Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 66 (1975)

Heft: 17

Artikel: Systemtechnik in der elektrischen Energieversorgung

Autor: Handschin, E.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915309

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 16.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Systemtechnik in der elektrischen Energieversorgung [1])

Von E. Handschin

621.311 : 681.513.2

Die Systemtechnik befasst sich in der elektrischen Energietechnik mit den Ueberwachungs- und Führungsproblemen der Energieerzeugung, -übertragung und -verteilung. Die ausgeprägte hierarchische Struktur der anlagentechnischen Seite des Energiesystems führt zu einer entsprechenden Gliederung der systemtechnischen Aufgaben. Die grosse Zahl von Einzelinformationen, die zu Führungsbefehlen verknüpft werden müssen, zwingen zum Einsatz von Prozessrechnern. In zunehmendem Masse werden heute Aufgaben durch frei programmierbare Geräte gelöst, die früher durch spezielle Einzweck-Hardware abgedeckt wurden. Voraussetzung für eine sichere und wirtschaftliche Systemführung ist die Erstellung einer vollständigen und zuverlässigen Datenbank. Im Hinblick auf eine optimale Unterstützung des Betriebspersonals ist der Einsatz des Prozessrechners nach Möglichkeit interaktiv aufzubauen. Die zentrale Rolle des Computers führt aus Gründen der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit im allgemeinen zu Doppelrechnersystemen. Parallelprozessor-Systeme bilden eine interessante Weiterentwicklung. Zum Abschluss wird anhand von drei Führungszentren der heutige Stand der Systemtechnik illustriert.

Dans la technique de l'énergie électrique, la technique de système s'occupe des problèmes de surveillance et de gestion de la production, du transport et de la distribution de l'énergie. La structure nettement hiérarchique de la partie installations du système d'énergie conduit à une répartition correspondante des tâches de la technique de système. Le grand nombre d'informations qui doivent être liées à des ordres de gestion nécessite l'emploi de calculateurs de processus. Actuellement, ces tâches sont de plus en plus souvent résolues par des appareils librement programmables, alors qu'autrefois il fallait du matériel spécial pour un seul usage. Pour une gestion sûre et économique du système, il importe d'établir une liste complète et précise des données. Afin d'apporter une aide optimale au personnel d'exploitation, l'emploi du calculateur de processus doit être autant que possible interactif. Le rôle central de l'ordinateur conduit, pour des raisons de fiabilité et de disponibilité, à des systèmes à deux ordinateurs. Des systèmes de processeurs parallèles sont un nouveau développement intéressant. Pour terminer, l'état actuel de la technique de système est illustré par trois centres de gestion.

1. Einleitung

Die Aufgabe, bestehende Anlagen des Energiesystems sicher und wirtschaftlich einzusetzen sowie neue Systemteile unter Berücksichtigung wirtschaftlicher, technischer und ökologischer Randbedingungen optimal in Betrieb zu nehmen, kann nur durch eine hierarchische Zentralisierung der informations- und führungstechnischen Probleme gelöst werden. Die Systemtechnik hat das optimale Zusammenwirken aller Anlagenteile zum Ziel. Fig. 1 zeigt das Nebeneinander von Anlagen- und Systemtechnik im Energiesystem. Die Anlagen bestehen aus den Maschinen und Apparaten, die für die Energieumwandlung, -übertragung und -verteilung benötigt werden. Dazu kommen die für die Fernwirktechnik notwendigen Mess- und Übertragungseinrichtungen. Da alle Anlagenteile einer Vielzahl, zum Teil nicht voraussagbarer Störungen und Fehler ausgesetzt sind, braucht es eine immer umfangreichere Systemtechnik, um die an die Energieversorgung gestellten hohen Qualitäts- und Kontinuitätsanforderungen jederzeit erfüllen zu können. Dazu müssen in zentralen und dezentralen Netzleitstellen vollständige und zuverlässige Datenbanken mit Hilfe von Estimations- und Identifikationsverfahren aufgebaut werden. Aufbauend auf der Datenbank werden dann die für die Systemführung notwendigen Entscheidungen und Optimierungen ausgeführt. Dabei wird das Bedienungspersonal heute in zunehmendem Masse durch leistungsfähige Computer unterstützt.

Bei der Behandlung systemtechnischer Probleme ist es wichtig, von Anfang an festzuhalten, dass zwischen Anlagen- und Systemtechnik enge Beziehungen bestehen. Während die Anlagentechnik ein traditionsreiches Gebiet sowohl aus der Sicht der Industrie wie auch der Hochschule ist, hat die Systemtechnik durch die Entwicklung der letzten zehn Jahre ausserordentlich an Bedeutung gewonnen. Es handelt sich dabei also nicht um ein abgeschlossenes Gebiet. Vielmehr gibt es sowohl für die Industrie wie auch für die Hochschulen noch zahlreiche, interessante Forschungs- und Entwicklungsarbeiten.

[1]) Anlässlich der INELTEC findet eine Fachtagung über «Mittel und Wege der Optimierung der Energieerzeugung und Energieverteilung» statt. Zu diesem Thema gehört auch der vorliegende Aufsatz, eine Überarbeitung der Antrittsvorlesung des Autors, an der ETHZ am 28. 2. 1975.

Es soll nun anhand einiger Beispiele gezeigt werden, welche Fülle von Problemen auf dem Gebiet der elektrischen Energieübertragung bezüglich der Systemtechnik bestehen, welche Lösungsmöglichkeiten sich anbieten, zu welchen Resultaten diese Anstrengungen geführt haben und welche zukünftigen Entwicklungen sich anbahnen. Um den Rahmen dieser Arbeit nicht zu sprengen, müssen zwangsläufig einige wichtige Beispiele ausgewählt und manches Interessante weggelassen werden.

2. Hierarchische Systemstruktur

Das elektrische Energiesystem hat die in Fig. 2 gezeigte anlagentechnische Strukturierung. Es besteht aus dem Transportsystem, dem Verteilsystem, den Kraftwerken und Unterstationen. Aufgrund der engen Beziehungen zwischen der Anlagen- und Systemtechnik ist es nicht erstaunlich, dass das Überwachungs- und Führungssystem eine ganz ähnliche hierarchische Strukturierung aufweist (Fig. 3). An oberster Stelle befindet sich die zentrale Netzleitstelle, die die Information aus den regionalen Leitstellen entgegennimmt. Diese regionalen Leitstellen fassen die Information der Kraftwerke und Unterstationen zusammen, verdichten sie und geben den für die zentrale Netzführung notwendigen Teil an das Führungszentrum weiter. In besonders wichtigen Ausnahmefällen kann es durchaus vorkommen, dass Informationen direkt von den Unterstationen und Kraftwerken an die zentrale Netzleitstelle geschickt werden. Es ist also festzuhalten, dass die Systemtechnik in der elektrischen Energieübertragung auf einer ausgeprägten hierarchischen Strukturierung der Führungsaufgaben beruht.

