

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:	65 (1974)
Heft:	9
Artikel:	Wieweit eignen sich Methoden des Operations Research zur Führung eines grossen Elektrizitätswerkes?
Autor:	Lienhard, H.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-915400

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: 26.01.2026

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

Wie weit eignen sich Methoden des Operations Research zur Führung eines grossen Elektrizitätswerkes?

Von H. Lienhard

Die Frage wird diskutiert, wie weit die Leitung eines grossen Elektrizitätswerkes als Operations Research Problem behandelt werden kann. Nach der Darstellung der idealisierten Unternehmungsorganisation werden die Hauptprobleme für die Führung eines grossen EW vorgestellt. Im einzelnen wird dann das momentane energiewirtschaftliche Optimierungsproblem, anschliessend das langfristige energiewirtschaftliche Optimierungsproblem und die Interdependenz zwischen Energiewirtschaft und Finanzwirtschaft dargestellt. Die drei wesentlichen Komplexe der energiewirtschaftlichen Problemstellung eines Elektrizitätswerkes, nämlich das Problem der optimalen Energieverteilung mit Hilfe von computergestützten Führungssystemen, das Problem der Tarifgestaltung und das Problem der Bedarfsprognose werden im integralen Modell gezeigt.

On se demande dans quelle mesure la direction d'une grande entreprise électrique peut faire l'objet d'un problème de recherche opérationnelle. Après avoir exposé le type idéal d'organisation d'une entreprise, l'auteur présente les problèmes principaux relatifs à la gestion d'une importante société d'électricité. Il fait ressortir en particulier le problème d'abord momentané, puis à long terme, de l'optimisation de l'économie énergétique, ainsi que l'interdépendance existant entre l'économie énergétique et l'économie financière. Les trois complexes essentiels des problèmes d'économie énergétique qui se posent à une entreprise électrique sont reproduits à l'aide d'un modèle intégral et sont, à savoir: la distribution optimum de l'énergie à l'aide de systèmes conducteurs élaborés grâce aux ordinateurs électroniques, la structuration des tarifs et les prévisions à établir quant aux besoins.

1. Problemabgrenzung

Von Jean Paul stammt der Ausspruch: «Das Ziel muss man früher kennen als die Bahn.» Tatsächlich haben sich die Betriebswirtschaftslehre und die theoretische Volkswirtschaftspolitik seit Jahren eingehend mit der Zielbezogenheit jeder Art von Aktivitäten befasst. Im Hinblick auf die Problemstruktur unterscheidet man dabei zweckmäßig folgende drei Bereiche:

1. die Erfassung und Interpretation der aktuellen Situation;
2. die Definition eines von den massgebenden Individuen einer Organisation akzeptierten Zielsystems und schliesslich
3. die Bereitstellung und den wirkungsvollen Einsatz verfügbarer sachlicher und personeller Mittel mit den dazu geeigneten Methoden.

Mit der Problematik eines Chefs, die *aktuelle Situation* (die wirkliche oder die scheinbare) in seiner Unternehmung und seiner Umwelt zu erfassen, zu analysieren und zu interpretieren, wollen wir uns hier nicht beschäftigen. Und dies, obwohl neben «Fingerspitzengefühl», Intuition und zufälligem Innwerden von Fakten und Verhaltensweisen eine systematische und konsequente Erfassung analytischer Daten (etwa der Produktion, des Absatzes und des Rechnungswesens) sowie deren manuelle oder computermässige Aufbereitung und Auswertung der Erfassung massgebender Zusammenhänge sowie deren zeitgerechter Interpretation ausserordentlich förderlich sein kann.

Auch mit den *Zielen* wollen wir uns nur kurz befassen, weil sich hier keine methodischen Probleme stellen, sondern es sich um weltanschauliche und damit vom Wertsystem der zielsetzenden Personen abhängige Fixgrössen handelt. Damit aber im Sinne des einleitenden Zitats ein Bezugssystem für die methodischen Problemstellungen vorliegt, sei das in Fig. 1 dargestellte integrale Zielsystem für eine Elektrizitätsversorgungsunternehmung den folgenden Ausführungen unterstellt.

Bereits ein Blick auf die abgeleiteten Zielbündel zeigt, dass untereinander der Wirkungszusammenhang der Übereinstimmung oder wenigstens Unterstützung und der Gegensätzlichkeit mehr oder weniger ausgeprägt besteht. Dies wird noch deutlicher akzentuiert, wenn zur Konkretisierung einige der aufgeführten Einzelziele miteinander in Beziehung gesetzt werden. So wird das energiewirtschaftliche Einzelziel der unabhängigen Versorgung aller Abnehmer mit dem technischen Einzelziel der Schaffung von speziell betriebssicheren Geräten

und Anlagen in Harmonie stehen, während das Teilziel einer minimalen Umweltbeeintrichtigung (was immer man dabei darunter verstehen mag) durch das Transport- und Verteilsystem mit dem Ziel einer genügenden Rentabilität bei gleichzeitiger preisgünstiger Versorgung der Abnehmer leicht in Widerspruch (Antinomie) gerät.

Kommen wir jetzt zur *Mittelauswahl* und zum *Mitteleinsatz*, so sind wir in jenem Arbeitsbereich eines höheren Vorgesetzten, wo die *methodischen Aspekte der Arbeitsbewältigung* und *Arbeitsorganisation* eine wesentliche, um nicht zu sagen ausschlaggebende Rolle spielen. Betrachten wir Fig. 2, so handelt es sich bei diesem Arbeitsablaufschema um die Arbeitsschritte der Ursachenanalyse, der Prognosestellung und Planungsphase, der Inauguration einer problemangepassten analytischen Entscheidungsmethodik und der Ausgestaltung einer aussagekräftigen Wirkungsanalytik sowie einer zielkonformen Kontrollmethodik. Massgebend ist dabei, dass die analytische Ausgestaltung der meist computergestützten Arbeitsschritte im Sinne der Systemtheorie bezüglich Effizienz und Aussagefigkeit aufeinander abgestimmt und die für eine optimale Problembewältigung erforderlichen iterativen Durchläufe auch von der Unternehmungsorganisation her formal geregt und tatsächlich durchgefrt werden.

2. Was sind nun der Energiewirtschaft adäquate OR-Methoden?

Um es vorwegzunehmen, die in den gängigen Lehrbüchern zur Einführung in die Methoden des Operations Research dargestellten traditionellen Problemgattungen, wie etwa die Lagerhaltungstheorie, die Ersatztheorie, die Warteschlangentheorie, die Zuordnungsprobleme, das Transportproblem oder die klassische Spieltheorie, bieten kaum brauchbare Ansätze zu praxisgerechten Problemlösungen. Wir wollen uns deshalb an den Altmeister des Operations Research (OR), Churman¹⁾ halten, der OR so definiert hat, dass es darum geht, die für einen möglichst grossen Teil einer Organisation jeweils beste Entscheidung zu finden, wobei Wechselwirkungen, Kettenreaktionen und Restriktionen aller Art zu berücksichtigen sind.

