Systemführung elektrischer Energieversorgungsnetze muß grundsätzlich zwischen drei Netzbetriebszuständen als Ausgangspunkt der Optimierung unterschieden werden.

Im Normalbetrieb liegen keine unzulässigen Grenzwertverletzungen vor, auch bei Ausfall eines beliebigen Betriebsmittels ergeben sich keine stationären Überleistungen im Netz. Im gefährdeten Betrieb werden ebenfalls alle Sicherheitsgrenzen eingehalten, jedoch ein einfacher Ausfall führt bereits zu einer unzulässigen Grenzwertverletzung.

Entsprechend den unterschiedlichen Netzbetriebszuständen sind darauf abgestimmte Optimierungsstrategien einzusetzen, um zu gewährleisten, daß bestehende Überlastungen abgebaut bzw. neue Überlastungen vermieden werden. Dementsprechend ist im Normalbetrieb eine Optimierung von Wirk- und Blindleistungsverteilung nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten (wirtschaftliche Lastverteilung) sinnvoll. Hingegen müssen im gefährdeten und insbesondere im gestörten Betrieb Maßnahmen getroffen werden, um gezielt festgestellte unzulässige Grenzwertverletzungen abzubauen. Darüber hinaus sind aus der möglicherweise großen Anzahl bestehender Grenzwertverletzungen diejenigen zu bestimmen, die im Optimum bindende Restriktionen darstellen. In Bild 3.1 sind die Resultate für ein 25-Knoten-Netz mit 35 Leitungen und 5 Generatoreinspeisungen dargestellt. Im Ausgangszustand sind sechs Sicherheitsnebenbedingungen verletzt. Es wurden zwei Optimierungsrechnungen durchgeführt, einmal die wirtschaftliche Lastverteilung, zum anderen eine Wirk- und Blindlei-

		Ausgangs- zustand	Wirtschaftliche Lastverteilung	Sicherheits- optimierung
Wirkleistungs- einspeisungen (MW)	P_{G1}	515.6	343.2	379.0
	P_{G2}	150.0	159.9	206.9
	P_{G3}	75.0	268.0	331.7
	P_{G4}	75.0	53.5	30.0*
	P_{G5}	300.0*	300.0*	181.4
Blindleistungs- einspeisungen (MVar)	Q_{G1}	150.0	173.3	83.1
	Q_{G2}	-6.7	-6.7	21.6
	Q_{G3}	18.7	18.7	33.4
	Q_{G4}	20.4	20.4	33.8
	Q_{G5}	-44.4	-44.4	-16.0
Wirkverluste (MW)		20.6	29.1	33.7
Betriebskosten (%)		100	98.8	100.4

* Werte liegen auf dem Rand des zulässigen Stellbereichs

Bild: 3.1a

Vergleich der Ergebnisse für den Ausgangszustand und den beiden Optimierungen

		Ausgangs- zustand	Wirtschaftliche Lastverteilung	Sicherheits- optimierung
Knoten- spannungen (kV)	V_6	210.5	217.3	229.8
	V_{13}	209.4	217.2	228.8
	V_{14}	208.1	210.8	214.5
	V_{15}	209.0	211.0	213.7
Leitungs- flüsse	S_{5-17} MVA	130.5	124.4	59.4
	%	119	114	54
	S_{5-19} MVA	84	97.2	72
	%	113.5	130	97.3

Bild: 3.1b Gegenüberstellung der Spannungen und Leitungsbelastungen, für die im Ausgangszustand unzulässige Grenzwertverletzungen festgestellt wurden

$$V_{\min} = 212 \text{ kV}, V_{\max} = 240 \text{ kV}$$

$$S_{5-17, \max} = 110 \text{ MVA}, S_{5-19, \max} = 75 \text{ MVA}$$

stungsoptimierung mit Sicherheitsnebenbedingungen.

Die Auswertung der Ergebnisse zeigt, daß nach der wirtschaftlichen Lastverteilung die Zahl der verletzten Spannungsgrenzen um zwei reduziert wird, die Leitungsüberlastungen hingegen bestehen bleiben und im Fall der Leitung 5-19 sogar noch verstärkt werden. Bei der Optimierung mit Sicherheitsrandbedingungen ergibt sich hingegen, daß sämtliche vorher verletzten Grenzbedingungen erfüllt sind, was jedoch eine Erhöhung der Betriebskosten zur Folge hat.

Aus der Gesamtzahl von sechs Sicherheitsnebenbedingungen ergab sich durch sukzessive Elimination nichtbindender Nebenbedingungen lediglich die Restriktion für den Leistungsfluß 5-19 als bindend, alle anderen im Ausgangszustand festgestellten Grenzwertverletzungen sind im Optimum automatisch erfüllt.

Analog zu dieser Korrektions-Optimierung läßt sich auch eine vorbeugende Optimierung durchführen, wobei hier die Sicherheitsnebenbedingungen aus einer vorher notwendigen Ausfallsimulation resultieren. Die Ergebnisse zeigen, daß trotz einer linearisierten Darstellung der Netzgleichungen im Betriebspunkt die geforderten Randbedingungen zuverlässig eingehalten werden. Somit kann mit dem entwickelten optimalen Lastflußverfahren eine Lösung angegeben werden, die nicht nur für den Normalbetrieb sondern insbesondere auch im gefährdeten und gestörten Betrieb eine zuverlässige Einhaltung der Sicherheitsgrenzen gewährleistet.

Berichte: EV 7943, EVP 8006, Dissertation

Gerhard Howe

3.1.2 Netzausfallsimulation in Energieübertragungssystemen

Netzführungsaufgaben in elektrischen Energieübertragungssystemen werden in zunehmenden Maße dem Prozeßrechner übertragen. Um den aktuellen Betriebszustand auf "künftige vorhersagbare Störungen resp. Ausfälle" analysieren zu können, bedarf es zeitoptimaler Verfahren sowohl bei der Ermittlung von Schwachstellen im aktiven Netzbereich als auch auf dem Gebiet der Lastflußrechnung. Die Untersuchungen der Ausfallsimulation basieren auf dem n-1 Prinzip, d.h. es kann eine beliebige Freileitung oder Kabel, ein Transformator oder ein Kraftwerk ausfallen ohne daß die im verbleibenden Netzbereich zu einem totalen Ausfall führt. Die Ermittlung von Schwachstellen liefert eine Prioritätsliste, in welcher die Auswirkungen der Elementausfälle nach deren Tragweite eingeordnet werden. Zur genaueren Überprüfung kann dann ein schnelles Lastflußverfahren exakte Ergebnisse liefern und somit dem Schaltwartenpersonal die zutreffenden Entscheidungen aufzeigen.

a) Ermittlung von Schwachstellen in Energieversorgungssystemen.

Ausgangspunkt der Ermittlung ist das Theorem von Tellegen, das den Energieerhaltungssatz beschreibt. Für einen bestimmten Netzzustand werden die Lastflußgleichungen linearisiert und auf einen Zustand gebracht, daß Tellegen's Theorem angewendet werden kann. Mit diesem linearen Modell können die Knotenspannungsänderungen in allen Knoten (außer dem Referenzknoten, da hier immer $\Delta \bar{U}_i = 0$) für den Ausfall eines beliebigen Betriebsmittels direkt berechnet werden.

Mit den Spannungsänderungen $\Delta \bar{U}_i$ werden im Anschluß die Leistungsflußänderungen ΔP_{ij} resp. ΔQ_{ij} bestimmt. Die Priorität eines Ausfalls wird durch lineare Extrapolation bestimmt und zwar derartig, daß beispielsweise zu jeder Knotenspannung \bar{U}_i die mit einem Faktor versehene berechnete Änderung $\Delta \bar{U}_i$ addiert wird. Dieser Faktor muß folgende Be-

dingung erfüllen:

$$|\bar{U}_i + k \Delta\bar{U}_i| = |\bar{U}|_{\min} \quad \text{oder} \quad |\bar{U}_i + k \Delta\bar{U}_i| = |\bar{U}|_{\max}$$

je nach Richtung von $\Delta\bar{U}_i$.

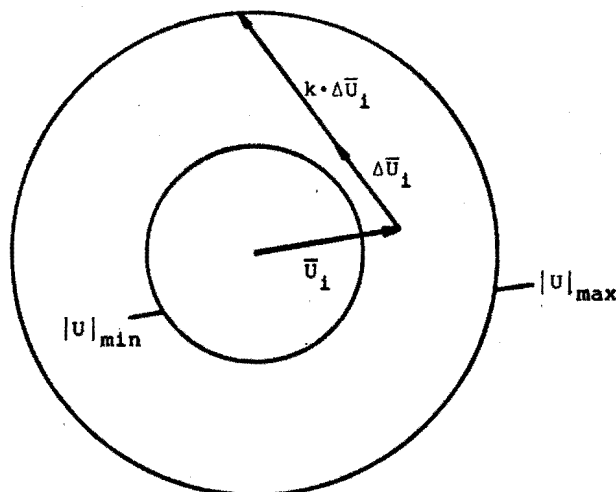


Bild 3.2: Graphische Ermittlung des k-Faktors

Für jeden Ausfall wird geprüft, um welchen Faktor k die einzelnen $\Delta\bar{U}_i$ verändert werden müssen, bis der vorgegebene Grenzwert erreicht ist. Ist k klein, so ist die Wahrscheinlichkeit groß, daß bei einer exakten Lastflußrechnung der Grenzwert tatsächlich überschritten wird. Entsprechend wird der Faktor bei den Belastungen bestimmt; allerdings mit dem Unterschied, daß lediglich eine obere Grenze besteht. Die k -Faktoren für jeden Ausfall werden gespeichert. Nachdem alle Ausfälle durchgerechnet sind, können die Faktoren, nach Priorität geordnet, vektoriell abgespeichert werden. Eine folgende exakte Lastflußrechnung der Rangfolge nach wird solange durchgeführt, bis sichergestellt ist, daß keine Grenzwerte verletzt werden. Untersuchungen an realen Netzen haben gezeigt, daß das Verfahren zufriedenstellende

Ergebnisse liefert. Die erforderliche exakte Lastflußrechnung kann mit dem nachfolgendem Verfahren durchgeführt werden.

b) Schnelle entkoppelte Lastflußrechnung mit Hilfe des Prozeßrechners.

Das hier vorgestellte Verfahren basiert auf der Tatsache, daß in Energieversorgungssystemen im stationären Zustand eine enge Kopplung einerseits zwischen den Knotenwirkleistungen und Spannungswinkeln und andererseits zwischen den Knotenblindleistungen und den Spannungsbeträgen besteht. Die zusätzlich bestehende schwache Kopplung zwischen den (P-δ)- und (Q-U) Komponenten läßt den folgenden mathematischen Ansatz zu:

$$\begin{bmatrix} \underline{H} & | & \underline{O} \\ \hline \underline{O} & | & \underline{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\Delta\delta} \\ \underline{\Delta U} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{\Delta P} \\ \underline{\Delta Q} \end{bmatrix}$$

Dabei beinhalten die Untermatrizen \underline{H} und \underline{L} die partiellen Ableitungen $\partial \underline{P} / \partial \underline{\delta}$ resp. $\partial \underline{Q} / \partial \underline{U}$. Wird berücksichtigt, daß in den hier betrachteten Systemen im allgemeinen nur kleine Winkeldifferenzen auftreten, das Spannungsprofil relativ konstant bleibt und das Verhältnis der Leitungsleitwerte $B/G > 5$ (für Freileitungen) ist, so können die linearisierten entkoppelten Lastflußgleichungen mit konstanten Koeffizienten folgendermaßen geschrieben werden:

$$\text{diag}(\underline{U}) \underline{B}' \text{diag}(\underline{U}) \underline{\Delta\delta} = \underline{\Delta P}$$

$$\text{diag}(\underline{U}) \underline{B}'' \text{diag}(\underline{U}) \left(\frac{\underline{\Delta U}}{\underline{U}}\right) = \underline{\Delta Q}$$

Eine Umstellung der Diagonalmatrizen führt zur endgültigen mathematischen Formulierung der linearisierten entkoppelten Gleichungssysteme.

$$\text{Wirkmodell: } \underline{B}' \underline{\Delta\delta} = \text{diag}^{-2}(\underline{U}) \underline{\Delta P}$$

$$\text{Blindmodell: } \underline{B}'' \left(\frac{\underline{\Delta U}}{\underline{U}}\right) = \text{diag}^{-2}(\underline{U}) \underline{\Delta Q}$$

Unter Berücksichtigung der Vorzeichen und Vernachlässigung der ohmschen Anteile ergeben sich die konstanten Koeffizienten von \underline{B}' und \underline{B}'' unmittelbar aus der Knotenadmittanzmatrix.