3. Computerorientierte Netzführung

Die systemtechnische Strukturierung führt zwangsläufig dazu, dass durch die Zentralisierung vieler Aufgaben der Überblick über das Gesamtsystem wesentlich verbessert wird. Allerdings ist damit eine starke Zunahme der für die Netzführung erforderlichen Informationen verbunden. Treten insbesondere Störungen auf, die den sicheren Betrieb gefährden können, so muss ein noch wesentlich grösserer Datenumfang als im Normalzustand überblickt, verknüpft und für Entscheidungen ver-

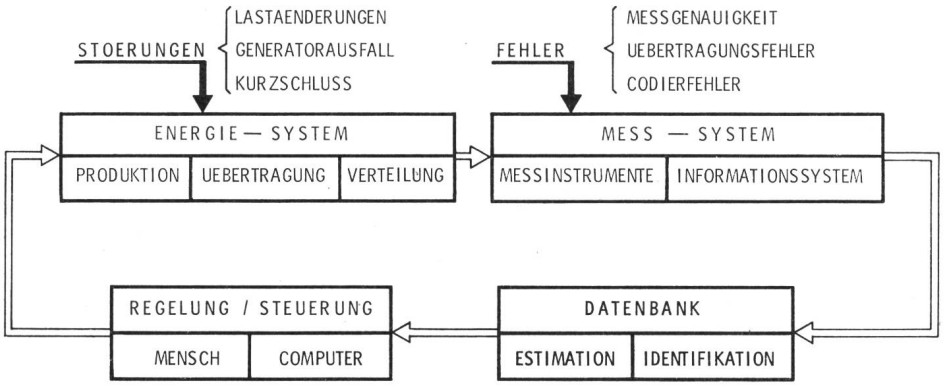


Fig. 1
Anlagen- und Systemtechnik im Energiesystem

wendet werden. Die einzig wirksame und sinnvolle Unterstützung des Betriebspersonals bietet dabei der Digitalrechner.

Für den erfolgreichen Einsatz des Computers ist es absolut unerlässlich, seine Aufgaben von vornherein genau zu spezifizieren, um seine Kapazität optimal ausnützen zu können. Beim Aufstellen eines entsprechenden Pflichtenheftes muss man insbesondere entscheiden, welche der in Fig. 4 gezeigten fünf Aufgabenbereiche

- Datenerfassung und -verarbeitung
- On-line Aufgaben für Überwachung und Führung
- Off-line Aufgaben für Planung und Auswertung
- Datenbankorganisation
- Mensch-Maschine-Interaktion

bis zu welchem Grad durch programmierbare Prozessrechner ausgeführt werden sollen. Wirtschaftliche und technische Überlegungen entscheiden, welcher Aufwand dabei vertretbar ist.

4. Datenerfassung und -verarbeitung

Entsprechend Fig. 4 ist an erster Stelle das Problem der Datenerfassung und -verarbeitung zu klären, denn dessen Lösung stellt die Voraussetzung für den erfolgreichen Betrieb einer zentralen Netzleitstelle dar. Die Datenerfassung und -verarbeitung war lange Zeit als Problem der Fernmesstechnik hardware-mässig gelöst worden. Heute werden dank der Digitalrechner auch Software-Verfahren der Estimationstheorie erfolgreich eingesetzt. Diese Verfahren erlauben es auf Grund redundanter Messungen den gesamten Systemzustand zu berechnen, Messfehler auszugleichen, nicht gemessene Grössen zu ergänzen und grosse Messfehler zu eliminieren [1][2]). Das Konzept der Estimation ist heute weitgehend von der Industrie akzeptiert, und es bestehen wesentliche Anstrengungen, die theoretisch bekannten Verfahren in die Praxis umzusetzen.

Die Kombination der Fernmesstechnik mit der Estimationstheorie wurde in einem Teil des schweizerischen Hochspannungsnetzes [2] verwirklicht. Fig. 5a zeigt einen Ausschnitt der in diesem Netz für Estimationszwecke zur Verfügung stehenden Leistungsfluss-Messungen. Ein Kreuz bedeutet, dass die entsprechende Wirk- oder Blindleistungsmessung nicht zur Verfügung steht. Alle Messungen werden zu dem in der zentralen Netzleitstelle befindlichen Computer übertragen und mit einem mathematischen Netzmodell sowie einem Estimations- oder Ausgleichsverfahren verarbeitet. Als Resultat erhält man die in Fig. 5b dargestellten Leistungsflusswerte und Angaben der prozentualen Auslastung aller Leitungen. Die Gegenüberstellung von Fig. 5a und 5b zeigt deutlich, dass durch ein systematisches Datenverarbeitungsverfahren ein erheblicher Informationsgewinn erreicht wird. Dem Betriebspersonal steht somit jederzeit der gesamte, aktuelle Systembetriebszustand zur Verfügung. Darüber hinaus steht diese, in der Datenbank zu speichernde Information für die Lösung von weiteren on-line Aufgaben gesichert zur Verfügung.

Der erfolgreiche Einsatz der Estimationstheorie hängt natürlich stark davon ab, ob eine gute Messgerät-Konfiguration im Netz zur Verfügung steht. Mit anderen Worten ist es also ganz entscheidend, dass die richtigen Werte gemessen werden. Da es nicht von vornherein eindeutig gegeben ist, welche Grössen gemessen werden, muss das Problem der Messgerät-