¹⁾ Vgl. C. Churman, R. Ackoff, E. Arnoff, Operations Research: Eine Einführung in die Unternehmensforschung, Wien und München 1961.

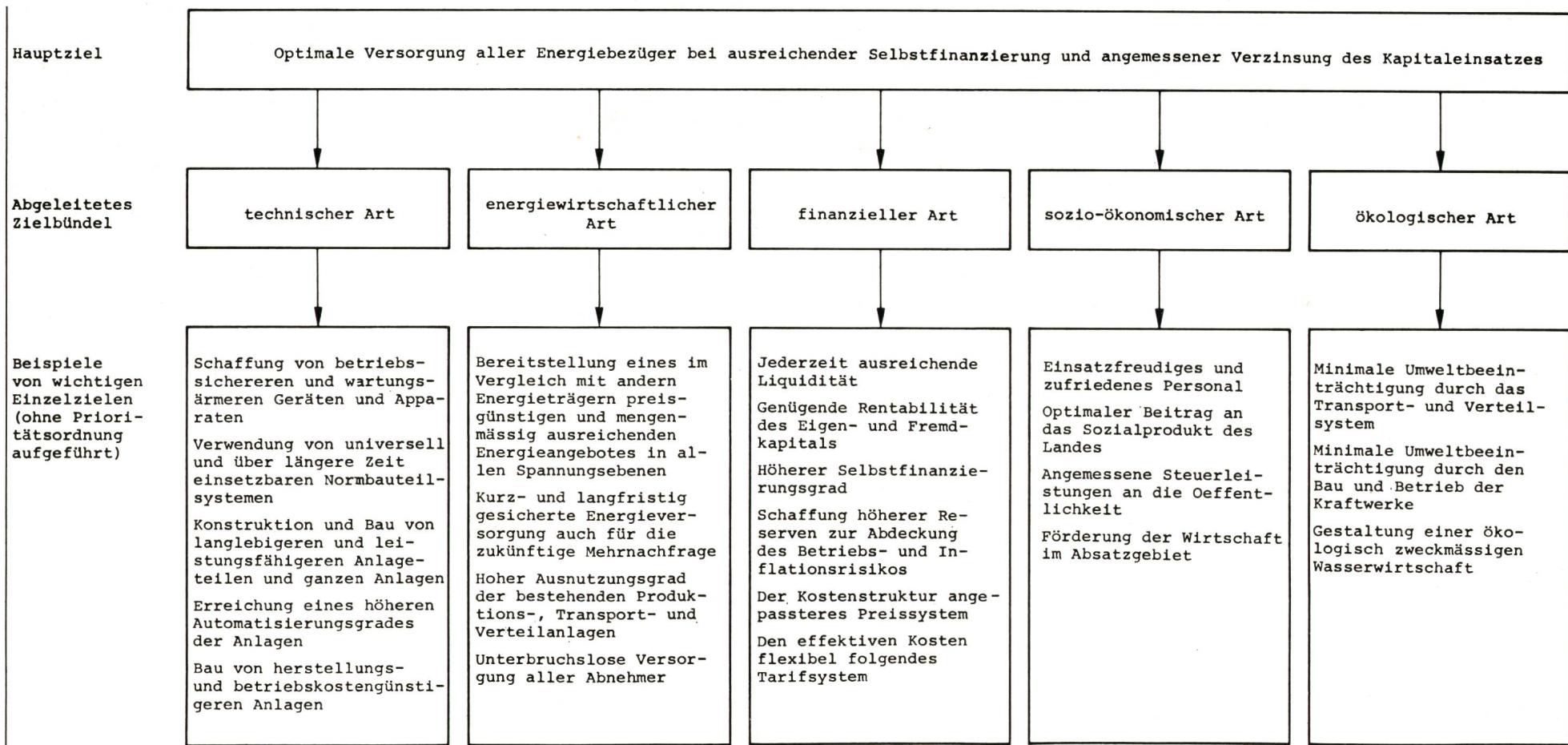


Fig. 1
Das integrale Zielsystem eines EWS.

Die Unternehmung einschliesslich des für sie relevanten Umweltausschnittes wird dabei im Sinne der Systemtheorie als eine Gesamtheit funktionell miteinander verknüpfter Teile verstanden.

Will man – im Gegensatz zu den traditionell üblichen Improvisationen – zu einer analytisch fundierten angewandten elektrischen Energiewirtschaft als Führungshilfsmittel kommen, so sind meines Erachtens ausreichende Kenntnisse und deren praktische Beherrschung aus den Fachgebieten Elektrotechnik, Betriebswirtschaftslehre, Mathematik und Informatik nötig, wie dies Fig. 3 veranschaulicht. Es sind in dieser Figur auch die in unserem Zusammenhang interessierenden wichtigsten Wissensbereiche aus den aufgeführten Fachgebieten eingetragen.

Wir haben vorhin festgestellt, dass als wesentlichstes Merkmal von Methoden des OR zu gelten hat, dass eine den Umständen und Zielsetzungen entsprechende optimale Entscheidung, Vorgehensweise, Gestaltung oder Organisation gesucht wird.

Klammern wir nun einmal alle zahlenmäßig nicht erfassbaren Wertsetzungen und Verhaltensweisen aus unseren Überlegungen aus, so gibt es in Elektrizitätswerken bei der Suche nach einer jeweils optimalen Lösung gemäss Fig. 4 drei massgebende Problemdimensionen: die zeitliche Reichweite, den Problembereich und die Problemtypen. Charakteristisch ist dabei das Interdependenzproblem, also die unterschiedlich starke, aber mehrfache gegenseitige Abhängigkeit. Das Herausgreifen und Bearbeiten eines Einzelproblems aus einem Problembereich – etwa der Verteilung – aus einem isolierten Ein-

zelgesichtspunkt heraus wäre dabei ein Musterbeispiel einer nicht systemtheoretisch orientierten Arbeitsweise. Die Probleme sollten deshalb – mindestens von einer höhern Führungswarte aus – immer in bezug auf die übrigen Geschäftsaktivitäten gesehen und behandelt werden. Einer solchen Problembehandlung stehen aber oft institutionelle Schranken entgegen, die eine Folge bestehender – oft an frühere Stadien einer Unternehmungsentwicklung angepasste – Organisationsformen sind.

3. Der organisatorische Aspekt im Hinblick auf die Problemlösungen

Wollen wir nun die in einer grossen Elektrizitätsunternehmung auftretenden Hauptprobleme kurz zur Darstellung bringen, so legen wir dazu am zweckmässigsten eine – in der Praxis wohl kaum anzutreffende – sachbezogene Idealorganisation zugrunde, wie sie m. E. die Fig. 5 zeigt. Charakteristisch in dieser «Idealorganisation» ist die Dreisektoreneinteilung:

Energiewirtschaft
Anlagenbau und Bauprojektierung
Administration

Jeder Sektor ist dabei wieder unterteilt in die angegebenen drei Teilbereiche, wobei in der Praxis – der Sache nach untergeordnet – noch weitere Teilbereiche den einzelnen Sektoren zugeordnet werden müssen. Wesentlich bei einer solchen Organisation ist, dass jeder Sektor eigenständig alle relevanten Führungsaufgaben einschliesslich der Planung übernimmt und dass ein Koordinationsausschuss auf oberster Führungsebene die Planungskoordination sicherstellt.