Der Einfluß komplexer Übersetzungsverhältnisse wird durch Zusatzterme in den einzelnen Iterationen berücksichtigt. Um mit möglichst wenig Speicherplatz auszukommen und die Rechenzeit effizient zu beschränken, werden nur die Nichtnullelemente der Koeffizientenmatrizen \underline{B}' und \underline{B}'' gespeichert. Der direkte Zugriff der Nichtnullelemente in einer beliebigen Reihenfolge wird mit verketteten Listen-Speicherverfahren realisiert. Die Gleichungssysteme werden mit Hilfe der Bi-Faktorisierung gelöst. Die in der Bi-Faktorisierung gebildeten Faktormatrizen können durch ein dynamisches suboptimales Ordnungsverfahren mit möglichst geringer Anzahl an Elementen gefunden werden, was zu einer Reduzierung der Rechenoperationen in den einzelnen Iterationen führt.

Die Anwendung des schnellen entkoppelten Lastflußverfahrens auf ein Netz mit 57 Knoten und 80 Leitungen an einer PDP 11/40 führte zu folgenden Ergebnissen:

Genauigkeit	Anzahl an Iterationen		Rechenzeit
EPS/MW;MVAR	IP	IQ	s
1.0 MW	5	4	3.52
0.1 MW	7	7	4.72
.01 MW	10	10	5.74

Numerische Untersuchungen haben gezeigt, daß das entkoppelte Lastflußprogramm für Kabelnetze und für große Netze mit relativ vielen P-U-Knoten (bisher keine Berücksichtigung der Blindleistungsgrenzen) modifiziert werden muß, um zuverlässige Ergebnisse zu erhalten.

Berichte: EV 8015, EV 8005, EV 8007, EV 8009, EVP 8005

Norbert Aschöwer

3.1.3 On-line-Einsatz eines Beobachtbarkeitstestes

Das Verfahren der State-Estimation dient der Ermittlung einer vollständigen Datenbasis, die für die Betriebsführung elektrischer Energieversorgungsnetze von Bedeutung ist. Das Verfahren ergänzt nicht gemessene Werte; Meßungenauigkeiten werden ausgeglichen.

Bevor mit dem on-line-Einsatz dieses Verfahrens begonnen werden kann, muß zuerst die Beobachtbarkeit des Systems überprüft werden, um die Zuverlässigkeit der Ergebnisse zu sichern. Ein am Lehrstuhl entwickelter Beobachtbarkeitstest, der die Struktur der Jacobischen Matrix untersucht, gibt Aufschluß, welche Netzteile beobachtbar sind. Die numerische Erprobung dieses Verfahrens wird momentan durchgeführt.

Als Beispiel zur Anwendung des Testes betrachtet man ein vierzehn-knotiges Netz (Bild 3.3). Die Meßgeräteanordnung besitzt eine gesamte Redundanz von 1,74 und es wird vorausgesetzt, daß Wirk- und Blindleistung stets gleichzeitig gemessen werden. An dem Knoten 1 steht eine Spannungsbezugsmessung zur Verfügung. Als Ergebnis des Testes sind zwei Teilnetze vorhanden. Teilnetz 1 besteht aus Knoten 1,2,3,4,5,7 und 8, das beobachtbar ist. Teilnetz 2 besteht aus Knoten 6,9,10,11,12, 13 und 14, das unbeobachtbar bleibt. Das Gesamtergebnis der Überprüfung der Beobachtbarkeit des Netzzustandes ist negativ.

Die Beobachtbarkeit kann durch Einfügen eines minimalen Satzes von Pseudo-Messungen erreicht werden. In diesem Falle sind mehrere Möglichkeiten vorhanden; entweder Wirk- und Blindleistungsbilanzmessungen (z.B. im Knoten 4) oder Wirk- und Blindleistungsflußmessungen (z.B. 5-6).

In der Praxis bevorzugt man als Pseudo-Messung die Spannung, da ihre Genauigkeit höher ist als bei einer Blindleistungsmessung.

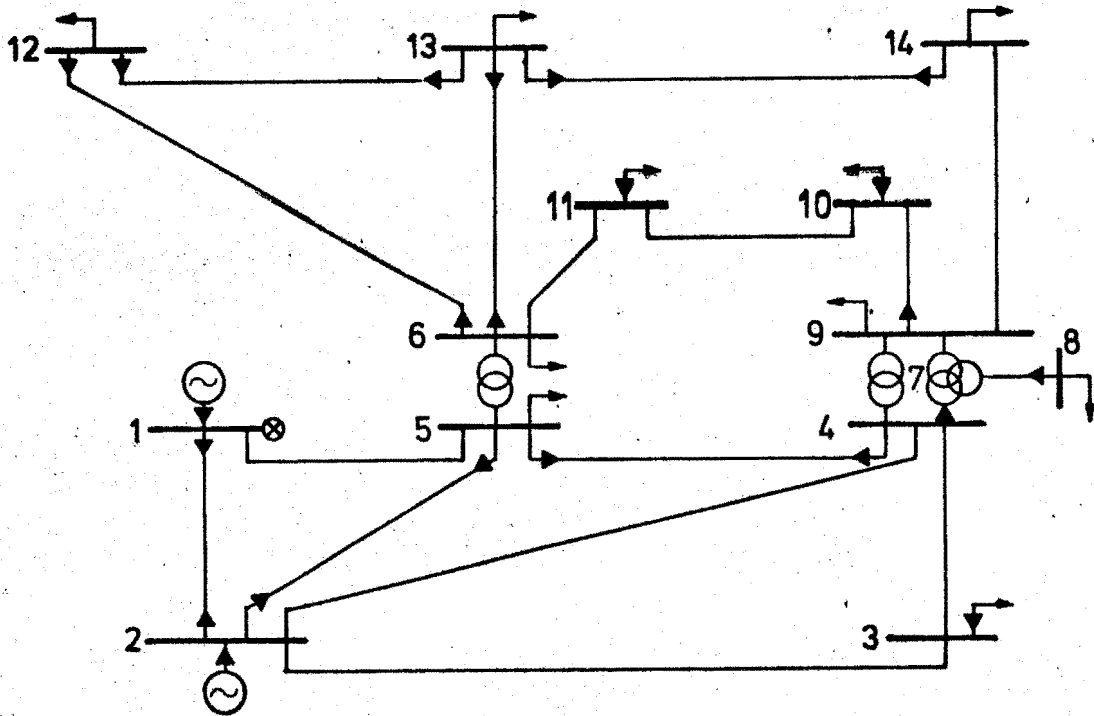


Bild 3.3: 14-knotiges Testnetz

Da der Test auf der Überprüfung von Teilmatrizen der Jacobischen Matrix basiert, ist eine Analyse der möglichen Ursachen einer nicht vorhandenen Beobachtbarkeit ohne großen zusätzlichen Aufwand möglich. Der entscheidende Vorteil des Testes besteht darin, daß nur Strukturinformationen von Teilmatrizen benötigt werden, die schnell auf einer Rechenanlage durchführbar sind, was für den on-line-Einsatz von großer Bedeutung ist.

Diese Arbeit wird durch den Deutschen Akademischen Austauschdienst gefördert.

Eduardo Ricke

3.1.4 Erdschlußfassung in Mittelspannungsnetzen des Steinkohlenbergbaus

Ein Erdschluß im elektrischen Netz eines Untertagebetriebes im Steinkohlenbergbau stellt wegen der möglichen Auslösung einer Schlagwetterexplosion und der Entzündung eines Grubenbrandes eine große Gefahr für die Belegschaft und eine Beeinträchtigung des geregelten Abbaubetriebes dar.

Aus diesen Gründen wird von den zuständigen Behörden die unverzügliche Abschaltung des fehlerhaften Netzteilens gefordert. In diesem Sinne wurden von mehreren Firmen Erdschluß-Geräte entwickelt, die auf die in Deutschland kompensiert betriebenen Untertagenetze zugeschnitten sind. Dabei werden von den Herstellern verschiedene Kriterien zur Erdschlußfassung herangezogen, z.B. Amplitude des Summenstromes, Phasenlage des Restwirkstromes zur Verlagerungsspannung, Auswertung des Einschwingvorganges. Die heute eingesetzten Geräte sind nicht universell für die Erdschlußabschaltung aller möglichen Netzformen geeignet. Insbesondere die von den Betreibern geforderte Selektivität bei zulässiger Abschaltzeit konnte noch nicht vollständig erreicht werden.

Aus diesem Grund wurde am Lehrstuhl für Elektrische Energieversorgung am Anfang des Jahres ein Forschungsvorhaben begonnen, das sich mit der speziellen Problematik der selektiven Erdschlußabschaltung in gelöschten Kabelnetzen, wie sie im deutschen Untertagebergbau vorkommen, beschäftigt. Da Versuche in Bergbaubetrieben aus sicherheitstechnischen Gründen nicht möglich sind, sollen die notwendigen experimentellen Versuchsreihen an einem geplanten Netzmodell und die numerischen Auswertungen mit Hilfe eines Digitalrechners durchgeführt werden.

So wurde in der Planungsphase des Vorhabens u.a. eine allgemeine theoretische Betrachtung des Erdschlußfehlers im stationären Zustand erarbeitet, die zu folgenden Ergebnissen führte:

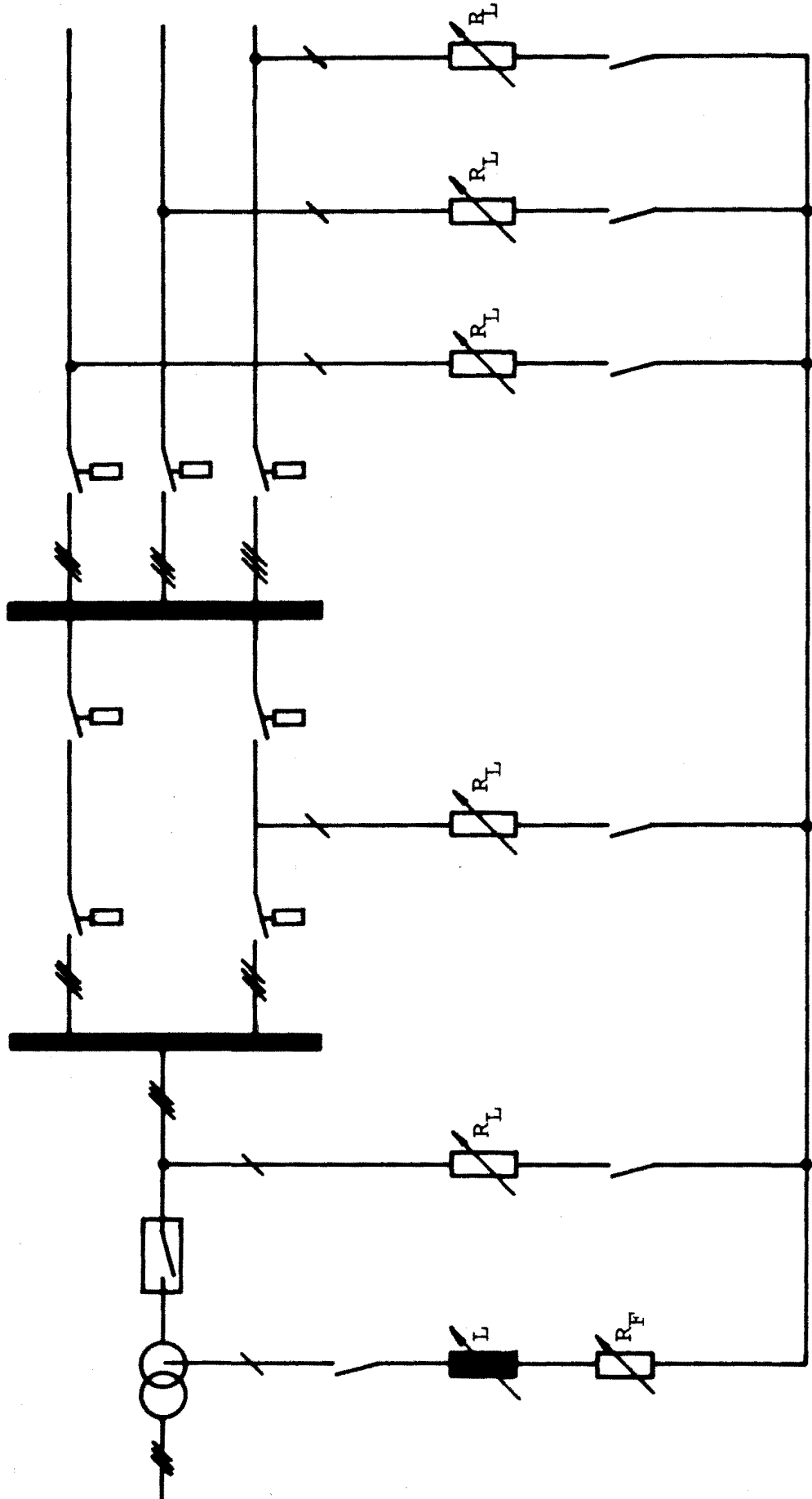


Bild 3.4: Prinzipschaltbild des Netzmodells

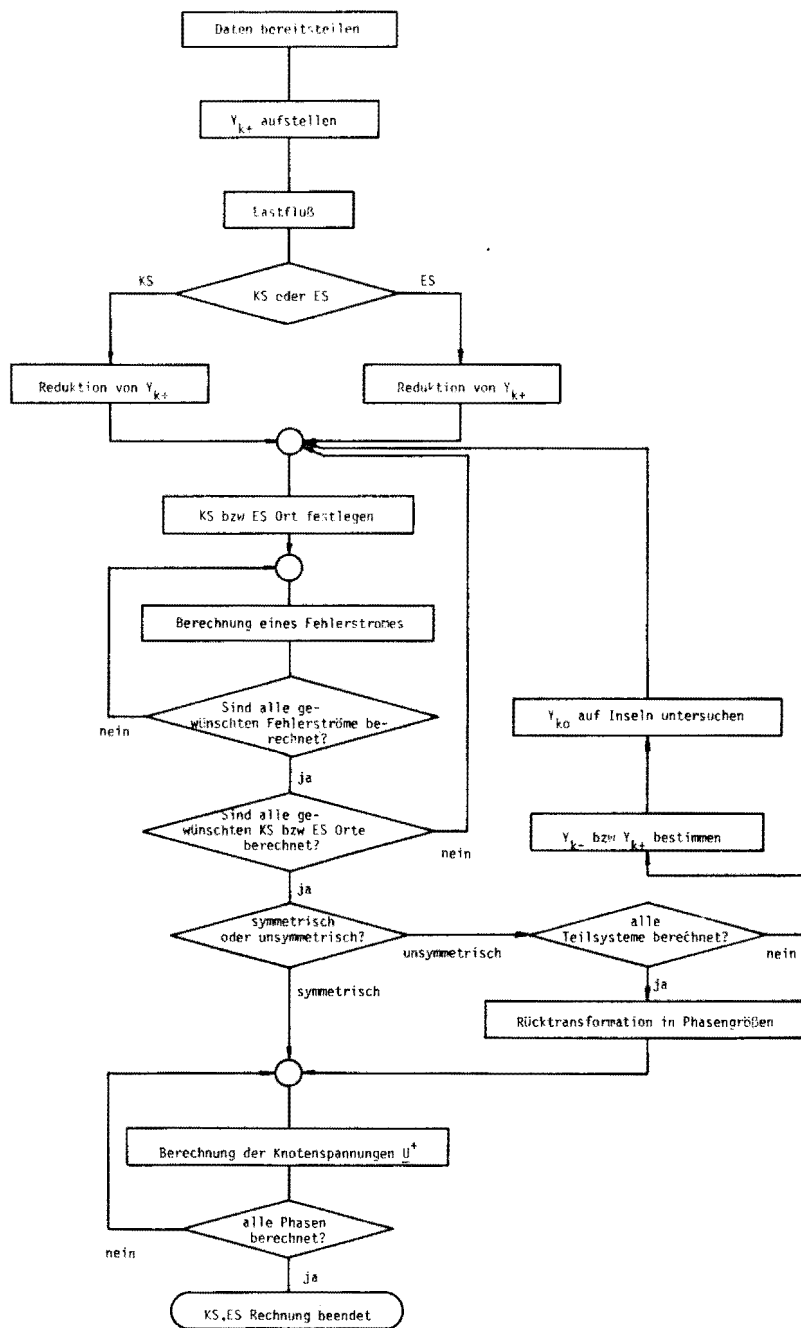


Bild 3.5: Flußdiagramm zur Erdschluß- und Kurzschlußrechnung

1. Die Kabelnetze lassen sich durch konzentrierte Kapazitäten nachbilden.
2. Die Belastung der Kabel hat keinen Einfluß auf die stationäre Verteilung des Erdschlußstromes.
3. Die Anzahl der Netzeinspeisungen ist ohne Einfluß auf den Erdschlußstrom, wenn nur eine Petersenspule im Netzbezirk vorhanden ist.

Die oben genannten Überlegungen führten zu einer bestimmten Auslegung des Netzmodelles (Bild 3.4), das als Nachbildung eines Untertagenetzes die Funktionstüchtigkeit der vorhandenen Erdschlußerfassungsgeräte nachweisen soll. Das erwähnte Netzmodell befindet sich im Stadium der Beschaffung.

Parallel zum Entwurf des Netzmodelles wurden die mathematischen Bedingungen für die digitale Simulation von Isolationsfehlern in kompensierten und nicht kompensierten Netzen untersucht und ein Konzept für das notwendige Programmpaket erarbeitet (Flußdiagramm; Bild 3.5). Es sollen insbesondere die speziellen Randbedingungen der Untertagenetze zur schnellen und rationellen Datenverarbeitung genutzt werden. Die Datenaufbereitung für die Kabelnetze sowie das Lastflußprogramm sind bereits fertiggestellt und können in Kürze für einfache Fehlerberechnungen verwendet werden.

Dieses Vorhaben wird durch das Bundesministerium für Forschung und Technologie gefördert.

Berichte: EV 8030, EV 8033, EV 8034, EV 8035

Michael Gacka
Harald Maiweg
Rüdiger Woltemate

mehr an Bedeutung. Der zu einer Großstörung in einem elektrischen Energieversorgungssystem führende Fehler läßt sich für die dynamischen Langzeituntersuchungen letztlich auf einen Mangel der insgesamt im Verbundnetz erzeugten Leistung zurückführen. Durch Folgefehler kann sich jedoch das Verbundnetz in mehrere Teilnetze aufspalten, so daß der geplante Leistungsaustausch zwischen den Energieversorgungsunternehmen nicht mehr gewährleistet bleibt und somit Netzbezirke sowohl mit Leistungsmangel als auch Leistungsüberschuß entstehen. In Abhängigkeit von der örtlichen Trennung des Verbundnetzes können diese Störungen für die entstandenen Netzbezirke prozentual völlig unterschiedliche Werte annehmen. Um auch in einer derartigen Situation die Energieversorgung aller Verbraucher aufrecht erhalten zu können, müssen dynamische Vorgänge sowohl nach Überschuß wie auch nach Mangel von Leistung in den verbleibenden Bezirken im Inselnetz beherrscht werden. Die für die Berechnung der dynamischen Vorgänge zu verwendenden Modelle sind unterschiedlich, da in den beiden Fällen verschiedene Regeleinrichtungen der Netzbezirke und der Kraftwerke aktiviert werden.

Diese Untersuchungen müssen im Gegensatz zu früheren Betrachtungsweisen unter Berücksichtigung der beiden folgenden Gesichtspunkte durchgeführt werden:

- 1) Die bisher ausreichende quasistationäre Betrachtungsweise verschiedener Vorgänge des Zusammenwirkens von Kraftwerken und Netz muß zur Beschreibung und Beherrschung der Übergangsvorgänge nach Großstörungen auf die dynamische Betrachtungsweise ausgedehnt werden.
- 2) Um dynamische Untersuchungen - wie in vielen Fällen bisher durchgeführt - als isoliertes Problem für das Netz bzw. das Kraftwerk auffassen zu können, muß zunächst geklärt werden, ob für die betrachteten Größen eine dynamische Entkopplung vorausgesetzt werden kann.