[2]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

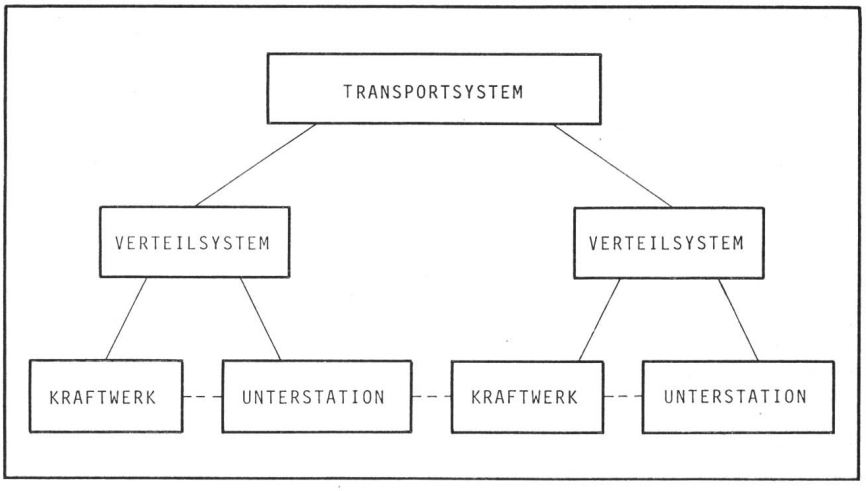
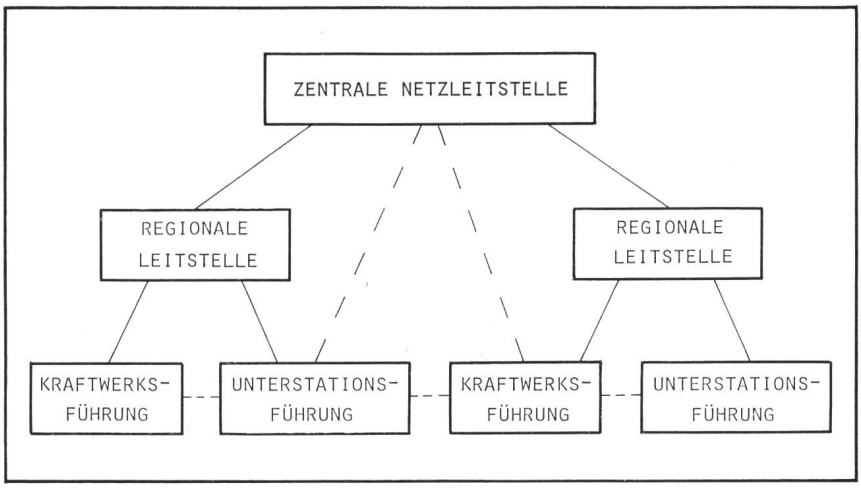


Fig. 2
Anlagentechnische Strukturierung

Fig. 3
Systemtechnische Strukturierung



Plazierung in der Planungsphase gelöst werden. Ein erstes experimentelles Verfahren beruht auf einer Monte-Carlo-Simulation, wo, ausgehend von einem mathematischen Netzmodell, ein bestimmtes Meßsystem nachgebildet wird. Die Messungen werden im Estimator verarbeitet und anschliessend durch das Ausgleichsverfahren abgeschätzt. Vergleicht man die ursprünglichen und die abgeschätzten Messungen, so ergibt sich ein bestimmter Fehler, der mit der im voraus festgelegten Genauigkeitsgrenze verglichen wird. Treten unzulässige Abweichungen zwischen Soll- und Istwert auf, so muss das Messsystem rekonfiguriert werden, um die geforderte Genauigkeitsqualität erreichen zu können. Dank dem systematischen Vorgehen ist es dabei möglich, optimale Lösungen zu finden, die allerdings einen beträchtlichen Rechenaufwand erfordern.

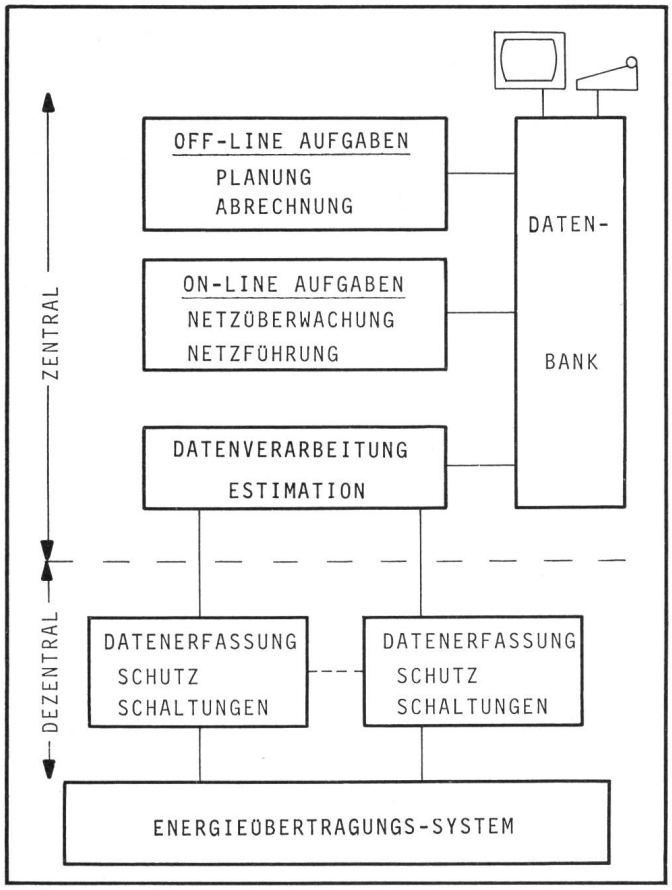
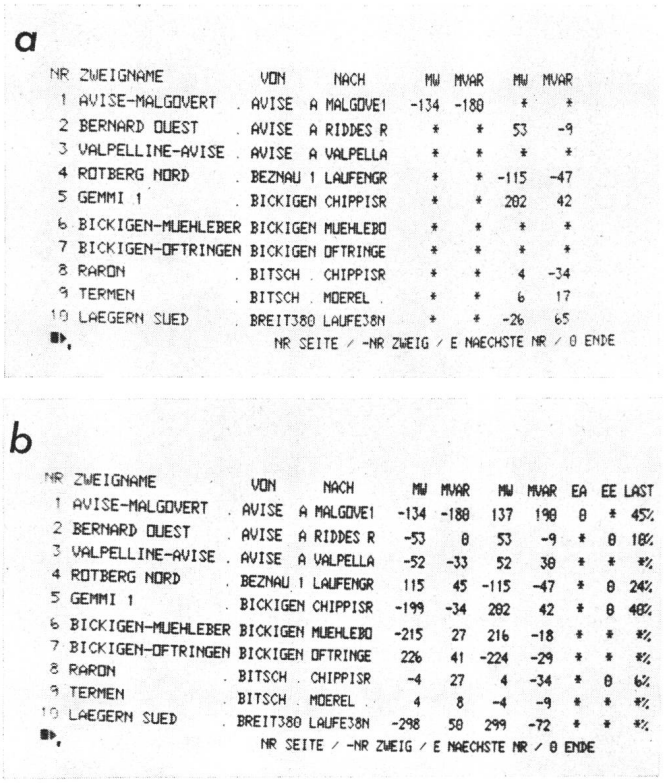