Vereinfachtes Modell des Arbeitsprozesses bei der Leitung einer Unternehmung
im Hinblick auf den Einsatz von OR-Methoden

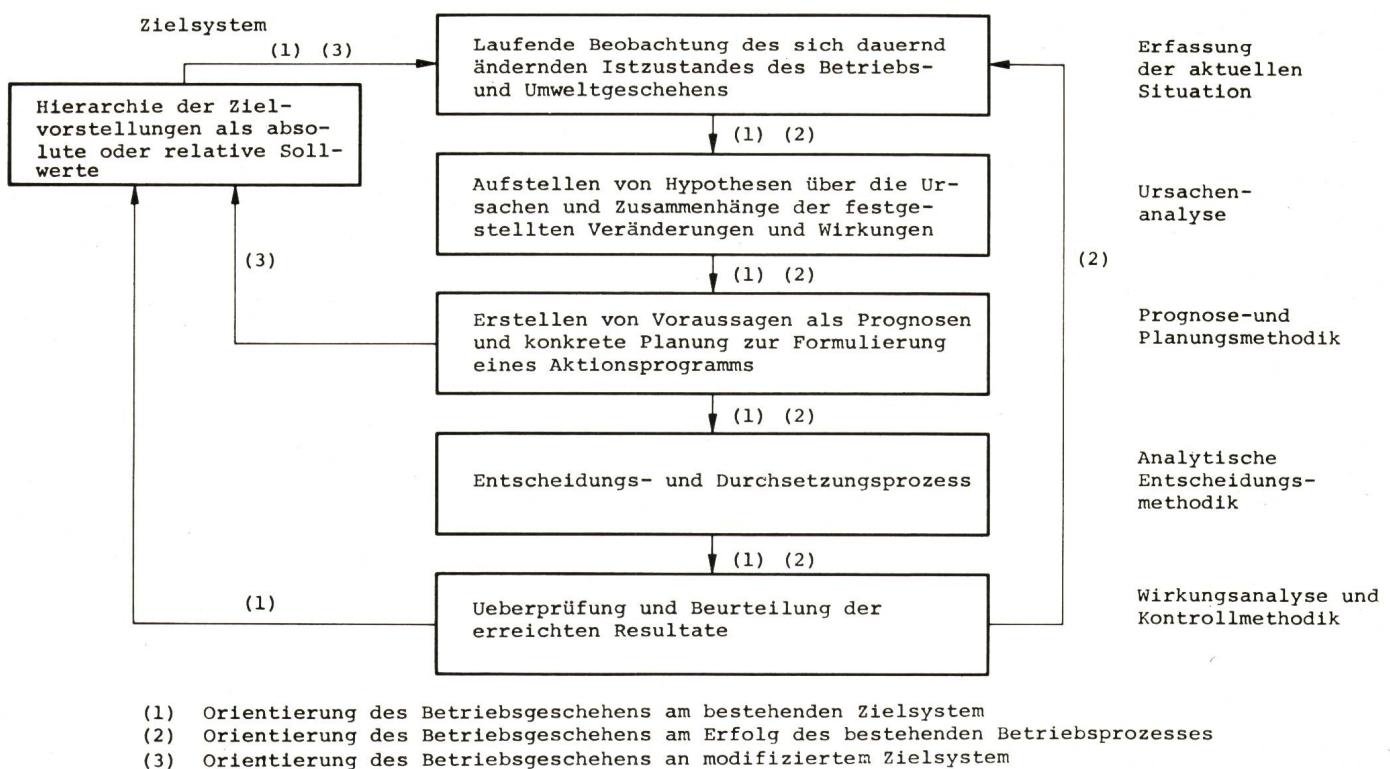


Fig. 2

Fig. 3

Massgebende Wissensbereiche für die Anwendung von OR-Methoden in der Energiewirtschaft.



Verfolgen wir nun aufgrund des angegebenen Organisationsplans die wichtigsten Informations-Interaktionswege anhand der Fig. 6. Die angegebenen wichtigsten internen Verknüpfungen (unvollständig eingetragen) der Aufgabenteilung zeigen, dass – abgesehen von den sachlichen Problemen – auch hier die methodisch vernachlässigten zwischenmenschlichen Beziehungen das Finden einer optimalen Lösung des Gesamtsystems der Unternehmung wesentlich erschweren können.

Greifen wir nun im Sinne von Beispielen von mit OR-Methoden wenigstens näherungsweise lösbarer Problemkreisen einige wenige heraus.

4. Das Problem der kurzfristigen Optimierung

Worin besteht das Ziel der kurzfristigen Betriebsoptimierung einer grösseren Elektrizitätsversorgungsunternehmung?

Es besteht in der möglichst sicheren Energieversorgung bei gleichzeitig laufend minimierten Kosten $\frac{dK}{dE}$. Konkret bedeutet dies bei der physikalisch bedingten Identität von produzierter und nachgefragter Leistung $\frac{dE}{dt}$ einen stetigen und unmittelbaren Ausgleich der Lastfunktion $L(t)$. Technische Randbedingungen sind dabei eine jederzeit verfügbare ausreichende rotierende Reserve, genügende und kurzfristig einsetzbare weitere Leistungsreserven, die gemäss einem zeitlichen Staffelplan verfügbar sind, sowie eine einwandfreie Netzregulierung nach dem Frequenz-Leistungs-Verfahren zur zeitgerechten Innehaltung aller gegenüber dem Verbundbetrieb eingegangenen Bezugs- oder Abgabeverpflichtungen.

Neben diesen auf die Produktionsanlagen bezogenen Voraussetzungen ist auch ein optimaler Netzzustand so zu schaffen, dass keine Überlastungen von Leitungen und Transformatoren auftreten und die notwendigen betriebs- oder störungsbedingten Schaltungen gefahrlos jederzeit durchgeführt werden können. Damit aber diese Forderungen erfüllt werden können,

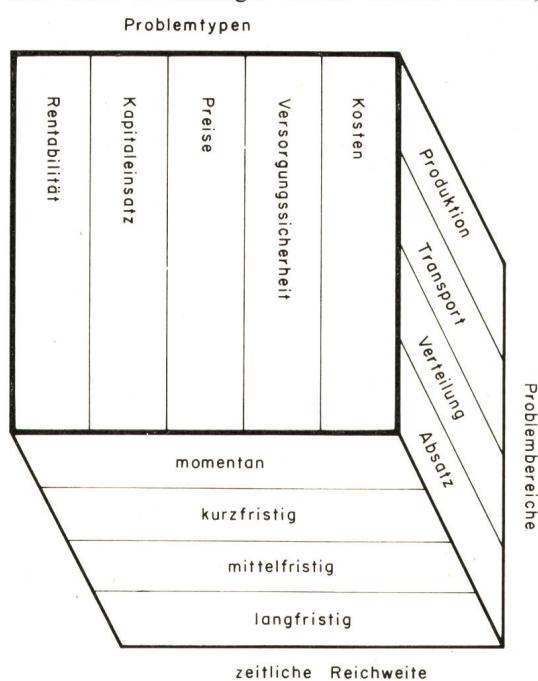


Fig. 4 Für die Suche nach einer optimalen Lösung massgebende Problemdimensionen.