Über Untersuchungen zur Beherrschung eines Leistungsmangels

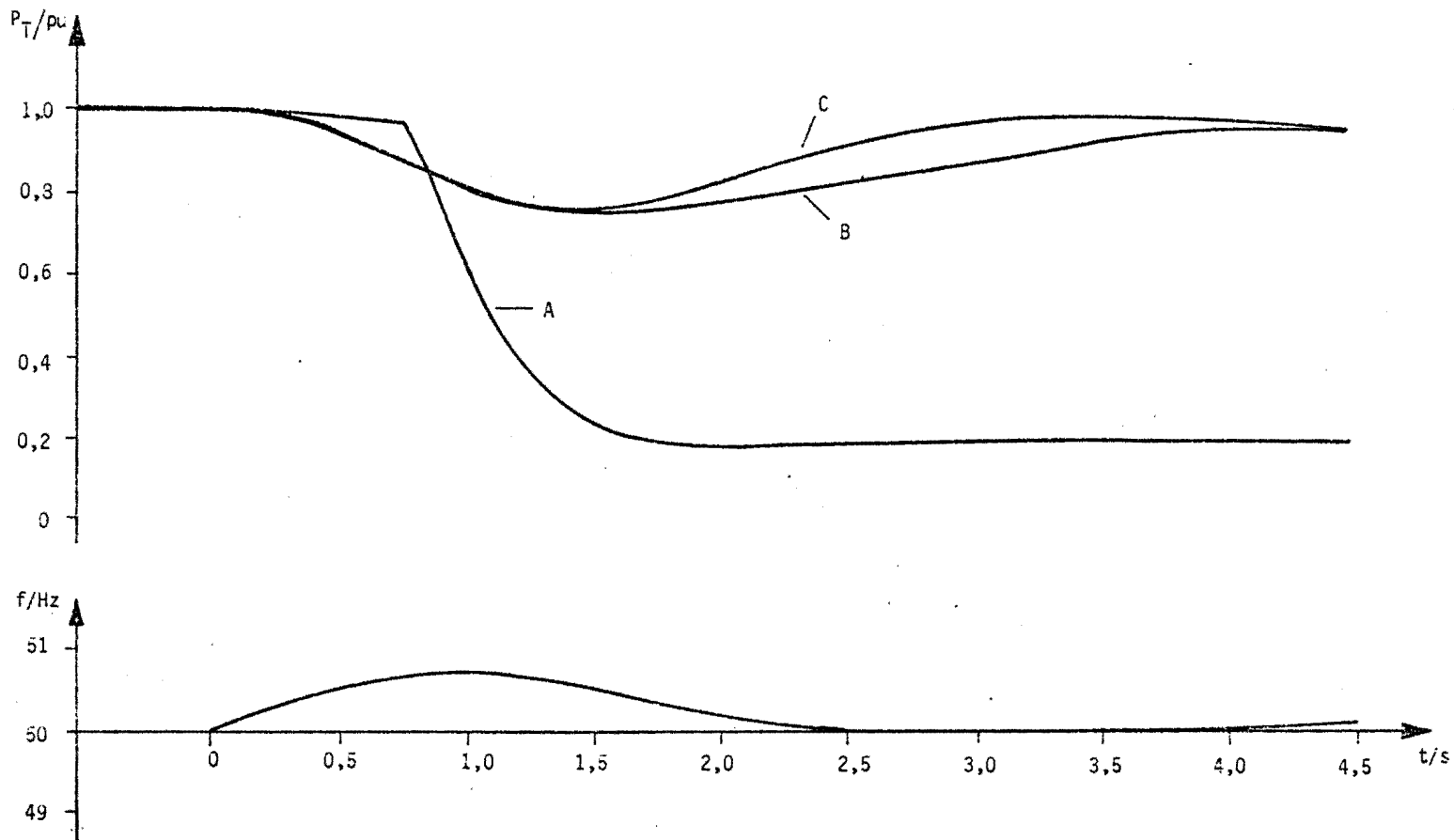


Bild 3.6: Simulation eines Lastabwurfs von 3500 MW auf 2800 MW

in Netzen, sowie die Modellierung und Regelung des Turbinendrehzahlverhaltens und die digitale Kraftwerksregelung, wurde in vergangenen Jahren berichtet. Neuer Schwerpunkt der Arbeiten lag in der Behandlung des dynamischen Verhaltens von Netzbezirken nach Leistungsüberschuß. Im Bereich der Kraftwerksregelung ist dieser Fall als Volllastabschaltung meist unter Weiterversorgung des Eigenbedarfs bekannt. Nach diesem Störfall treten hohe Beschleunigungen der Generator- und Turbinenschwungmassen auf. Zur Vermeidung unzulässiger Überdrehzahlen sind in jedem Block geeignete Regelinrichtungen vorgesehen. Diese sind auf die dynamischen Eigenschaften des vom Netz getrennten Blocks so abgestimmt, daß die Sicherheitsbestimmungen eingehalten werden. Tritt eine Überschulleistung und der damit folgende Frequenzanstieg in einem Netzbezirk mit mehreren Kraftwerksblöcken auf, sind die sich einstellenden Ausgleichsvorgänge in den einzelnen Blöcken über das Netz miteinander gekoppelt. Um das Verhalten des Gesamtsystems nach einem derartigen Störfall berechnen zu können und die daraus abgeleiteten zusätzlichen Forderungen an die Blockregelung zu erfüllen, wurden die in verschiedenen Kraftwerkstypen im Einsatz befindlichen Regelsysteme für den Überdrehzahlschutz erfaßt und modelliert. Bild 3.6 zeigt das Ergebnis einer Simulation eines Netzbezirkes, in dem die elektrische Last von 3500 MW sprunghaft auf 2800 MW reduziert wird. Die Frequenz steigt nach 1 sec auf 50,75 Hz und stellt sich nach etwa 2,5 sec wieder auf 50 Hz ein. Die Leistung teilt sich auf die drei zugrunde gelegten unterschiedlichen Kraftwerkstypen völlig ungleichmäßig auf, wie es aus dem Verlauf der mechanischen Antriebsleistungen der Turbinen P_T (normiert auf Nennleistungen der Blöcke) zu erkennen ist.

Anhand dieser Beispiele zeigt sich, daß die Leistungsaufteilung auf die einzelnen Blöcke nach dem Störfall nicht mehr unter Berücksichtigung der Forderungen eines sicheren Netzbetriebes vorgenommen werden kann. Der Überdrehzahlschutz in den einzelnen Blöcken muß so konzipiert werden, daß Forderungen des Netzbetriebes mitberücksichtigt werden können und eine dynamische Abstimmung gegenseitig vorgenommen werden kann.

3.2.2 Modellierung der Frequenz- und Spannungsabhängigkeit der Leistungsaufnahme von Verbrauchergruppen

Es ist seit langem bekannt, daß die Spannungs- und Frequenzabhängigkeit elektrischer Verbraucher u.U. entscheidenden Einfluß auf die Stabilität eines Netzes haben. Ob sich zum Beispiel eine starke Spannungsabhängigkeit stabilisierend oder destabilisierend auswirkt, ist abhängig von der Netztopologie, wie Untersuchungen in Norwegen und Schweden gezeigt haben.

Daraus ergibt sich für Netze mit in dieser Hinsicht kritischer Topologie die Notwendigkeit, insbesondere in bei der Netzführung anfallenden Berechnungen exakte Verbrauchermodelle zu verwenden.

Die einfachen Modellansätze

- a) Verbraucher ohne Spannungsabhängigkeit ($S = \text{konst}$)
- b) Verbraucher mit linearer Spannungsabhängigkeit
($I = \text{konst}$)
- c) Verbraucher mit quadratischer Spannungsabhängigkeit
($Z = \text{konst}$)

- die aus der Zeit der "Netz-Analysatoren" stammen -
sind äußerst grobe Näherungen und können zu falschen Simulationsergebnissen führen.

Modelle, die auf der Grundlage statistischer Erhebungen gewonnen wurden, weisen bereits eine wesentlich höhere Genauigkeit auf, haben jedoch als prinzipiellen Nachteil, daß die sich stets ändernde Lastzusammensetzung nicht erfaßt wird.

Um zuverlässige Simulationsergebnisse erzielen zu können, ist ein Verbrauchermodell zu fordern, das ständig der sich ändernden Verbraucherstruktur angepaßt wird.

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Verbrauchergruppe ohne Eigenerzeugung betrachtet, die über eine zentrale Einspei-

sung versorgt wird, welche z.B. in Lastflußrechnungen als Lastknoten dargestellt wird. Bei einer solche Verbrauchergruppe sind sowohl

- die Höhe des gesamten Leistungsbezuges als auch
- die Kombination von statischen und dynamischen (motorischen) Verbrauchern

stochastische Größen, bedingt durch zufällige Zu- und Abschaltungen von Einzelverbrauchern.

Für diese Verbrauchergruppe soll ein Modell der Form

$$P_i = P_i (f, U_i, t)$$
$$Q_i = Q_i (f, U_i, t)$$

gefunden werden, wobei U_i die Spannung des Lastknotens i und f die Netzfrequenz sein soll. Das Modell ist nicht-linear und enthält zeitabhängige Koeffizienten. Es sollte jedoch leicht indentifizierbar sein und so einfach gehalten werden, daß es in vorhandene Programme für die dynamische Simulation ohne Schwierigkeiten aufgenommen werden kann.

Aufgrund der Zeitvarianz muß ein Identifikationsverfahren gefunden werden, das "on-line" oder zumindest "quasi-on-line" die Nachführung der Modellparameter übernimmt und so das Modell ständig der vorliegenden Verbraucherzusammensetzung anpaßt. Die Grundlage dieser Identifikation bilden Meßdaten, die während des ungestörten, stationären Betriebs aufgenommen werden. Eine gezielte Störung des Betriebs - z.B. durch Transformatorstufung - zum Zwecke der Identifikation muß aus Gründen der Versorgungssicherheit ausgeschlossen werden.

Da das so bestimmte Modell die Frequenzabhängigkeit der betrachteten Last berücksichtigt, ist es auch beim Entwurf von Frequenz- Leistungsreglern einsetzbar und liefert Informationen über den sogenannten "Selbstregeleffekt" von elektrischen Energieversorgungsnetzen.

3.2.3 Beeinflussungsprobleme parallelgeführter 380 kV und 110 kV Drehstromsysteme im Fehlerfall

Das Problem der Beeinflussung parallelgeführter Hochspannungsleitungen hat eine große Bedeutung für die Betriebsführung elektrischer Energieversorgungssysteme, wobei insbesondere die gegenseitige Beeinflussung von 380 kV und 110 kV Stromkreisen problematisch sein kann, wenn aus Platzgründen eine gemeinsame Trassenführung nicht vermieden werden kann. Ein wichtiges Problem ist dabei, beispielsweise die Auswirkung einer Störung im 110 kV System auf das ungestörte 380 kV System zu untersuchen und die resultierenden Strom- und Spannungsverhältnisse zu ermitteln. Bei der Untersuchung dieser Problemstellung ergeben sich zwei Hauptschwierigkeiten. Zum einen folgt aus der geometrischen Anordnung der auf gemeinsamer Trasse geführten Stromkreise, daß keine Möglichkeit besteht, durch eine vollständige Verdrillung Unsymmetrien auszuschalten; zum anderen sind neben symmetrischen Fehlern auch die Auswirkungen unsymmetrischer Kurzschlüsse bzw. einphasiger Leitungsunterbrechnungen zu untersuchen.

Ziel der Untersuchungen war es dementsprechend, eine einfache Methode zur Bestimmung von Phasenspannungen und Leiterströmen an für Hochspannungsübertragungsleitungen mit mehreren parallelgeführten Stromkreisen abzuleiten. Dabei war einmal der Normalbetrieb zu erfassen, zum anderen die Beeinflussung bei Annahme beliebiger Fehler zu ermitteln. Hierzu wurde unter Verwendung der Theorie symmetrischer Komponenten ein äquivalentes Modell für das zu untersuchende System abgeleitet, in dem sämtliche Kopplungen der einzelnen Stromkreise berücksichtigt werden. Grundlage für das Netzmodell war die in Bild 3.7 dargestellte Netzstruktur.

Ausgehend von einem internen System, dessen Grenzbedingungen bezüglich der untersuchten Hochspannungsleitungen als bekannt vorausgesetzt wird, führen vier Hochspannungs-

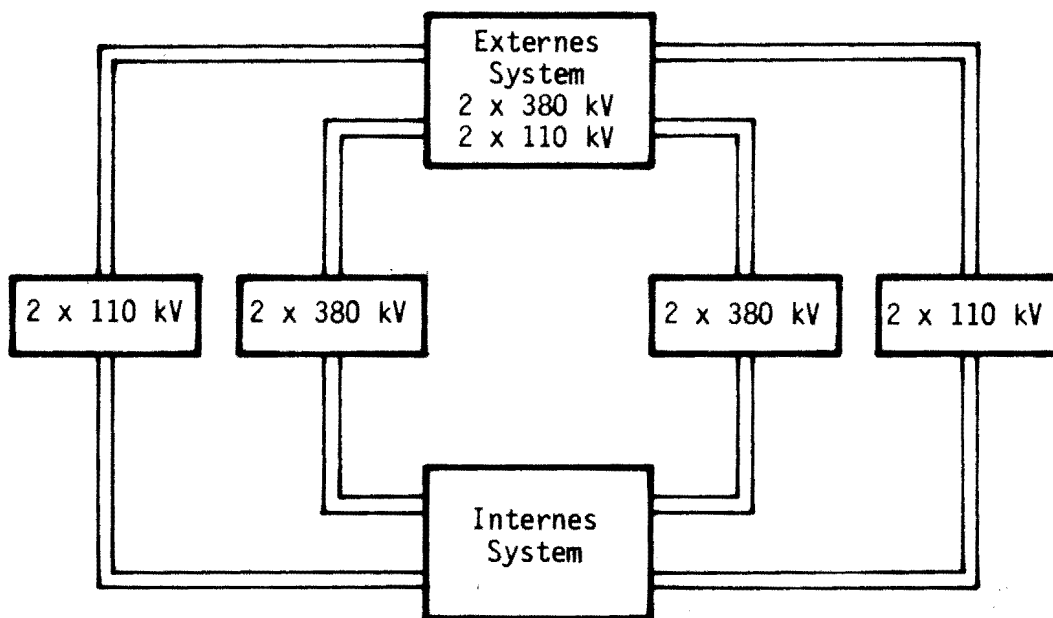


Bild 3.7: Untersuchte Netzstruktur

leitungen (2 x 380 kV, 2 x 110 kV) auf unterschiedliche Trassen zum externen System, in dem die Leitungen über eine bestimmte Entfernung auf einer gemeinsamen Trasse verlaufen. Die verwendete Methode erlaubt eine große Flexibilität zur Untersuchung gleichzeitiger Längs- und Querfehler. Nachdem das Programm im wesentlichen abgeschlossen ist besteht das Ziel der weiteren Aktivitäten darin, einige praktische Problemstellungen näher zu untersuchen, und eine Anpassung der auf einem Großrechner erstellten Programme auf einen Prozeßrechner zu realisieren.

Bericht: EV 8032

Marcus Schilling

3.3 On-line Führungs- und Regelalgorithmen für den Netz- und Kraftwerksbetrieb

Im Bereich der Kraftwerksautomatisierung sind die bisherigen Untersuchungen für den Reglerentwurf für einen konkreten Fall angewendet worden. Es hat sich gezeigt, daß die a priori vorgegebenen Randbedingungen sicher eingehalten werden können. Wichtig sind für die Zukunft Überlegungen, wie das benutzte Reglerentwurfsverfahren systematisch und im Hinblick auf Inbetriebnahmeprobleme vereinfacht werden kann.