Fig. 4 **Zentrale, computerorientierte Netzführung**

Neben dem experimentellen Vorgehen zeigt Fig. 6 erste Resultate einer analytischen Messgeräte-Konfiguration [3]. Dabei wird insbesondere auch das Problem der schlechten Messwerte mitberücksichtigt. Die Güte eines Meßsystems wird daran gemessen, ob schlechte Daten entdeckt und unterdrückt werden können. Daneben ist es natürlich wichtig, dass die Auswirkung auf die zu bestimmenden Werte nicht zu gross wird,



a

NR	ZWEIGNAME	VON	NACH	MW	MVAR	MW	MVAR
1	AVISE-MALGOVERT	AVISE	A MALGOVE1	-134	-180	*	*
2	BERNARD OUEST	AVISE	A RIDDES R	*	*	53	-9
3	VALPELLINE-AVISE	AVISE	A VALPELLA	*	*	*	*
4	ROTBERG NORD	BEZNAU	1 LAUFENGR	*	*	-115	-47
5	GEMMI 1	BICKIGEN	CHIPPISR	*	*	202	42
6	BICKIGEN-MUEHLEBER	BICKIGEN	MUEHLEBO	*	*	*	*
7	BICKIGEN-OFTRINGEN	BICKIGEN	OFTRINGE	*	*	*	*
8	RARON	BITSCH	CHIPPISR	*	*	4	-34
9	TERMEN	BITSCH	MOEREL	*	*	6	17
10	LAEGERN SUED	BREIT380	LAUFE38N	*	*	-26	65

NR SEITE / -NR ZWEIG / E NAECHSTE NR / 0 ENDE

b

NR	ZWEIGNAME	VON	NACH	MW	MVAR	MW	MVAR	EA	EE	LAST
1	AVISE-MALGOVERT	AVISE	A MALGOVE1	-134	-180	137	190	0	*	45%
2	BERNARD OUEST	AVISE	A RIDDES R	-53	0	53	-9	*	0	18%
3	VALPELLINE-AVISE	AVISE	A VALPELLA	-52	-33	52	30	*	*	*%
4	ROTBERG NORD	BEZNAU	1 LAUFENGR	115	45	-115	-47	*	0	24%
5	GEMMI 1	BICKIGEN	CHIPPISR	-199	-34	202	42	*	0	40%
6	BICKIGEN-MUEHLEBER	BICKIGEN	MUEHLEBO	-215	27	216	-18	*	*	*%
7	BICKIGEN-OFTRINGEN	BICKIGEN	OFTRINGE	226	41	-224	-29	*	*	*%
8	RARON	BITSCH	CHIPPISR	-4	27	4	-34	*	0	6%
9	TERMEN	BITSCH	MOEREL	4	8	-4	-9	*	*	*%
10	LAEGERN SUED	BREIT380	LAUFE38N	-298	50	299	-72	*	*	*%

NR SEITE / -NR ZWEIG / E NAECHSTE NR / 0 ENDE

Fig. 5 **Leistungsfluss-Messungen**

Mit Estimator berechnete Leistungsflüsse auf allen Leitungen

Nr.	Nummer der Leitung
Zweigname	Name der Leitung
von	Name der Unterstation, wo Leitung beginnt
nach	Name der Unterstation, wo Leitung endet
MW, MVAR	Wirk- und Blindleistungsfluss am Anfang der Leitung
MW, MVAR	Wirk- und Blindleistungsfluss am Ende der Leitung
EA, EE	Wirk- und Blindleistungsfluss am Anfang (EA) resp. am Ende (EE) der Leitung gemessen (0), nicht gemessen (*)
Last	Prozentuelle Auslastung der Leitung bezüglich der Wirkleistung

wenn Messfehler auftreten. Fig. 6 zeigt für zwei hypothetische Messgeräte-Konfigurationen die Wahrscheinlichkeit, dass «Ausreisser» nicht entdeckt werden können. System 1 hat weniger Messgeräte (billiger) als System 2. Demzufolge bestehen im Bereich 4...10 α wesentliche Unterschiede in bezug auf die Wahrscheinlichkeit, dass grosse Fehler entdeckt werden. Es zeigt sich, dass in System 1 die Auswirkung schlechter Messwerte viel grösser ist als in System 2 und zudem deren Entdeckungswahrscheinlichkeit in System 2 kleiner ist als in System 1. Da man von vornherein spezifizieren kann, welche Fehlereinflüsse zulässig sind, kann anhand dieser Rechnung entschieden werden, ob das Meßsystem 1 oder 2 benutzt werden soll und kann.

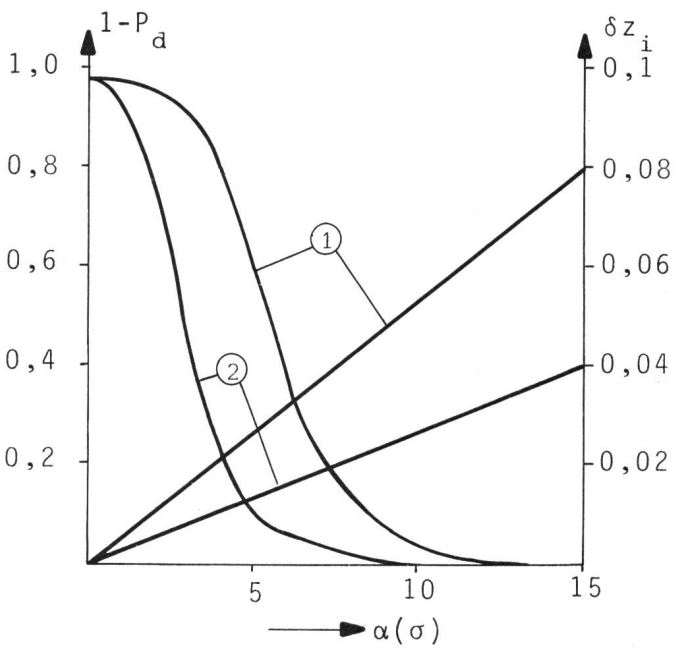


Fig. 6 Optimale Messgeräte-Plazierung bezüglich der Entdeckbarkeit schlechter Messdaten

$1-P_d$ Wahrscheinlichkeit, dass schlechter Messwert nicht entdeckt wird
α (σ) Grösse des schlechten Messwertes
δz_i Differenz zwischen wahrem und geschätztem Messwert
① ② Zwei hypothetische Messgerätkonfigurationen