Elektrizitätsversorgungsunternehmung								
Administrativer Sektor			Bau- und Projektierungssektor			Energiewirtschaftssektor		
Rechnungs-wesen	Finanzbe-reich	Personal-bereich	Kraft-werke	Netz (Leitun-gen und Unter-werke)	Informa-tions-techni sche Anla-gen	Betrieb des Pro-duktions-berei-ches	Betriebs-bereich Netz	Absatz-bereich

Fig. 5 Idealisierte Organisationsstruktur eines EW.

muss im Netz eine ausreichende Spannungshaltung durch Regulierung der Transformatoren und ein dem jeweiligen Belastungszustand des Netzes angepasster Blindleistungshaushalt erreicht werden. (Für die langfristige Planung ist deshalb auch ein Blindenergie- und Leistungsplan aufzustellen!) Aus der Sicht des technischen Netzbetriebes sollten sodann als übergeordneter Netzschatz laufend die erforderlichen Sicherheitsberechnungen (State Estimation) in der Form von Lastflussberechnungen und Berechnungen der minimalen und maximalen Kurzschlussleistungen in wichtigen Netzknotenpunkten (Unterwerken) durchgeführt werden. Erst diese Rechnungen ermöglichen dann, ein adaptiv wirkendes Programm aufzubauen, das für alle möglicherweise eintretenden gefährlichen Störungsfälle in grossen Produktionsanlagen, an wichtigen Transportleitungen und bei Netzkuppelungstransformatoren den jeweils nächstgünstigen Schaltzustand als Dispositionsanweisung für die betriebsleitenden Ingenieure sofort zu ermitteln gestattet.

Ein solches Netzüberwachungs- und Energieführungskonzept setzt ein leistungsfähiges und ausbaubares Prozessrechner-system voraus, das – wie dies Fig. 7 zeigt – alle erforderlichen Zählerwerte in kurzen synchronen Zeitzyklen einholt, über ein auf kurzen Zeitintervallen basierendes Messwertabfragesystem verfügt und gleichzeitig alle Änderungen des Netzzustandes über die Zustandssignale selbsttätig ebenso einholt wie die Stellsignale der Transformatorregulierungen.

Gleichzeitig sind auch die Soll- und Ist-Reguliersummen in Zeitzyklen von wenigen Sekunden zu bilden und die Regelmaschinen in den Kraftwerken mit den entsprechenden Stellwerten zu beaufschlagen.

Mit einem derartigen System – sofern dies einwandfrei arbeitet und überdies die notwendige hohe Systemverfügbarkeit aufweist sowie dank einem modularen Soft- und Hardwareaufbau über die erforderliche Anpassungsfähigkeit verfügt und damit dem laufenden Netzausbau zu folgen vermag – kann das rein betriebstechnische Optimum näherungsweise realisiert werden.

Die überlagerte wirtschaftliche Optimierung eines integralen Produktions- und Verbrauchersystems ist damit allerdings bei weitem noch nicht gelöst. Dieses wirtschaftliche Optimum setzt in einer ersten Stufe voraus, dass bei definierter Netzsicherheit immer mit Minimalkosten gefahren wird. Dies ist aber theoretisch nur möglich, wenn in jedem Zeitintervall die anstehenden Zusatz- oder Wegfallkostenänderungen $\frac{dK}{dt}$ bekannt sind. Genaugenommen muss allerdings die zeitliche Kostenänderung nach dem Verursachungsprinzip in die ener-

gie- und leistungsbedingten Kostenänderungen aufgespalten vorliegen. Also

$$\frac{dK}{dt} = g_1 \cdot \frac{dK_E}{dt} + g_2 \cdot \frac{dK_L}{dt}$$

Auch dieses Problem ist von der Sache her über ein leistungsfähiges Computersystem zu lösen, aber in der Praxis muss eine grosse Zahl von letztlich subjektiven, aber zahlenmäßig quantifizierten Beurteilungs- und Zuteilungskriterien eingeführt werden, um die notwendigen kontinuierlichen und aggregierbaren Kostenfunktionen aller am Betrieb beteiligten Einheiten der Produktion und Logistik (Transport- und Verteilsystem) zu erhalten.

Von einem solchen zentralen, automatisierten und integrierten Energieführungssystem, wie dies die Fig. 8 anhand der funktionellen Hauptkomponenten aufzeigt, ist man in der täglichen Praxis allerdings noch weit entfernt, obwohl manche Teilerfolge in der Rationalisierung und Automation von Arbeitsvorgängen und zur Entscheidvorbereitung erzielt wurden. Dies kann vielleicht am Beispiel der täglichen Energieführung erläutert werden. Das in der Fig. 9 gezeigte Modell formalisiert die im Energieführungszentrum laufend zu treffenden Dispositionen bei bereits nach andern Kriterien ausgewähltem quasi-optimalem Betrieb, indem fortlaufend die prognostizierte Soll-Produktion nicht nur mit der Ist-Produktion, sondern auch mit der prognostizierten (und Ist-) Energienachfrage verglichen wird. Voraussetzung für die stete Identität dieser Energiebilanz ist, dass in jedem Zeitmoment die Wirkleistung der Produktionsanlagen gleich jener der Verbraucher einschließlich aller Transportverluste innerhalb des abgegrenzten Reguliernetzes ist. Dies gilt selbstverständlich auch für die Blindenergie, obwohl heute im Verbundbetrieb noch kaum Blindenergiebilanzen aufgestellt werden, weil die messtechnischen Voraussetzungen dazu noch weitgehend fehlen.

Die als Folge des stochastischen Nachfrageverlaufs und durch kleinere Produktionsschwankungen verursachten geringen Abweichungen zwischen Ist-Produktion und Ist-Nachfrage werden durch die regeltechnisch erzwungenen Produktionsänderungen der Regelkraftwerke ausgeglichen. Wird die Abweichung an Leistung und damit die Energie über eine definierte Zeitperiode grösser als ein vorgegebener Wert m , so läuft bei ebenfalls definierten minimalen Verkaufspreisen P_2 (Rp./kWh) und maximalen Ankaufspreisen P_1 je Energiequalität der Dispositionsvorgang quasi automatisch ab.