Die Fortsetzung der bisherigen Arbeiten auf dem Gebiet der optimalen Lastflußberechnung konzentrieren sich auf die Blindleistungs-Spannungsregelung. Dabei hat das Drehstromnetz-Modell erneut gezeigt, daß mit seiner Hilfe neue Überlegungen effizient und gründlich geprüft werden können. Die Unterteilung in Tertiär-, Sekundär- und Primärregelung für die Spannungshaltung führt zu einer Verbindung bereits vorhandener Lösungen mit neuen Ansätzen. Ergänzt werden die Untersuchungen durch die Analyse der Erregungsregelung großer Synchrongeneratoren. Beim Vergleich von Messungen und Simulationsergebnissen konnte ein hohes Maß an Übereinstimmung gefunden und damit auch ein Beitrag zur Verbesserung der dynamischen Stabilität erzielt werden.

Die Bedeutung der Mikrorechner auf dem Gebiet der Energietechnik hat in den letzten Jahren erheblich zugenommen. Da diese Tendenz in den kommenden Jahren anhalten wird, ist es wichtig, durch eigene Forschungs- und Entwicklungsarbeiten die notwendigen Vorbereitungen durchzuführen, um so auch den Anforderungen eines aktuellen Lehrangebotes nachkommen zu können. Weil das Spektrum der möglichen Anwendungen außerordentlich breit ist, ist die Konzentration auf ein Thema notwendig. Für die erfolgreiche Durchführung der Arbeiten sind die Möglichkeiten des Drehstromnetzmodelles voll ausgeschöpft worden. Dabei ist die Projektierung des Einsatzes von Mikrorechnern für die automatische

inbetriebnahme des Drehstrom-Netzmodelles abgeschlossen worden, so daß mit der Realisierung bereits angefangen worden ist.

3.3.1 Dezentrale Regelung eines thermischen Kraftwerkes im Festdruckbetrieb

Der Anteil der Kraftwerksblöcke mit Festdruckbetrieb ist in letzter Zeit zu Gunsten der Gleitdruckblöcke aus Gründen der Wirtschaftlichkeit immer mehr zurückgegangen. Die Bedeutung der Festdruckregelung ist dadurch im gleichen Maße gestiegen, da nur diese Kraftwerke sich ohne Verzug an der Netzregelung beteiligen können. Es muß daher angestrebt werden, daß zu jedem Zeitpunkt die volle Regelleistung zur Verfügung steht. Dieses Ziel kann nur durch eine zentrale digitale Regelung unter Einsatz adaptiver Regelalgorithmen zufriedenstellend erreicht werden.

Das heutige leittechnische Konzept beruht aber auf einer Unterteilung in verschiedene hierarchische Ebenen und eine dezentrale Gliederung der Automatisierungseinrichtungen. Dadurch wird die Betriebssicherheit gegenüber einer zentralen Prozeßrechnerführung wesentlich erhöht. Bei Störungen in den oberen Hierarchieebenen werden deren Ausgangssignale durch die Ausgangssignale nachgeführter Sollwertspeicher ersetzt. Mit der Einschränkung, daß der Automatisierungsgrad um einige Stufen reduziert wird, kann der Betrieb ungestört weitergehen.

Durch das hierarchische Konzept wird aufgrund der starken Kopplung der Blockregelgrößen untereinander der Einsatz adaptiver Regler unmöglich. Es muß daher zum einen verstärkt Gewicht auf eine exakte Modellbildung gelegt werden; zum anderen müssen in den Fällen, in denen eine genaue Modellierung aufgrund nicht bekannter oder nicht konstanter Systemparameter unmöglich ist, parameterunempfindliche Regler zum Einsatz kommen.

Für die Blockregelgrößen eines Kraftwerkes im Festdruckbetrieb wurde deshalb eine digitale Regelung entworfen, die die besonderen Eigenschaften von dezentral eingesetzten Mikrorechnern berücksichtigt.

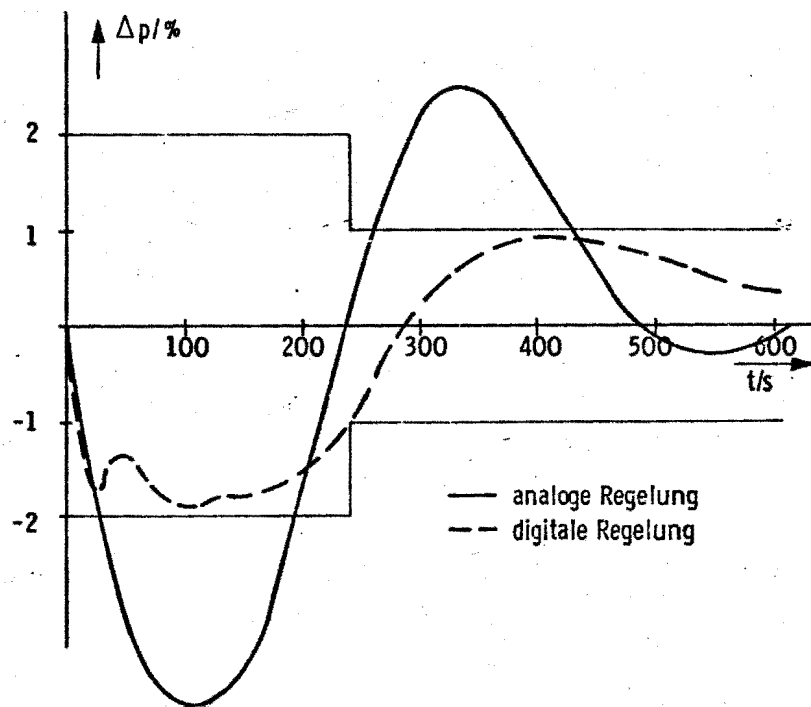


Bild 3.8: Verlauf des Frischdampfdruckes nach einem Leistungssprung

Diese Regelung ermöglicht eine erhebliche Verringerung der maximalen Druckabweichungen ohne stärkere Beanspruchung der Stellorgane, wie der Vergleich mit einer konventionellen analogen Regelung zeigt. Als Beispiel ist im Bild 3.8 der Frischdampfdruck nach einer sprunghaften Änderung des Leistungswertes als Funktion der Zeit dargestellt.

Berichte: EV 8021, EV 7941

Jürgen Voß

3.3.2 Einsatz neuer digitaler Regelkonzepte für die zentrale Führung elektrischer Energieversorgungssysteme

Im Gegensatz zum globalen Problem der Frequenz- Leistungsregelung ist die Spannungs- Blindleistungsregelung ein lokales Problem, das trotzdem koordinierte Regelungsaktionen erfordert. Die zentrale Koordination ist notwendig, um die Rückwirkungen der einzelnen Regelungsaktionen im lokalen Bereich zu eliminieren.

Als Beispiel sei genannt, daß prinzipiell von jedem Generator im vermaschten Netz das Spannungsniveau irgendeines Netzknotens zu beeinflussen ist. Welche Generatoren jedoch zum Erreichen einer gewünschten Spannung zweckmäßigerweise eingesetzt werden, kann nur eine zentrale Regelung entscheiden, da auch die Rückwirkung der Spannung auf die Blindleistungsabgabe der übrigen Generatoren beachtet werden muß. Im Netz in Bild 3.9 ist das Spannungsniveau des Knotens 1 mit dem Generator 1 durch zusätzliche Blindleistungsabgabe oder -aufnahme gemäß der Kennlinie 1 in Bild 3.10 zu beeinflussen. Mit den übrigen Generatoren im Netz kann aber auch entsprechend der Kennlinie 2 in Bild 3.10 auf die Spannung und die Blindleistungsabgabe im Knoten 1 eingewirkt werden. Wird nun in Bild 3.10 vom Punkt A ein neuer idealer Arbeitspunkt B angestrebt, ist dies nur unter Ausnutzung beider Kennlinien möglich, was einer Koordination der Regelungsaktionen bedarf.

Für die on-line Spannungs-Blindleistungsregelung wurde daher ein Regelungsalgorithmus entwickelt, der bei koordiniertem Einsatz der Regelungseinrichtungen das Netz in einen Zustand führt, der als sinnvoll angesehen werden kann. An kleineren Netzen wurde die Wirkung der Wahl unterschiedlicher Zielfunktionen ermittelt, die dann in einer Simulation auch auf größere Netze angewendet wurde. Da die Zielfunktion letztlich den sinnvollen Netzbetrieb erzwingen muß, wurde besonderen Wert auf die Wahl der Zielfunktion gelegt. Es zeigte sich dabei, daß Zielfunktionen

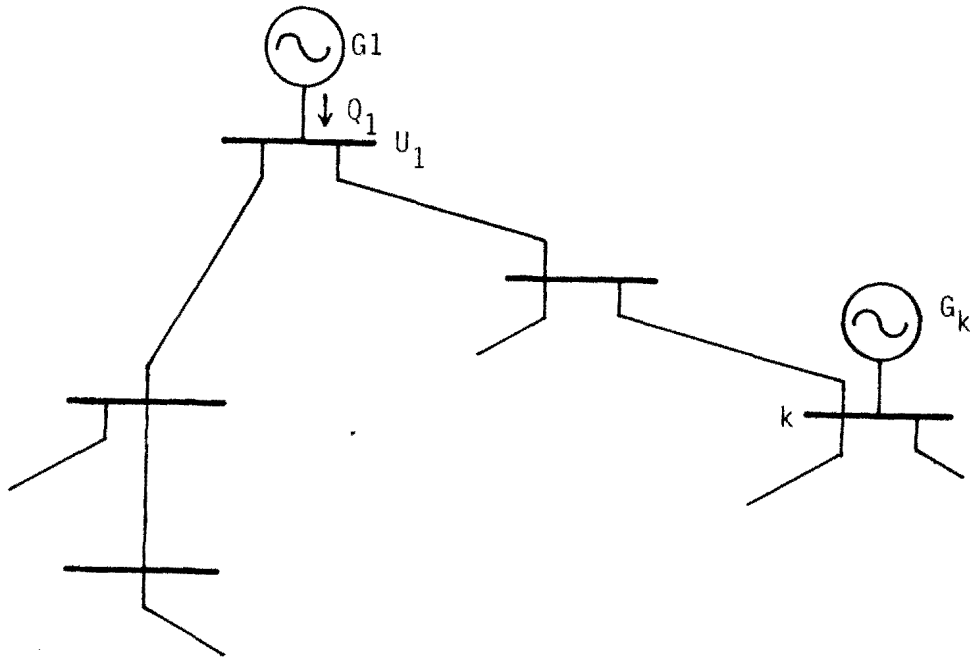


Bild 3.9: Generator 1 im Energieversorgungsnetz

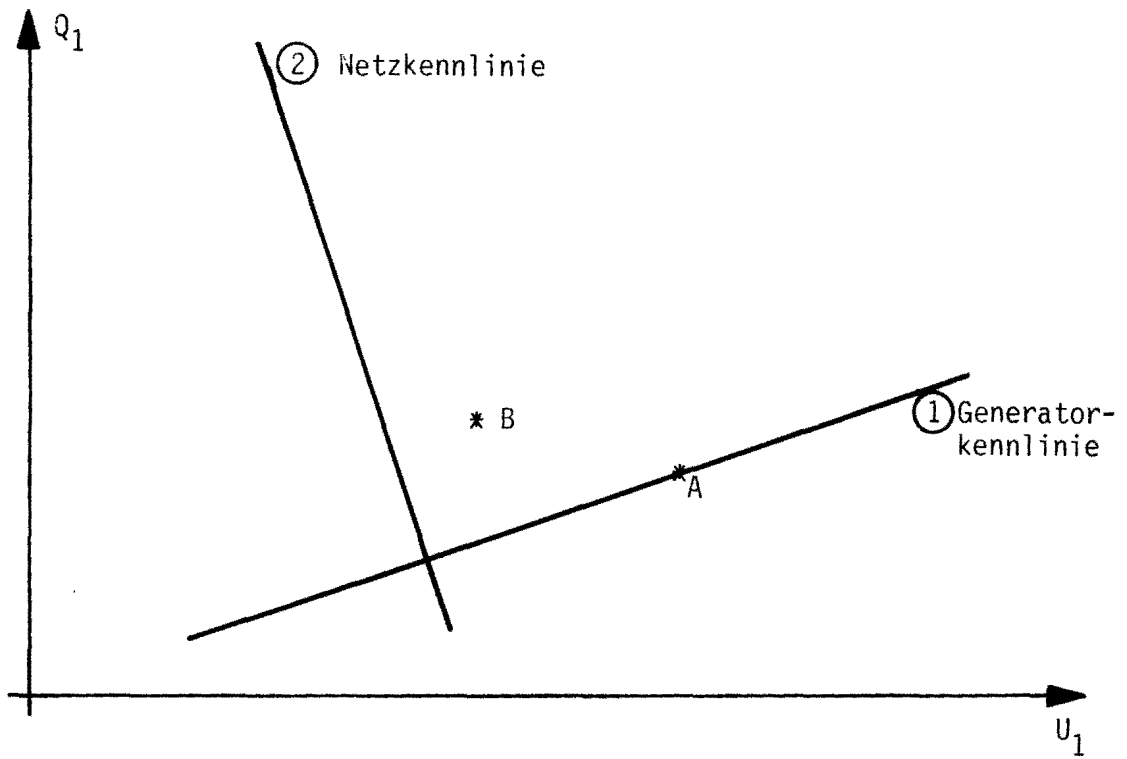


Bild 3.10: Blindleistungs-Spannungskennlinien am Knoten 1 von Generator 1 und des Netzes