5. Sicherheit und Wirtschaftlichkeit

Ein weiterer Aufgabenkreis ist die on-line Bestimmung der Sicherheit [4] und Wirtschaftlichkeit [5]. Dabei spielt der Betriebszustand des Energieübertragungssystems eine wichtige Rolle. Es lassen sich vier Zustände unterscheiden: normal, gefährdet, gestört, in Wiederaufbau. Das Ziel jeder Betriebsführung ist es, das System im normalen Zustand zu betreiben. Treten Störungen auf, so kann nicht immer ausgeschlossen werden, dass das System in den gefährdeten Zustand übergeht. Sind die Störungen gross, so wird das System unter Umständen in den gestörten Betriebszustand übergehen, der dadurch charakterisiert ist, dass wesentliche Aufgaben nicht mehr wahrgenommen werden können und im Extremfall zu einem Blackout führen. In dieser Situation muss durch ein geeignetes Wiederaufbauprogramm der Normalbetriebszustand erreicht werden. Während im Normalbetriebszustand die Wirtschaftlichkeit an erster Stelle steht, spielt im gestörten Zustand und in der Wiederaufbausituation die Sicherheit die primäre Rolle. Diese funktionelle Abhängigkeit führt dazu, dass man die Aufgaben bezüglich Wirtschaftlichkeit und Sicherheit für jeden Betriebszustand genauer definieren muss.

Im normalen Betriebszustand auszuführende direkte on-line Überwachungs- und Führungsaufgaben, die im Sekunden- bis Minutenbereich erledigt werden müssen, sind

- Statusinformation und Anzeige
- Estimation
- Kraftwerksregelung
- Sicherheitsüberwachung

Die im Minutenbereich auszuführenden Optimierungsaufgaben sind im allgemeinen rechenintensiver. Sie brauchen die von den direkten Aufgaben zur Verfügung stehenden Daten.

An dieser Stelle sollen die drei wichtigsten Aufgaben aufgeführt werden:

- Wirtschaftliche Lastverteilung
- Blindleistungsregelung
- Sicherheitsanalyse (stationär und dynamisch)

Die folgenden adaptiven Aufgaben müssen im Minuten- bis Tagebereich abgearbeitet werden:

- Lastprognose
- Einsatz- und Wartungsplanung
- interaktiver Lastfluss
- Kurzschlussberechnungen
- Datenbankverwaltung
- Sicherheitsoptimierung

Das wesentliche Merkmal der Strukturierung nach Betriebszuständen ist die Notwendigkeit, die verschiedenen Betriebszustände identifizieren zu können, d. h. festzustellen, wann das System im normalen und wann es im gefährdeten Zustand

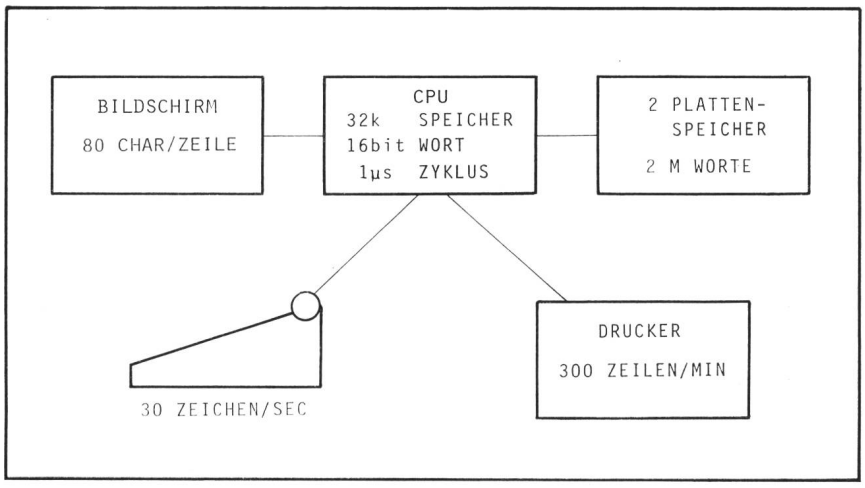


Fig. 7
Interaktive Rechnerkonfiguration (Hardware)

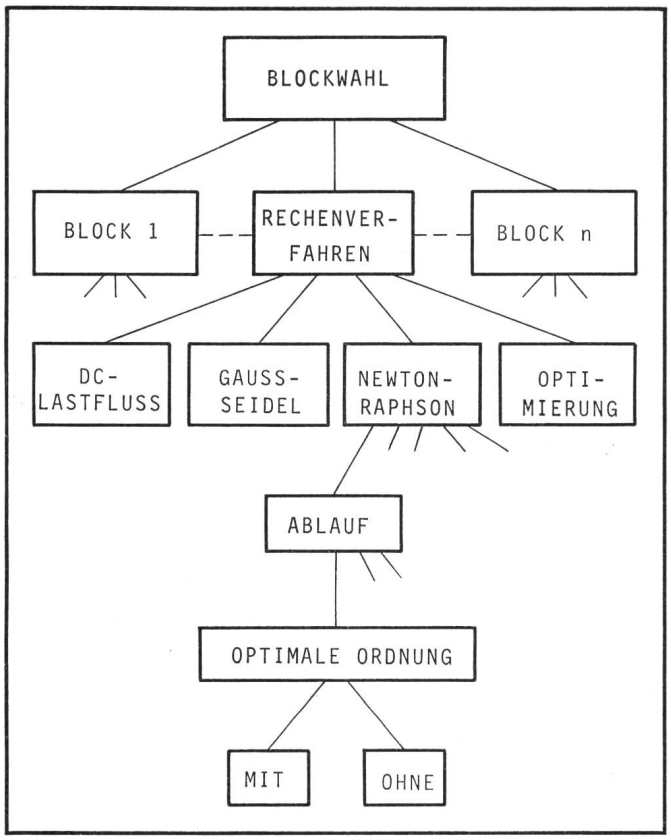


Fig. 8 Interaktive Programmorganisation (Software)

steht. Die Sicherheitsregelung muss dafür sorgen, dass das Energiesystem so geführt wird, dass es nach Möglichkeit immer im normalen Systemzustand bleibt. Die Strategie zur Erreichung dieses Zieles besteht einerseits in der auf der Estimation aufbauenden Sicherheitsüberwachung und der sich daraus ergebenden Beeinflussung der wirtschaftlichen Lastverteilung und andererseits in der Sicherheitsanalyse und der Sicherheitsoptimierung.