Ein solches Dispositionsmodell wird in der Praxis um so besser arbeiten, je genauer die Produktions- und Nachfrageprognosen erstellt werden können. Eine mögliche Methode zur

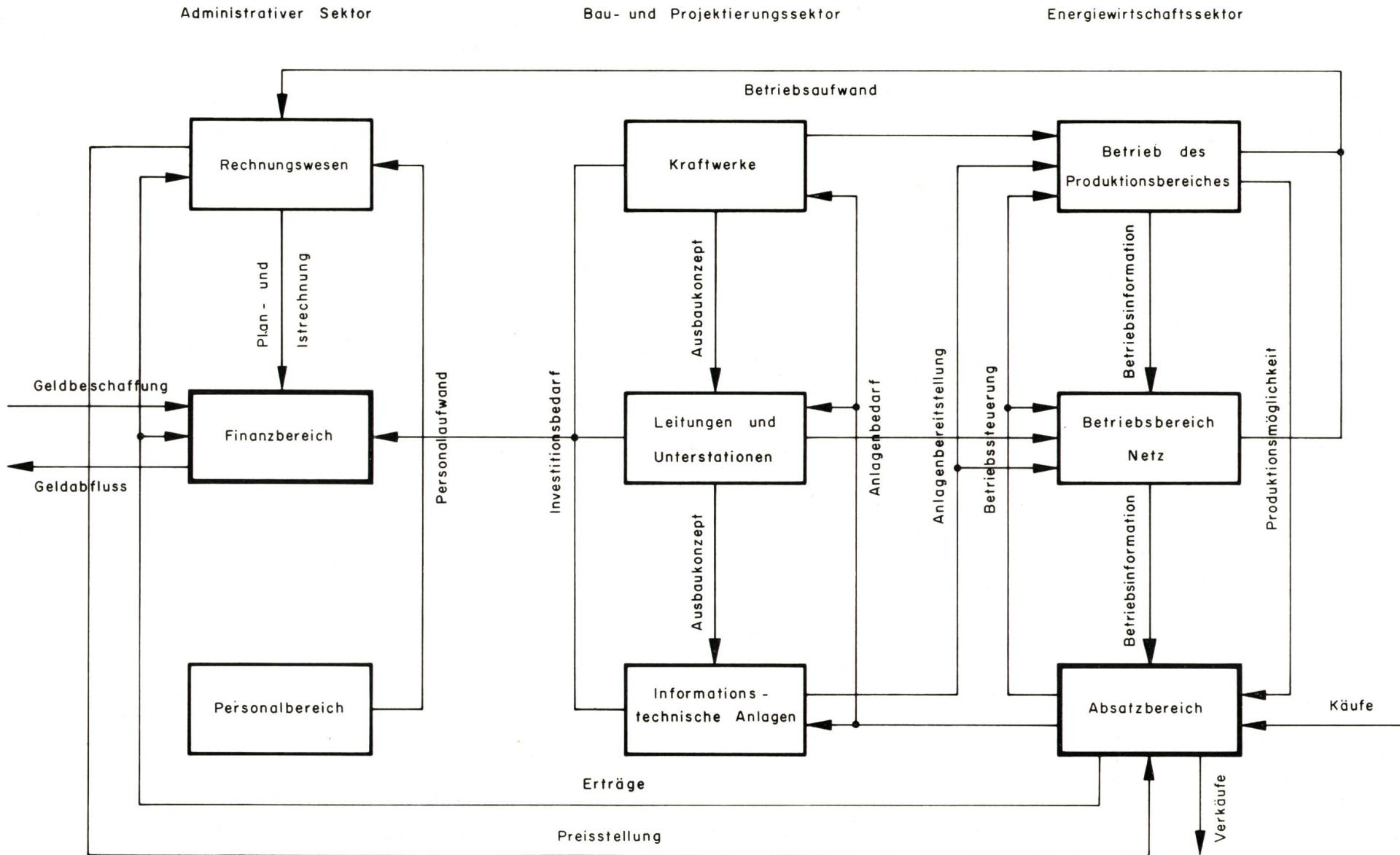
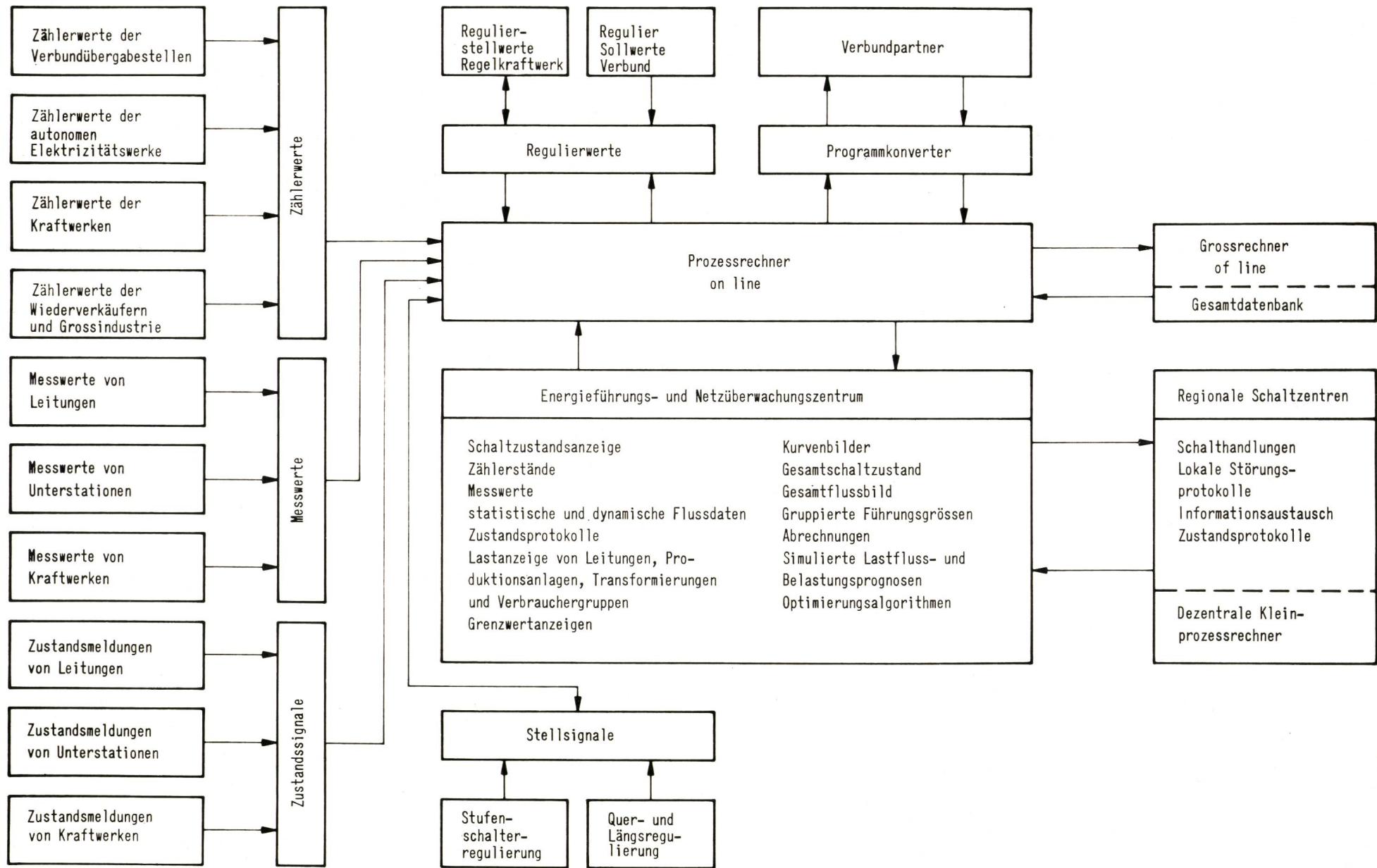


Fig. 6 Die wichtigsten internen Informationsverknüpfungen zwischen den Sektoren und Bereichen des Modell-EW.