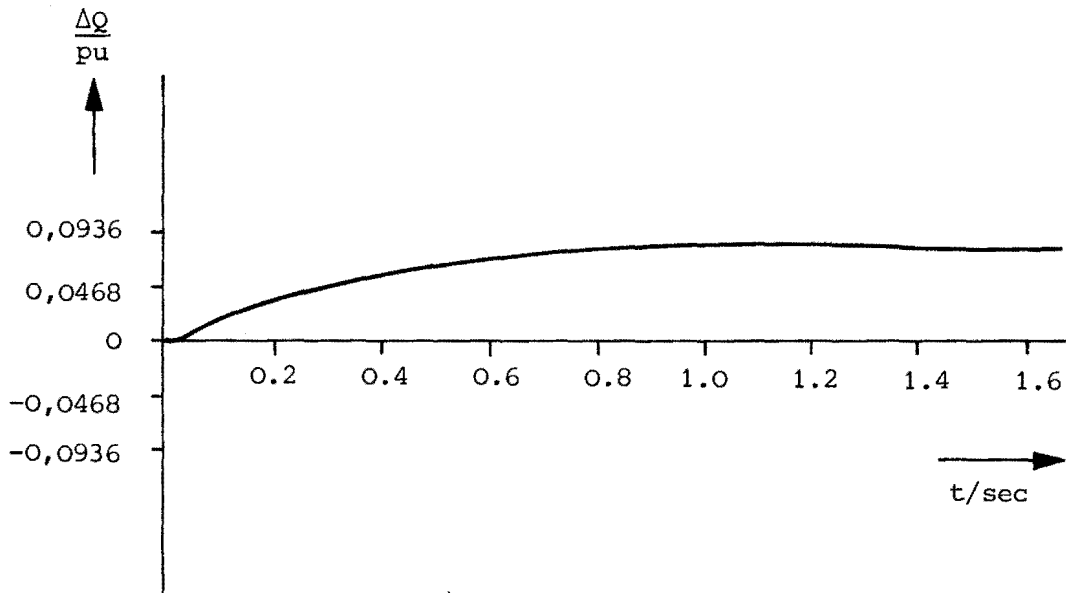
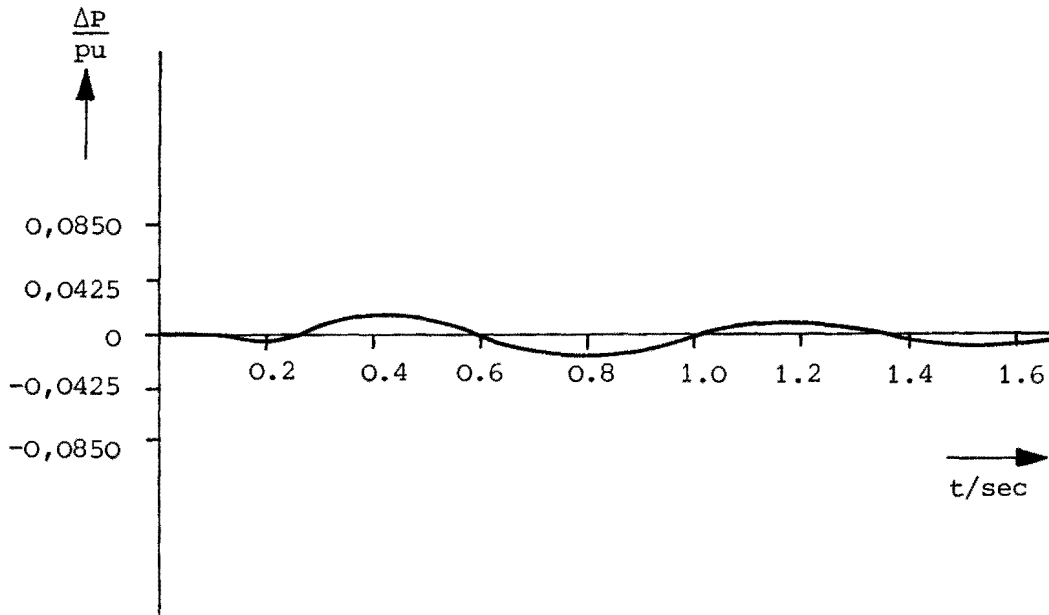


Bild 3.11: Änderung der Wirkleistungsabgabe (oben) und Blindleistungsabgabe (unten) eines Synchrongenerators bei Stiftung des Blocktransformators

schiedlichen Netztopologien und Lastzuständen.

Im Gegensatz zur statischen Betrachtungsweise der fast vollkommenen Entkopplung zwischen der Q/U und der P/F-Regelung ist beim dynamischen Verhalten stets die Rückwirkung der einzelnen Regelkreise der Synchronmaschine aufeinander zu beachten. Als Beispiel zeigt Bild 3.11 die an einer realen Maschine gemessene Rückwirkung der geänderten Blindleistungsabgabe auf die Wirkleistungsabgabe.

In einer digitalen Simulation mit der Simulationssprache THTSIM wurde mit Hilfe des vereinfachten Blockschaltbildes diese Rückwirkung relativ exakt simuliert; sie diene als Grundlage für weitere Untersuchungen.

Unter besonderer Beachtung der betriebsbedingten Anforderungen wurden Richtlinien vorgeschlagen, mit denen die Parameter des Erregersystems und des "Power-System-Stabilizer" eingestellt werden können.

Die Wirkung des Verfahrens auf die Dynamikverbesserung der Synchronmaschine in typischen Energieversorgungsnetzen wurde durch Simulationsrechnungen verifiziert.

Diese Arbeit wurde von der Alexander-von-Humboldt-Stiftung gefördert.

Berichte: EV 8005, EV 8016

Alvaro Ramos

3.3.4 Einsatz von Mikrorechnern in der Energietechnik

Obwohl der Prozeßrechnereinsatz in der Energietechnik noch nicht abgeschlossen ist, hat schon eine neue Entwicklung eingesetzt, die Mikroprozessortechnik. Das Eindringen der Mikroprozessoren in die Energietechnik wird in den nächsten Jahren erheblich zunehmen. Sobald sie mehrere Funktionen übernehmen oder bei gleicher Leistung preisgünstiger sind als herkömmliche Systeme, verdrängen sie diese. Wenn man an die Einsatzmöglichkeiten der Mikrorechner in der Energietechnik denkt, so wird der Einsatz hauptsächlich nicht darin liegen, den Prozeßrechner zu ersetzen, sondern vielmehr darin, konventionelle Geräte wie z.B. Netz- und Generatorschutzeinrichtungen zu ersetzen. Durch die freie Programmierbarkeit dieser Systeme lassen sich diese Geräte optimal den jeweiligen Erfordernissen anpassen.

Um Anwendungsmöglichkeiten für den Einsatz von Mikrorechner-Systemen im Bereich der Energietechnik zu untersuchen, wurde in dem Berichtsjahr ein Mikrocomputersystem (Bild 3.12) auf Z-80 Basis beschafft. Um einen möglichst realistischen Einsatz dieser Systeme bezüglich Störeinflüsse bzw. der Kopplung von Mikrorechnern mit dem Starkstromnetz zu untersuchen, ist der Mikrorechner mit dem Drehstromnetzmodell verbunden.

Zur Führung des Netzmodells ist ein Prozeßrechner PDP 11/40 - DP 1000 vorhanden, der grundsätzlich alle Schalt-, Meß- und Regelaufgaben zentral übernehmen kann. Bei komplexen Netzführungsaufgaben stößt man jedoch auf Grund der Fülle von Meßdaten und Regelkreisen an Grenzen, die durch die relativ geringe Rechengeschwindigkeit des Prozeßrechners gegeben sind. Als Ausweg bietet sich eine dezentrale Meßwertverarbeitung mit Mikrorechnern an. Bild 3.13 zeigt eine mögliche Systemstruktur für eine dezentrale Meßwertverarbeitung mit Mikrorechnern am Drehstromnetzmodell.