Die Sicherheitsüberwachung besteht darin, den Systemzustand mit Hilfe des Estimators, der Statusinformation und der Grenzwerte zu bestimmen und dann für verschiedene Störungsfälle systematisch alle Betriebsgrenzen zu überprüfen. Ist eine oder mehrere dieser Grenzen verletzt, so muss entweder eine Anzeige erfolgen, ein Alarm ausgelöst oder Abhilfemassnahmen eingeleitet werden. Diese Abhilfemassnahmen bestehen darin, dass die wirtschaftliche Lastverteilungsaufgabe so modifiziert werden muss, dass die bisher nicht berücksichtigten, in der Sicherheitsüberwachung aber als verletzt erkannten Betriebsbedingungen bei der Kostenoptimierung zusätzlich berücksichtigt werden. Während vor Auftreten der Störung die Betriebskostenfunktion unter Einhaltung der Netzgleichungen und Betriebsbedingungen als Ungleichungen minimal gemacht werden muss, ist nach Auftreten der Störung eine modifizierte mathematische Optimierungsaufgabe unter Berücksichtigung zusätzlicher Betriebsbedingungen in Form von Ungleichungen zu lösen.

Parallel zur Sicherheitsoptimierung ist die Sicherheitsanalyse und die Sicherheitsoptimierung auszuführen. Die Sicherheitsanalyse besteht darin, eine im voraus festgelegte Störungsliste durchzuarbeiten und mit den Betriebsbedingungen zu vergleichen. Diese Störungsliste enthält im Mindestfall die folgenden drei möglichen Fehler:

- Ausfall einer beliebigen Leitung
- Ausfall eines beliebigen Generators
- Beliebiger ein- und dreiphasiger Kurzschluss

Wenn die Sicherheitsanalyse zeigt, dass bei einer der erwähnten möglichen Störungen gewisse Betriebsbedingungen verletzt sind, so muss schliesslich mit der Sicherheitsoptimierung eine neue Lastverteilung gefunden werden. Dabei muss das Minimum der Betriebskostenfunktion unter Berücksichtigung der Netzbedingungen als Gleichung und unter Berücksichtigung der Betriebs- und Sicherheitsbedingungen als Ungleichungen bestimmt werden. Es ist klar, dass das eine sehr aufwendige und rechenintensive Optimierungsaufgabe ist, die entsprechend viel Rechenzeit benötigen wird.

Diese Ausführungen zeigen, dass durch systematisches Vorgehen weitgehend gewährleistet werden kann, dass der sichere Betriebszustand nicht verlassen wird. Natürlich gehört auch die Lösung des Sicherheitsproblemes im gestörten Zustand und in der Wiederaufbauphase zu einem kompletten Führungszentrum. Die dabei auftretenden Schwierigkeiten sind auch heute noch ausserordentlich gross und sollten erst dann angegangen werden, wenn das Vorgehen im ungestörten und gefährdeten Zustand als gelöst betrachtet werden kann.

6. Interaktiver Rechnereinsatz

Die bisherigen Ausführungen zum Thema Sicherheit und Wirtschaftlichkeit haben gezeigt, dass diese Aufgaben nicht vollautomatisch ablaufen können. An jeder Stelle muss das Bedienungspersonal interaktiv eingreifen können, sei es, um eigene Erfahrung mitzuberücksichtigen, sei es, um von aussen kommende Information einzugeben [6]. Das gilt sowohl für on-line wie auch für off-line Aufgaben. Als interaktiver Rechnereinsatz soll hier der Dialog zwischen dem Menschen und der Maschine verstanden werden. Durch einfache gezielte Fragen muss es möglich sein, Daten zu ändern, Resultate