Fig. 7 Zustandswerte und mengenmässige Flussgrößen im Betriebsinformationssystem.



Schätzung zukünftiger Tageslastkurven sei deshalb kurz anhand des Ablaufschemas der Fig. 10 skizziert. Wir brauchen dazu die im Rechner gespeicherten digitalisierten Tagesbelastungskurven der letzten Jahre, wobei nach vorgegebenen Auswahlkriterien und durch Anwendung der mathematischen Statistik eine wahrscheinliche Prognosekurve konstruiert wird. Da die funktionsbestimmende Nachfrage $L(t)$ zu den einzelnen Tageszeiten stark durch stochastische Einflüsse geprägt ist, werden die prognostizierten Stundenmittelwerte durch einen

normalverteilten, aber begrenzten Zufallszahlengenerator modifiziert, so dass eine simulierte Prognosekurve entsteht. Der so erzeugte Kurvenverlauf muss nun einen Energieinhalt aufweisen, wie er unabhängig davon dem prognostizierten Tagesenergiebedarf entspricht. Dementsprechend ist deshalb das Lastkurvenniveau der geplanten Tagesenergiemenge anzupassen, um die allen weiteren Dispositionen zugrunde liegende Prognoselastkurve zu erhalten. Um die Güte der so erzielten Prognosen testen zu können, muss die am Vortag erstellte

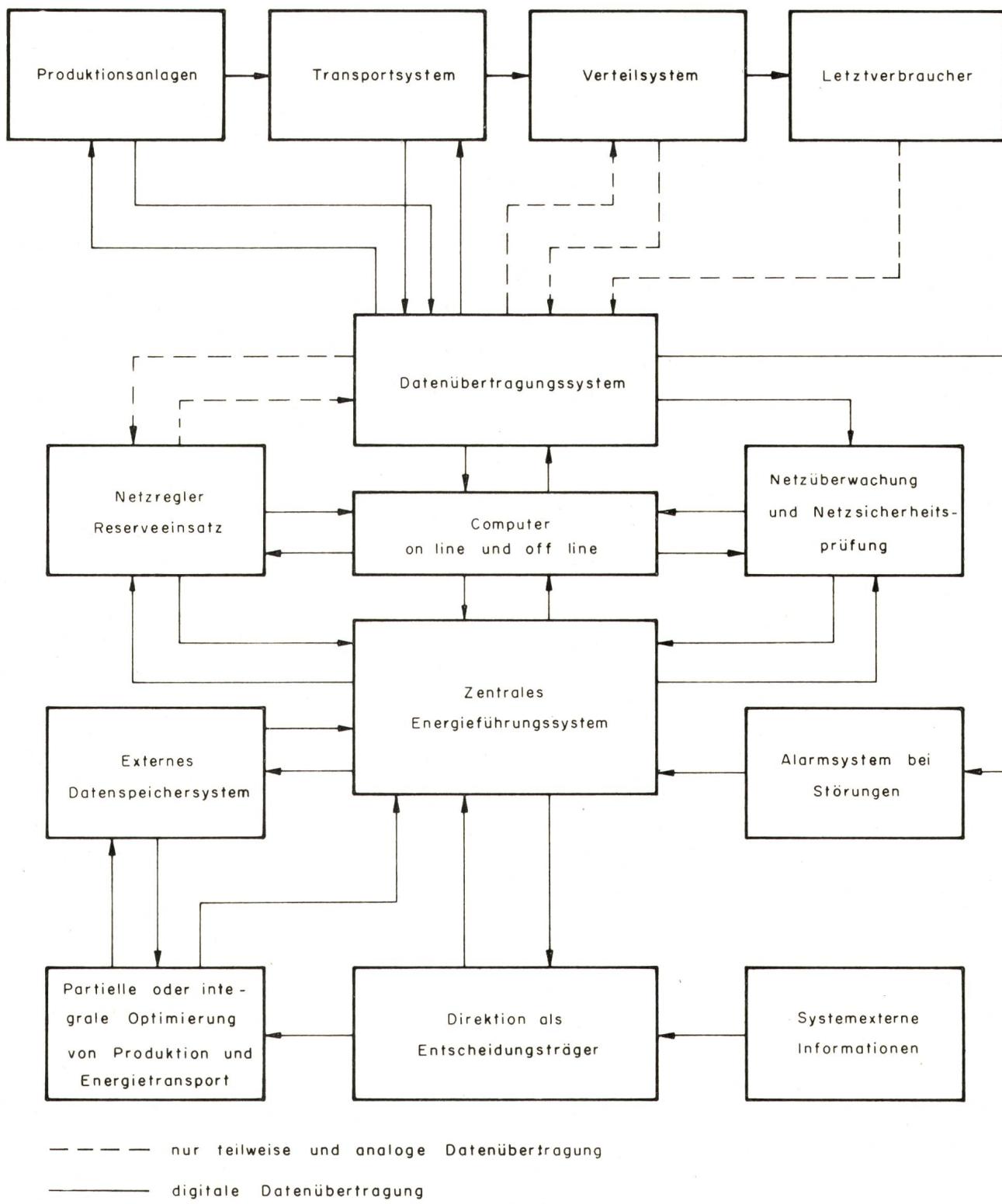


Fig. 8 Die funktionellen Hauptkomponenten für ein computergestütztes zentrales Energieführungssystem.