Vorgesehen ist, die gesamte Steuerung der Modellkraftwerke

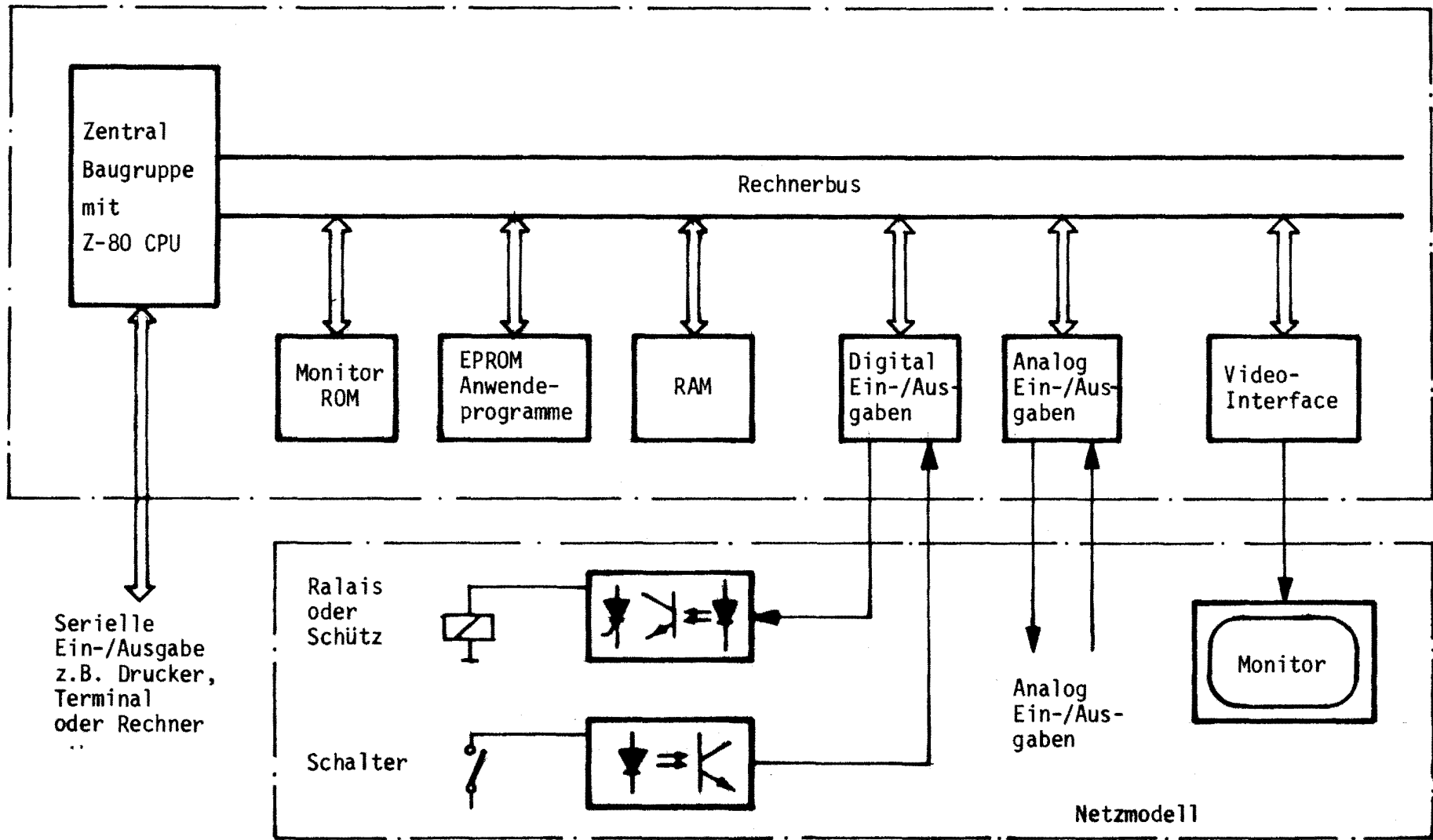


Bild 3.12: Konfiguration des Mikrorechnersystems

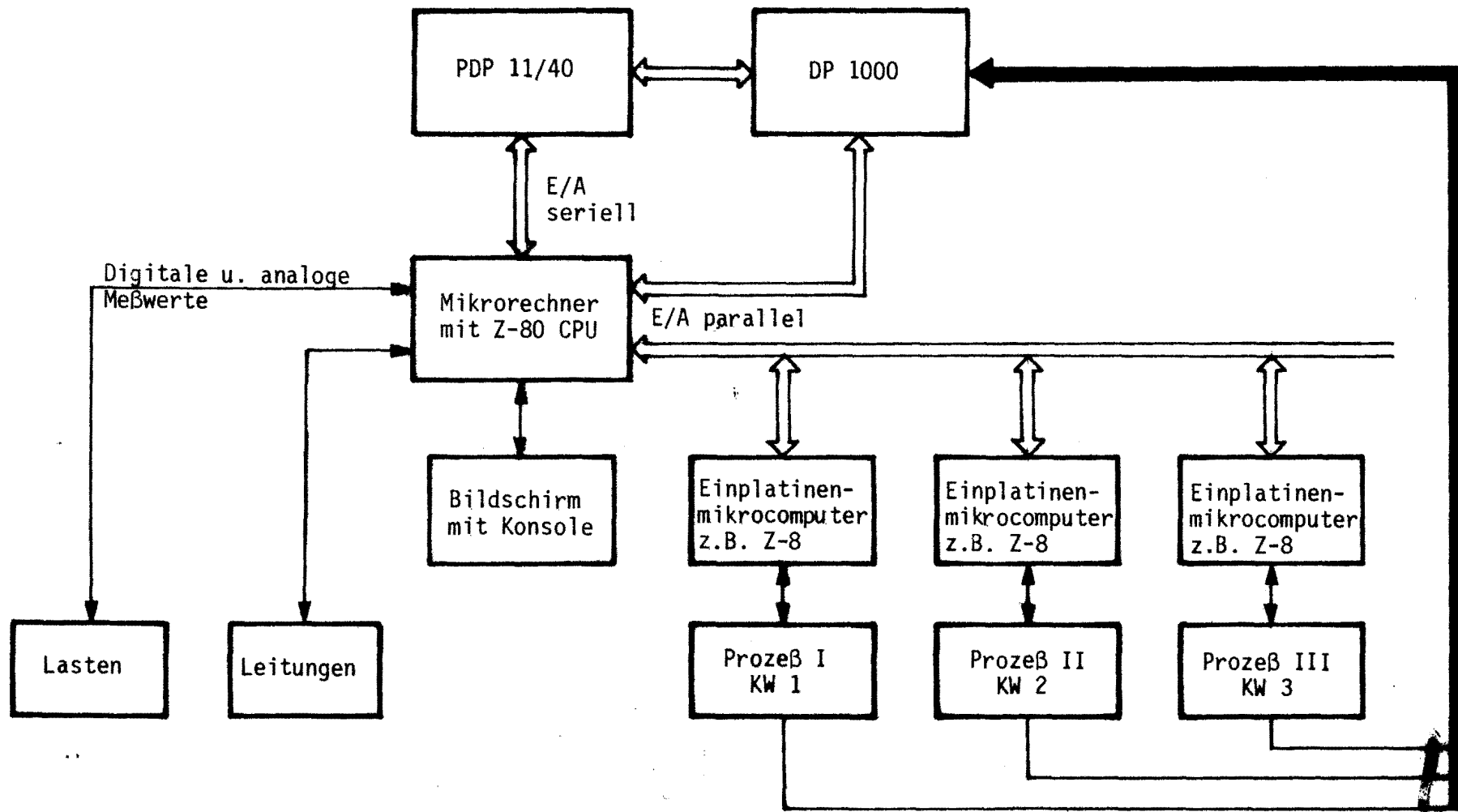


Bild 3.13: Mögliche hierarchische Systemstruktur des Mikrorechnereinsatzes am Netzmodell

mit Mikrorechnern vorzunehmen. Über Steuerquittierschalter an der Mosaiktafel können sämtliche Schaltfunktionen wie bei der konventionellen Steuerung durchgeführt werden. Diese Bedingung ist eine wesentliche Forderung, um die Bedienung des Modells nicht zu erschweren. Die gesamten zur Ein- und Ausschaltung der Kraftwerke erforderlichen Schaltfolgen übernimmt der Mikrorechner. Auch die Überwachung von Grenzwerten kann der Rechner übernehmen und bei Überschreitung den gefährdeten Anlagenteil abschalten. In diesem Fall wird dies dem übergeordneten Prozeßrechner mitgeteilt, welcher dann weitere Schalt- und Regelmaßnahmen z.B. Umschaltungen vornehmen kann.

Bericht: EV 8006

Willi Horenkamp

3.3.5 Erfassung des Schaltzustandes von Unterstationen und Ausgabe auf einem Sichtgerät

Um den aktuellen Schaltzustand einer Unterstation bzw. eines am Netzmodell gesteckten Netzes auf einem Bildschirm darzustellen, wurde ein Assembler-Programm für einen Z-80 Mikroprozessor entwickelt.

Über Spannungsteiler und Optokoppler wird dem Eingabeport des Mikrocomputersystems der jeweilige Schaltzustand des Netzes mitgeteilt. Das vorhandene Netzbild ist in einem EPROM abgelegt, so daß bei Netzänderungen das EPROM gelöscht und neu programmiert werden kann. Die veränderlichen Daten (Schalterstellungen) werden im RAM-Bereich abgelegt. Ändert sich der Schaltzustand des Netzes, so wird eine Interruptforderung an den Rechner gestellt. Falls der Rechner nicht gerade mit einem Programm höherer Priorität beschäftigt ist, wird das laufende Programm unterbrochen und aus der am Eingangsport vorliegenden Bitkombination der Schaltzustand berechnet. Nach einer Verzögerungszeit, welche abhängig von den Schaltzeiten der

verwendeten Leistungsschaltern ist, wird der anfordernde Port noch einmal abgefragt und mit dem vorherigen Byte verglichen. Sind beide gleich, so wird der neue Schaltzustand im RAM abgespeichert. Bei Ungleichheit beider Abfragen, wird der Schaltzustand des entsprechenden Bits noch einmal abgefragt und mit den beiden vorherigen Schaltzuständen verglichen. Ist dieser Zustand jetzt gleich einem der beiden vorherigen Werte, so wird dieser Schaltzustand abgespeichert. Hiermit wird gewährleistet, daß Meßfehler größtenteils eliminiert werden.

Das Programm wurde so ausgelegt, daß nur die letzten 32 Schaltzustände im RAM abgespeichert werden. Auf dem Sichtgerät wird jeweils der aktuelle Schaltzustand angezeigt. Bei jeder Änderung des Schaltzustandes wird dem übergeordneten Rechner, in unserem Fall der PDP 11/40 mit DP 1000, mitgeteilt, daß eine Schaltzustandsänderung vorliegt und abgerufen werden kann. Eine sinnvolle Erweiterung wäre der Anschluß einer Echtzeituhr an dem Prozessor. Damit läßt sich jede Änderung auch zeitlich festhalten, und für spätere Kontrollen auf einem Drucker ausgeben.

Willi Horenkamp

4. VORTRÄGE

4.1 Beiträge für das Kolloquium

31. Oktober 1980 S. König,
Gas-, Elektrizitäts- u. Wasserwerke
Köln AG,
"Abwicklung von EVU-Prozeßrechnerpro-
jekten"
3. November 1980 G. Howe,
"Wirk- und Blindleistungsoptimierung
in elektrischen Energieübertragungs-
systemen"
5. Dezember 1980 Dr. B. Cuno,
AEG-Telefunken, Energie- und Industrie-
technik, Frankfurt
"Digitale Leistungs-Frequenzregelung"

4.2 Externe Vorträge von Lehrstuhlmitgliedern

4. Februar 1980 E. Handschin,
"Einsatz der EDV beim Betrieb elektri-
scher Netze; Estimation, Ausfallsimu-
lations- und Kurzschlußrechnung"
FGH-Symposium, Hamburg
22. Mai 1980 E. Handschin,
"Dynamisches Langzeitverhalten elek-
trischer Energieversorgungssysteme",
Gesamthochschule Duisburg
11. Juni 1980 E. Handschin,
"The use of minicomputers for techni-
cal applications in the distribution
of electricity" UNIPEDE-Seminar,
Trondheim

25. Juni 1980 E. Handschin,
"Load modelling and prediction in
electric power systems", IEE-Konferenz
"Power System Monitoring and Control",
London
17. September 1980 J. Voß,
"Digitale Kraftwerksautomatisierung",
Technische Hochschule, Delft
17. September 1980 E. Handschin,
"Dynamische Vorgänge in elektrischen
Energieversorgungssystemen",
Technische Hochschule, Delft
24. September 1980 E. Handschin,
Plenarvortrag "Lastfluß-Optimierung
unter Berücksichtigung von Sicherheits-
nebenbedingungen", ÖGOR/SVOR Tagung,
Wien
2. Oktober 1980 E. Handschin,
"Einsatz von Kleinrechnern für die
technischen Aufgaben der Energiever-
teilung", IHK Seminar "Anwendung von
Mini- und Mikrocomputern", Dortmund
7. Oktober 1980 E. Handschin,
"Langzeitstabilität elektrischer Netze:
Theorie, Simulation und Messung", und
"Lehr- und Forschungsbetrieb an der Ab-
teilung Elektrotechnik der Universität
Dortmund", Technische Hochschule Gliwice,
Polen
16. Dezember 1980 E. Handschin,
"Netzbetrieboptimierung unter Berück-
sichtigung von Sicherheitsnebenbedin-
gungen", Universität Stuttgart

5. NATIONALE UND INTERNATIONALE BEZIEHUNGEN

- 18.1.- N. Aschöwer,
19.1.1980 Aussprache über Lastflußprogramme bei BBC,
Ladenburg
- 22.1.1980 E. Handschin,
Gründungsausschuß-Sitzung des GMR/ETG-
Fachausschusses "Netzregelung", Frankfurt
- 10.3.1980 E. Handschin,
FGH-Symposium "Einsatz der EDV beim Be-
trieb elektrischer Netze", Hamburg
- 11.3.- N. Aschöwer, E. Handschin, J. Voß,
12.3.1980 ETG-Fachtagung "Netzbetrieb", Hamburg
- 14.3.1980 E. Handschin,
16. Sitzung des Arbeitskreises "Technisches
Rechnen" der FGH, Mannheim
- 9.4.1980 M. Gacka, H. Maiweg, W. Horenkamp, K.D. Tesch
Besuch der Hannover-Messe
- 10.4.1980 E. Handschin, M. Gacka, R. Woltemate,
H. Maiweg
Besprechung mit Herrn Thüner, BAG-Lippe,
über das BMFT Forschungsvorhaben "Erdschluß
in Mittelspannungsnetzen des Steinkohleberg-
baus", Bochum
- 23.4.1980 E. Handschin, E. Grebe, T. Reißing, J. Voß
Besprechung mit Herrn Dr. Cuno, AEG-Tele-
funken, über "Digitale Frequenz- und Lei-
stungsregelung", Dortmund
- 24.4.1980 E. Handschin,
Sitzung des Deutschen Arbeitskreises zum
CIGRE Studienkomitee SC 32, Ladenburg