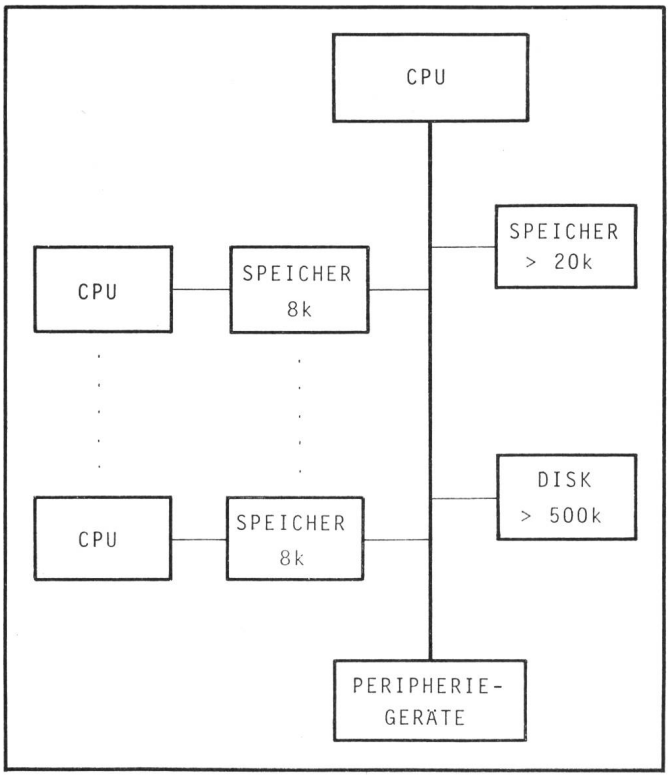


Fig. 9 Parallel-Prozessoren

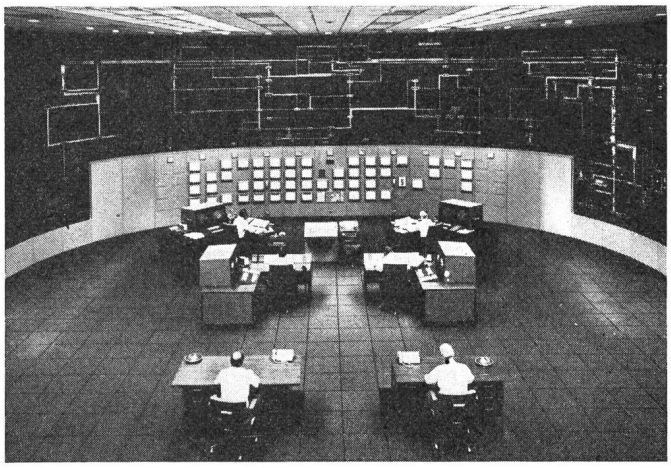


Fig. 10 Führungszentrum New York Power Pool, Albany

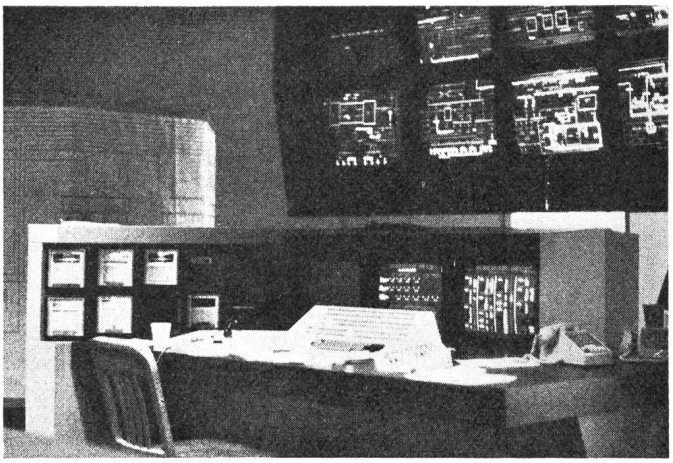


Fig. 11 Führungszentrum Philadelphia Electric, Philadelphia

abzufragen oder komplexe Rechnungen mit verschiedenen Verfahren auszuführen. Für die erfolgreiche Durchführung des Dialoges ist es wichtig, ohne Wartezeiten den Dialog vom Menschen her oder von der Maschine her jederzeit eröffnen zu können. Voraussetzungen dafür sind:

- das Programm kann stets laufen,
- das zugehörige Betriebssystem erfordert einen kleinen Aufwand,
- das Programm kann jederzeit unterbrochen werden, um neue Daten einzugeben.

Fig. 7 zeigt eine mögliche minimale Rechnerkonfiguration für die Ausführung interaktiver Rechnungen. Während über Bildschirm und Tastatur wesentliche Teile der Konversation abgewickelt werden können, braucht man unbedingt auch einen Schnelldrucker für die Ausgabe grösserer Datenmengen oder zur Erstellung dauerhafter Protokolle. Lichtgriffel, Rollkugel und ähnliche Zusatzgeräte bieten für die Spezifikation von Eingabedaten wesentliche Vorteile.

Fig. 8 zeigt ein softwaremässiges Konversationskonzept, das ausgehend von einer Blockunterteilung, jeden Block in Sätze und jeden Satz in Nebensätze unterteilt. Für den Fall der interaktiven Lastflussberechnung können die Blöcke folgende Aktivitäten beinhalten:

- Auslesen und Eintragen der Grundstruktur in die Datenbank
- Variation der Grundstruktur
- Wahl des Rechenverfahrens
- Auswertung der Ausgabedaten

Greift man den Block des Rechenverfahrens heraus, so stellen die Hauptsätze die verschiedenen Rechenmethoden dar, z. B. linearisierter Lastfluss, Gauss/Seidel, Optimierungsverfahren, Newton-Raphson-Verfahren usw. In den Nebensätzen, die in beliebiger Zahl hintereinander angeordnet werden können, wird für jedes Verfahren spezifisch erforderliche Information eingegeben. Zum Beispiel muss für den Satz «Newton-Raphson-Verfahren» folgende Zusatzinformation für den Rechenablauf vorhanden sein:

- Rechengenauigkeit
- Anzahl der Iterationen
- Optimale Ordnung der Knoten

Nach Ausführung aller dieser Befehle kehrt die Konversation automatisch zur Blockwahl zurück.

Der Anwender muss für die erfolgreiche Verwendung dieses Konversationskonzeptes nur einige wenige Kennworte kennen, um die Blöcke, Haupt- und Nebensätze aufrufen zu können. Dabei ist das Programmsystem so ausgelegt, dass der Operateur jederzeit vom Computer Auskunft erhalten kann, was er als nächstes tun muss. Zudem werden die dem Rechner übergebenen Werte automatisch auf Wertgrenzen, Plausibilität und Konsistenz überprüft. Das konversationelle Lastflussprogramm bietet also die gleichen Möglichkeiten, wie sie früher mit den analogen Netzmodellen bestanden haben, nur kann man heute eben viel schneller und gezielter als damals arbeiten und trotzdem jederzeit den direkten Kontakt mit dem Problem aufrechterhalten.

7. Rechnerkonfiguration

Die bisherigen Ausführungen haben gezeigt, dass der Computer für die Netzführung eine ganz zentrale Rolle spielt. Es ist daher nicht verwunderlich, dass heute aus Gründen der Zuverlässigkeit und der Verfügbarkeit im allgemeinen ein Doppelrechnersystem eingesetzt wird, wobei oft auf einem Rechner die Lastverteilung und auf dem anderen Rechner die Systemüberwachung und -führung implementiert ist. Beim Ausfall eines Rechners übernimmt der andere Rechner die für den Notbetrieb erforderlichen Aufgaben. Dieses Konzept wird zweifelsohne auch für die nächsten Jahre die geeignete Lösung darstellen. In der weiteren Zukunft wird diese Konfiguration möglicherweise durch eine Anzahl parallel arbeitender Prozessoren ersetzt werden (Fig. 9).

Die Vorteile des Parallelprozessorensystems gegenüber dem Duplexsystem sind:

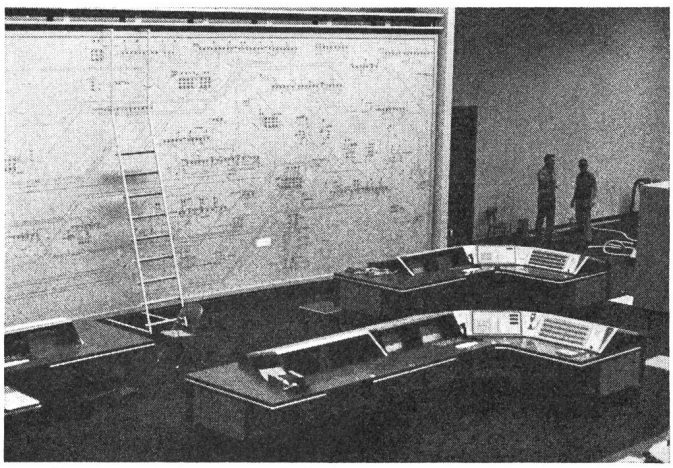


Fig. 12 Führungszentrum Bonneville Power Administration, Portland

– Erhöhung der Geschwindigkeit, da die Daten parallel verarbeitet werden können;
– Verbesserung der Zuverlässigkeit, da der Ausfall eines Prozessors keine grosse Auswirkung auf das Gesamtsystem bringt;
– Reduzierung des Preises, da die Kleinrechner in Zukunft noch wesentlich billiger werden.

Für die erfolgreiche Einführung dieses Systems müssen folgende Probleme geklärt werden:

– Parallelrechnersysteme erfordern spezielle, noch zu entwikkelnde Betriebssysteme.
– Parallelprozessoren erfordern eine eigene Sprache, damit z. B. nicht zwei Rechner gleichzeitig dieselbe Dateninformation im Speicher anfordern können.
– Die Datenbankorganisation muss auf die Parallelprozessorenkonfiguration abgestimmt werden.