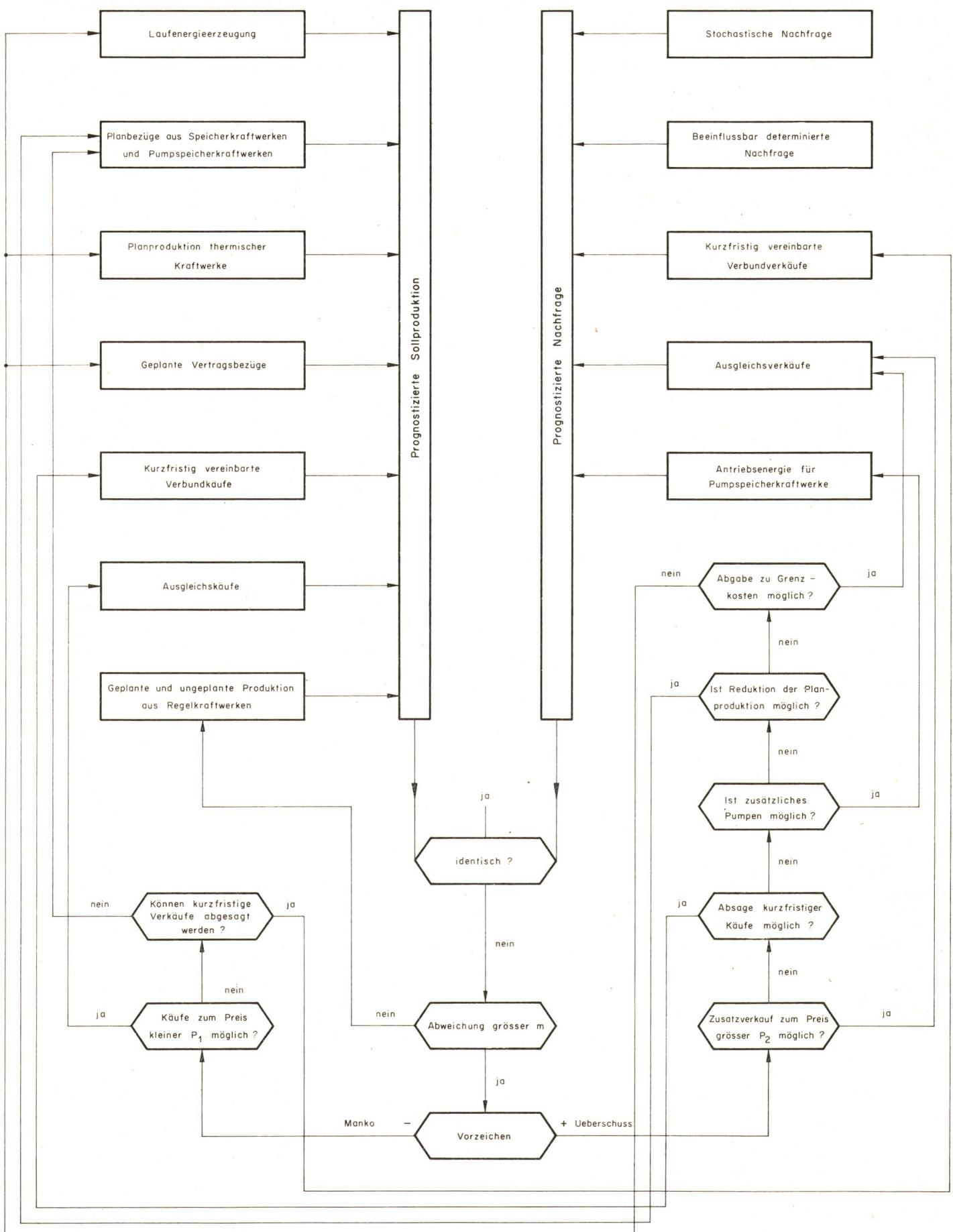


Fig. 9 Modell der täglichen Nachfrage- und Produktionsprognosen und dessen laufende Korrektur über die phys. Identität der momentanen Produktion und Nachfrage.

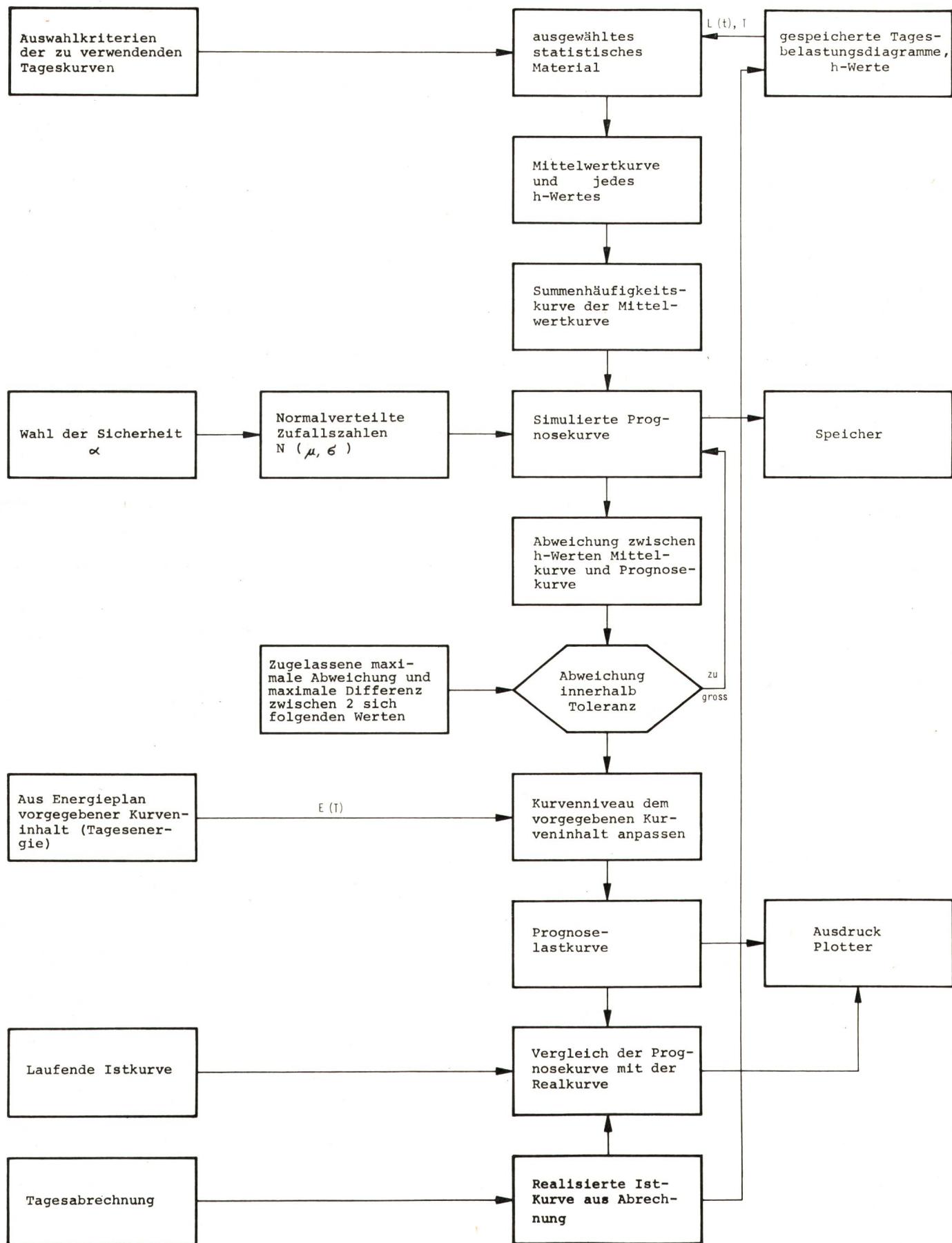


Fig. 10 Methodik zur Schätzung zukünftiger Tagesbelastungskurven.

Prognosekurve am Einsatztag laufend der Ist-Kurve gegenübergestellt werden, was zweckmässig mit dem Computer-Plotter geschieht.

Das bisher skizzierte kurzfristige Optimierungsproblem ist nun in mehrfacher Beziehung verknüpft und abhängig vom langfristigen Optimierungsproblem einer grösseren Elektrizitätsversorgungsunternehmung.