- 26.4.1980 Tag der offenen Tür an der Universität
Dortmund
- 5.5.- E. Handschin, T. Reißing,
8.5. 1980 Mitarbeit am FGH-Seminar "Statistische
Berechnungsgrundlagen für die elektrische
Energieversorgung", Seeheim
- 19.5.1980 E. Handschin, M. Gacka, R. Woltemate,
H. Maiweg,
Besichtigung des Untertagebetriebs der Zeche
"Nordstern" in Gelsenkirchen
- 6.6.1980 E. Handschin, T. Reißing,
Besprechung mit der Firma Floating Point
Systems über "Parallelprozessoren für ener-
gietechnische Anwendungen", München
- 10.6.- E. Handschin,
12.6.1980 UNIPEDA-Seminar: "Mini- und Mikrorechner
in EVU's", Trondheim
- 18.6.1980 J. Voß,
2. Sitzung des GMR/ETG-Fachausschusses
"Netzregelung", Frankfurt
- 24.6.- E. Handschin,
26.6.1980 Int. Konferenz des IEE: "Power System
Monitoring and Control", London
- 25.6.- J. Voß,
27.6.1980 Fachtagung "Anwendung von PEARL in der
Netzleittechnik von Elektrizitätsver-
sorgungsunternehmen", Deggendorf
- 27.6. 1980 E. Handschin,
Besprechung mit dem National Coal Board
über Elektrotechnik unter Tage, Doncaster

- 1.9.-
3.9.1980 E. Handschin,
Internationale CIGRE-Konferenz und Sitzung
des Studienkomitees SC 32, Paris
- 8.9.1980 E. Handschin, H. Maiweg, M. Gacka,
Informationsaustausch über Erdschlußgeräte
der Firma Hartmann & Braun, Heiligenhaus
- 10.9.1980 E. Handschin, J. Voß,
Gespräch mit Herrn Zimmermann über digi-
tale Kraftwerksautomatisierung, BBC Mannheim
- 17.9.1980 E. Handschin, J. Voß, W. Horenkamp, H. Graf
Besuch des Instituts für elektrische Ener-
gieversorgung, Professor Boerema, Technische
Hochschule Delft
- 22.9.-
24.9.1980 E. Handschin,
ÖGOR/SVOR Tagung, Wien
- 29.9.-
1.10.1980 E. Grebe,
Teilnahme am Workshop "Robuste Regelung",
Interlaken/Schweiz
- 2.10.1980 H. Maiweg,
Besichtigung der Calor Emag Geräteprüfung,
Ratingen
- 6.10.-
10.10.1980 E. Handschin,
Besuch der Technischen Universitäten in
Gliwice und Warschau
- 14.10.1980 N. Aschöwer, W. Horenkamp, K.D. Tesch,
H. Maiweg
Besuch der Interkama, Düsseldorf

- 17.10.1980 J. Voß,
Gespräch mit Herrn Professor Dzedzic,
Universität Danzig, über Struktur, Auf-
bau und Lehre der Universität Dortmund und
der Universität Danzig, Dortmund
- 21.10.1980 E. Handschin, E. Grebe, J. Voß,
Gespräch mit Herrn Dr. Han Ying-Huo,
Universität Erlangen, über die Simulation
dynamischer Netzvorgänge, Dortmund
- 30.10.1980 E. Handschin,
17. Sitzung des Arbeitskreises "Technisches
Rechnen" der FGH, Dortmund
- 4.11.1980 E. Handschin,
3. Sitzung des GMR/ETG Fachausschusses
"Netzregelung", Brauweiler
- 4.12.1980 E. Handschin und Mitarbeiter
Besuch von Herrn Professor K. Reichert am
Lehrstuhl für elektrische Energieversorgung,
Dortmund

6. VERÖFFENTLICHUNGEN UND BERICHTE

6.1 Veröffentlichungen

E. Handschin, E. Grebe, G. Howe: "Optimale Netzführung unter Berücksichtigung von Sicherheitsbedingungen", Forschungsbericht des Landes Nordrhein-Westfalen Nr. 2975, Westdeutscher Verlag 1980, EV 7943

Drei entscheidende Elemente zur Lösung des Problems der zentralen Netzüberwachung und -führung nach optimalen wirtschaftlichen und sicherheitstechnischen Gesichtspunkten sind die kurzfristige Lastprognose, die stationäre Wirk- und Blindleistungsoptimierung und die Untersuchung des dynamischen Verhaltens des Energieversorgungssystems nach Störungen. Ergebnisse der drei Teilaufgaben sowie deren notwendige Zusammenbindung als übergeordnete Führungsaufgabe werden diskutiert.

R. Baumann, E. Handschin: "Bericht über U.S.-European Workshop on Systems Engineering for Power, Davos (Schweiz) 1979", etz. Bd. 101 (1980) Heft 14, EV 8031

J.-H. Nöller, E. Handschin: "The use of minicomputers for technical applications in the distribution of electricity", Proc. of the UNIPEDE Seminar on "The use of minicomputers in electricity supply undertakings", Trondheim, Juni 1980, EV 8015

The benefits gained from large computer systems in processing large data volumes or performing complex computations, e.g. the load flow calculation for large transmission networks, are indisputable. However, in a power supply utility, and especially in those departments which are involved with the technical aspects of power distribution, there are many problems where computer support would be advantageous but the use of a large central computer system too expensive.

In this case minicomputers can assist in performing

mathematical and organizational functions and thus help to achieve a quicker and more rational work flow. The increasing efficiency of minicomputers at the same or even decreasing costs will extend the fields of application in the future.

In this paper a data processing concept is presented which has been successfully used at a large German interconnected power utility. Typical applications for small peripheral computers are discussed using two examples. Finally, it is shown that the minicomputers available today are also capable of performing more complex functions.

E. Handschin, B. Lütke-Daldrup: "Load modelling and prediction in electric power systems", IEE Conference Publication Number 187, "Power system monitoring and control", EV 8018

The accurate load prediction is an important task in view of the centralized control of electric power systems. Indeed, the computer controlled operation and optimization depends to a large extent on the accuracy of the load prediction. Even small improvements in accuracy affect the operational costs. This paper describes a complete load forecasting scheme over on hour up to a week. The load data analysis leads to a four stage prediction scheme. First, on the basis of the periodic load behaviour a trend-periodic model is used for the base load modelling. The remaining prediction error is described by means of an autoregressive model. From the many external influences the temperature dependence is taken into consideration. These three submodels are used for the automatic load prediction. In view of a practical solution it is important that load forecasting can be done both for normal as well as special days. In the latter case there are not sufficient data available to run the prediction program in an automatic fashion. The operator must be able to add his knowledge of the load development in an interactive manner. This forms the fourth part of the model. From the many examples studied a few typical results obtained with real

data illustrate the performance of the procedure.

6.2 Forschungsberichte

J. Voß: "Prozeßautomatisierung in Kraftwerken", Vorlesungsmanuskript, April 1980, EV 7941

E. Grebe: "Entwurf einer Primärregelung", Interner Bericht, April 1980, EV 8022

A. Ramos: "Adequacy of Excitation Control System Response for System Dynamic Performance Improvement", Interner Bericht, Juli 1980 EV 8016

M.Th. Schilling, E. Handschin: "Solving Generalized Faults on Congested Right-of-Ways by Equivalent Multiports", Interner Bericht, August 1980, EV 8032

E. Handschin, W. Horenkamp, J. Voß: "Aufbau und praktischer Einsatz eines Drehstrom-Netzmodelles in Forschung und Lehre", Interner Bericht, November 1980, EV 8023

H.H. Graf: "Arbeiten zur Spannungs-Blindleistungsregelung", Interner Bericht, Dezember 1980, EV 8026

6.3 Diplomarbeiten

K. Homann: "On-line Implementierung von State Estimation für die Netzüberwachung", Diplomarbeit, März 1980, EV 8002

H.-J. Kothe: "Simulation eines prozeßrechnergeführten Verbundnetzbetriebes an einem Drehstromnetzmodell unter Einsatz von PEARL", Diplomarbeit, März 1980, EV 8004

N. Mannebach: "Spannungsregelung in elektrischen Energieversorgungssystemen", Diplomarbeit, März 1980, EV 8005

U. Post: "Dezentrale Meßwertverarbeitung mit einem Mikroprozessor für die digitale Synchronisierung", Diplomarbeit, März 1980, EV 8006

R. Woltemate: "Netzausfallberechnung unter Berücksichtigung vorher ermittelter Schwachstellen im zu untersuchenden Netzbereich", Diplomarbeit, März 1980, EV 8007

K.D. Honselmann: "Auslegung einer dezentralen Kraftwerksregelung", Diplomarbeit, August 1980, EV 8021

6.4 Studienarbeiten

G. Huerkamp: "Digitale Frequenzregelung unter Berücksichtigung von Systemänderungen", Studienarbeit, Januar 1980, EV 8001

J. Trzeciak: "Automatisches Meßwerterfassungssystem", Studienarbeit, März 1980, EV 8003

J. Marquard: "Schnelles entkoppeltes Lastflußverfahren mit Einbeziehung der Ausfallsimulation", Studienarbeit, April 1980, EV 8009

W. Pötter: "Beeinflussungsprobleme freigeschalteter Hochspannungsleitungen", Studienarbeit, September 1980, EV 8024

L. Nennstiel: "Stochastische Lastbeeinflussung an einem Drehstromnetzmodell", Studienarbeit, August 1980, EV 8027

M. Wrede: "Spannungsabhängigkeit von Lasten", Studienarbeit, Dezember 1980, EV 8028

6.5 Programmbeschreibungen

H.-J. Kothe: "Simulation eines prozeßrechnergeführten Verbundbetriebes an einem Drehstromnetzmodell unter Einsatz von PEARL", EVP 8002

K.-F. Hopp: "Identifikation des Prozesses Turbine-Drehzahlregelung eines Dampfkraftwerkes", EVP 8003

G. Mark: "Rechnerunterstützte Auswertung gemessener Sprungantworten zur Modellidentifikation", EVP 8004

R. Woltemate: "AUSTEL, Leitungsausfallsimulation mit Hilfe des Theorems von Tellegen", EVP 8005

G. Howe: "Wirk- und Blindleistungsoptimierung in elektrischen Energieübertragungssystemen", EVP 8006

7. Promotionen

Gerhard Howe: "Wirk- und Blindleistungsoptimierung in elektrischen Energieübertragungssystemen"

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

Tag der mündlichen Prüfung: 29. September 1980

Die Hauptaufgabe der zentralen Netzbetriebsführung eines elektrischen Energieversorgungssystems besteht darin, mit den zur Verfügung stehenden Betriebsmitteln eine kontinuierliche Versorgung der angeschlossenen Verbraucher mit elektrischer Energie zu jedem Zeitpunkt zu gewährleisten. Hierzu ist es insbesondere erforderlich, stationäre unzulässige Grenzwertverletzungen identifizieren zu können und entsprechende Abhilfemaßnahmen zu bestimmen, um durch Überlastung verursachte Betriebsmittelausfälle zu vermeiden.

Hierzu wurde ein optimales Lastflußprogramm entwickelt, in dem unterschiedliche aus der Netzsicherheit resultierende Nebenbedingungen berücksichtigt werden mit dem Ziel, durch kontinuierliche Steuerungsmaßnahmen für die Wirk- und Blindleistungseinspeisungen bzw. Transformatorübersetzungen bestehende Überlastung abzubauen. Im Hinblick auf eine on-line Implementierung wurden dabei über Sensitivitätsbeziehungen für die Wirk- und Blindleistungsgleichungen lineare Netz- und Sicherheitsnebenbedingungen abgeleitet, wodurch auf eine vollständige Lastflußberechnung innerhalb der Optimierung verzichtet werden konnte.

Durch Fehlerbetrachtungen wird nachgewiesen, daß der Gültigkeitsbereich des linearisierten Modells ausreichend ist. Die Verwendung beliebiger quadratischer Zielfunktionen erlaubt eine Anwendung des Verfahrens sowohl für die Wirk- als auch für die Blindleistungsoptimierung. Zusätzlich ist eine verlustminimale Einstellung der Blindleistungseinspeisungen und Transformatorübersetzungen möglich,

ohne daß die Übertragungsverluste explizit in der Zielfunktion enthalten sind. Anhand von numerischen Untersuchungen wird die Leistungsfähigkeit des Programms nachgewiesen, wobei sowohl die korrektive als auch die vorbeugende Optimierung eingeschlossen sind.