Die Lösung der Lastflussberechnung mit Hilfe eines Parallelprozessoren-Systems in [7] veranschaulicht die oben genannten Vorteile und speziellen Probleme.

8. Beispiele von Führungszentren

Um diese Ausführungen abzurunden, soll jetzt noch auf einige im Bau oder Betrieb befindliche Führungszentren eingegangen werden. Bei der grossen Anzahl verschiedener Unternehmen, die sich heute mit dem Problem der Führungszentren befassen, kann eine solche Zusammenstellung natürlich nur ein ganz kleiner Ausschnitt aus der Fülle des vorhandenen Materials sein. Drei Beispiele werden hier kurz vorgestellt, die alle aus Amerika stammen.

Das erste Beispiel stellt das Führungszentrum des New York Power Pool dar. Fig. 10 zeigt die Innenansicht des Führungszentrums, wobei auffällt, dass neben den Bildschirmgeräten auch das Übersichtsdiagramm eine wichtige Rolle spielt. Dieses Führungszentrum wurde im Juni 1972 in Betrieb genommen. Von einem Doppelrechnersystem, an das zehn Bildschirmgeräte angeschlossen sind, werden folgende Aufgaben gelöst: Kraftwerksregelung, Lastverteilung, Sicherheitsüberwachung, Sicherheitsanalyse und on-line Lastfluss.

Das nächste Beispiel zeigt das Führungszentrum der Philadelphia-Electric (Fig. 11), das im Oktober 1973 in Betrieb genommen worden ist. Das Merkmal dieser Anlage besteht darin, dass ein Dreifachrechnersystem eingesetzt worden ist. Dieses System kann schon als erster Ansatz für die vorhin beschriebene Multiprozessoren-Rechnerkonfiguration verstanden werden. Es ist auffallend, dass bei diesem Führungszentrum kein eigentliches Übersichtsdiagramm vorhanden ist. Alle relevanten Informationen werden über 40 Displays angeboten. Die gelösten Aufgaben sind dieselben wie beim New York Power Pool.

Das letzte Beispiel stammt von der Bonneville-Power-Administration in Oregon (Fig. 12). Das Führungszentrum steht seit Ende 1974 in Betrieb. Die Aufnahme stammt noch aus einer Zeit, wo an diesem Führungszentrum gebaut wurde. In dieser Anlage wird neben den Datensichtgeräten wiederum ein grosses Übersichtsdiagramm eingesetzt. Andererseits beruht die Systemführung auf 4 Doppelrechnersystemen. Dabei dient das SCADA-System der Systemüberwachung und -führung während das RODS-System für die on-line Energieverteilung eingesetzt wird.

9. Abschliessende Bemerkungen

Die obigen Ausführungen sollen in folgende Punkte zusammengefasst werden:

1. Die Systemtechnik bildet die Voraussetzung, das Energiesystem möglichst lange im normalen, ungestörten Zustand nach Wirtschaftlichkeits- und Sicherheitskriterien zu betreiben.

2. Die gezeigten Beispiele von ausgeführten Netzführungszentren zeigen deutlich, dass es sich bei der Systemtechnik nicht um abstrakte Konzepte handelt, sondern um ein immer wichtiger werdendes Gebiet der Energietechnik.

3. Die Systemtechnik beruht auf der Anwendung der angewandten Mathematik, der Automatik und Prozessrechnertechnik in der Energietechnik. Sie erfordert eine umfangreiche Software-Entwicklung und eine hinreichend grosse Hardware-Unterstützung. Für den erfolgreichen Einsatz ist zuerst eine genaue Aufgabenspezifikation, d. h. eine Systemstudie für das betreffende Energieversorgungssystem auszuführen. Dabei ist besonderes Gewicht auf den technisch und wirtschaftlich vertretbaren Aufwand zu legen.

4. Die Systemtechnik hat die Energietechnik um eine wesentliche neue Dimension erweitert. Durch eine integrale Betrachtungsweise wird es möglich, komplexe Systeme hierarchisch zu gliedern und damit schwierige Überwachungs- und Führungsaufgaben erfolgreich zu lösen. Die Systemtechnik bildet somit den Rahmen für die Diskussion der Gesamtenergie-Konzeption, insbesondere auch im Hinblick auf den Einsatz neuer Energieumwandlungs- und Übertragungsmöglichkeiten.

5. Es ist besonders erfreulich feststellen zu können, dass durch die wachsende Bedeutung der informations- und führungstechnischen Aufgaben das Interesse an der Studienrichtung Energietechnik wieder stark zugenommen hat. Viele interessante Forschungs-, Entwicklungs- und Betriebsaufgaben bieten der Hochschule die Möglichkeit, Ingenieure auf ein anspruchsvolles und volkswirtschaftlich wichtiges Berufsfeld vorzubereiten und damit einen wesentlichen Beitrag zum Energieproblem zu leisten.

Literatur

[1] *F. C. Schweppe* and *E. J. Handschin:* Static state estimation in electric power systems. Proc. IEEE 62(1974)7, p.972...982.
[2] *K. Reichert* u. a.: Überwachung eines Teils des schweizerischen Hochspannungsnetzes mit state estimation; Prozessaufbau und praktische Erfahrungen. In: Einsatz von Prozessrechnern in Kraftwerken und Übertragungsnetzen. Informationstagung des SEV in Lausanne, 20./21. 9. 1973, S. 141...166.
[3] *E. Handschin* and *C. Bongers:* Theoretical and practical considerations in the design of state estimators for electric power systems. Proc. of the Symposium on Computerized Operation of Power Systems, São Carlos, Brazil, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam 1975.
[4] *T. E. Dy Liacco:* Real-time computer control of power systems. Proc. IEEE 62(1974)7, p. 884...891.
[5] *H. Edelmann* und *K. Theilsiefje:* Optimaler Verbundbetrieb in der elektrischen Energieversorgung. Berlin/Heidelberg, Springer Verlag, 1974.
[6] *P. Grafoner* und *E. Handschin:* Konversationelle Lastflußsimulation für die elektrische Energietechnik, Proc. des Simulations-Symposiums, Zürich, 1975.
[7] *Y. Wallach* und *V. Conrad:* Parallel, iterative solution of load flow problems. Power System Conference, Cambridge, 1975.

Adresse des Autors:

Prof. Dr. *E. Handschin*, Lehrstuhl für elektrische Energieversorgung, Universität Dortmund, D-46 Dortmund.