5. Das Problem der langfristigen Optimierung

Um im Rahmen eines kurzen Referates die Problemstellung zu vereinfachen, sei zusammenfassend unter «langfristig» ein Zeitraum verstanden, der auf dem Monat als Basisperiode aufbaut und das Vielfache davon umfasst. Aus praktischen Gründen und als Folge des jahreszyklischen Verhaltens gewisser Variabler können weitreichende Dispositionen auch auf der Basis von Jahresplänen erfolgen.

Langfristig hat der Energieplan in einem Elektrizitätswerk die zentrale Bedeutung. Aus welchen Aggregatgrössen setzt sich aber ein solcher Plan zusammen? Eine Antwort darauf vermittelt die Fig. 11. Hier sind in erste Teilaggregate die energiewirtschaftlich gleichartigen Energieangebote und Energiennachfrager zusammengefasst. Gleichartig bedeutet hier auf der Produktionsseite, dass die spezifizierten Aggregate eine von vielen Faktoren abhängige, aber in ihrem zeitlichen Verlauf (täglich und jahreszeitlich) ähnliche Produktionsganglinie aufweisen. Jedes Produktionsaggregat unterliegt dabei ganz spezifischen Produktionsrestriktionen. Beispiele wären etwa zuviel oder zuwenig Laufwasser in einem bestimmten Zeitpunkt, überschüssige oder zu geringe Speicherenergiemengen (als Speicherwasser ganz bestimmten Stauseen zugeordnet), zeitlich determinierte Absenkungs- oder Aufstauverpflichtungen sowie geplante oder ungeplante Stillsetzungen von einzelnen Kraftwerkanlagen oder ganzen Kraftwerken aus betrieblichen oder technischen Gründen. Die aus den Produktionsanlagen lieferbaren Energiemengen können deshalb wie folgt für eine bestimmte Zeitperiode näherungsweise berechnet werden:

$$E_p = f_1(W_L, W_{sp}, S_p, P_B, R_t, V_A, N_R)$$

Dabei bedeuten:

- W_L Verarbeitbare Laufwasserzuflüsse aller Kraftwerke in einer Periode
- W_{sp} Natürliche und gepumpte Speicherwasserzuflüsse aller nutzbaren Speicherbecken in einer Periode
- S_p Speicherbewirtschaftungspolitik bzw. Bezüge aus Speicherbecken in einer Periode
- P_B Bezüge aus den aufgrund von betrieblichen und wirtschaftlichen Gründen eingesetzten Umwälz-Pumpspeicherwerkern
- R_t Im Laufe der Periode wirksam werdende betriebliche oder technische Produktionsrestriktionen
- V_A In der Periode geplante oder effektive Anlagenverfügbarkeit als Folge von spontan (ungeplant) wirksam werdenden Anlagenausfällen
- N_R Allfällig aus fehlendem Absatz oder absatzpolitischen Gründen wirksam werdende Produktionseinschränkungen zu bestimmten Zeiten während der Periode

Dabei ist nun für eine Mehrperiodenenergieplanung unbedingt der Schwankungsbereich jeder dieser Grössen um den – sofern vorhanden – aus langjährigen Erfahrungswerten gebildeten Mittelwert als Erwartungswert unbedingt zu berücksichtigen. Die Bedeutung der Erfassung dieser Einflüsse sei anhand eines Beispiels dargestellt. Die Fig. 12 zeigt die in den hydraulischen Niederdruckkraftwerken der Bernischen Kraftwerke

AG erzeugte monatliche Energieproduktion als Mittelwert der Periode 1963–1972 sowie im Vergleich dazu die Erzeugung im Jahre 1970 mit starker Hydraulizität und 1972 mit schwacher Hydraulizität. Für die Energiepläne ist dabei die periodenbezogene kumulierte Energieerzeugung gemäss der unten Figur massgebend (wobei die gewählte Periodenlänge entscheidend ins Gewicht fällt).

Will man sich zur besseren Information und Absicherung von zutreffenden Entscheiden nicht mit einem Mittelwertplan (Budget) zufriedengeben, sondern den Unsicherheitsrahmen bei der Energieplanung ausschöpfen, so können die einzelnen Produktions- oder Nachfrageaggregate durch Simulationsmodelle abgebildet werden. So kann etwa die durch viele Einflussfaktoren determinierte Laufwasserproduktion zur Gewinnung von alternativen Produktionsplänen durch einen Simulator gemäss Fig. 13 ersetzt werden.

Eine Matrix von wasserwirtschaftlichen, technischen, betrieblichen und energiewirtschaftlichen Einfluss- und Begrenzungsfaktoren wirkt auf die Gesamtheit der zur Erzeugung von Laufenergie zur Verfügung stehenden Anlagen und erzeugt über einen normalverteilten, nach oben begrenzten Zufallszahlengenerator die planwirksame Prognoseproduktion. Ein den Gegebenheiten angepasstes Simulationsmodell ist sodann für die Abbildung der planwirksamen thermischen Produktion sowie der Speichereinsatzpolitik vorzusehen. Im Sinne der Aggregation der Fig. 11 sind sodann die Produktionsplänsummen zu bilden und den prognostizierten und geplanten Nachfragemengen gegenüberzustellen. Die Beurteilung der Aktivitäten im Verbundmarkt stellt dabei besonders hohe Anforderungen an eine realistische Planung und macht die Aufstellung alternativer Planvarianten mit definierten Eintreffwahrscheinlichkeiten unerlässlich.

Ist der Einsatz der Pumpspeicherwerke vor allem von betrieblichen und ökonomischen Faktoren abhängig, so sind die über eine Periode kumulierten möglichen Fehlmengen massgebend für die Bereitstellung der erforderlichen Reserven.

Ein in der dargestellten Weise globaler Energieproduktions- und Beschaffungsplan ist allerdings für wesentliche Entscheide noch zu ungenau, weil die Produktionsfunktionen der einzelnen Kraftwerke und Kraftwerktypen noch nicht berücksichtigt sind. Dies kann in einer für die Praxis ausreichenden Näherung dadurch erzielt werden, dass die Tage in Zeitintervalle eingeteilt werden, die im wesentlichen durch das Nachfrageverhalten nach Energie innerhalb dieser Zeitintervalle bestimmt werden. In analoger Weise sind auch die Wochentage und Monate zu klassieren.

Neben dem Produktionsplan kommt der Aufstellung eines Absatzplanes als Teil des Energieplanes grosse Bedeutung zu. Hier sind die Verbrauchssummen der innerhalb des eigenen Reguliernetzes und nach Zählerverrechnung frei beziehenden Abnehmerkategorien mittels zweckmässiger Prognosemethoden zu schätzen. Die Einflussfaktoren auf die einzelnen Abnehmergruppen sind dabei vielfältig und haben grundsätzlich stochasticischen Charakter. Demgegenüber sind die Verkäufe im Verbundsystem langfristig aufgrund des eigenen Energieaufkommens und den prognostizierten Marktverhältnissen (wenigstens bezüglich Mengen) relativ gut planbar. Dasselbe gilt auch für die zu liefernde Antriebsenergie für die Saisonpumpspeicherung, obwohl die jeweilige Hydraulizität in den Sommermonaten hier einen gewissen Einfluss ausübt. Die für die Umwälz-Pumpspeicherwerkere bereitzustellende An-

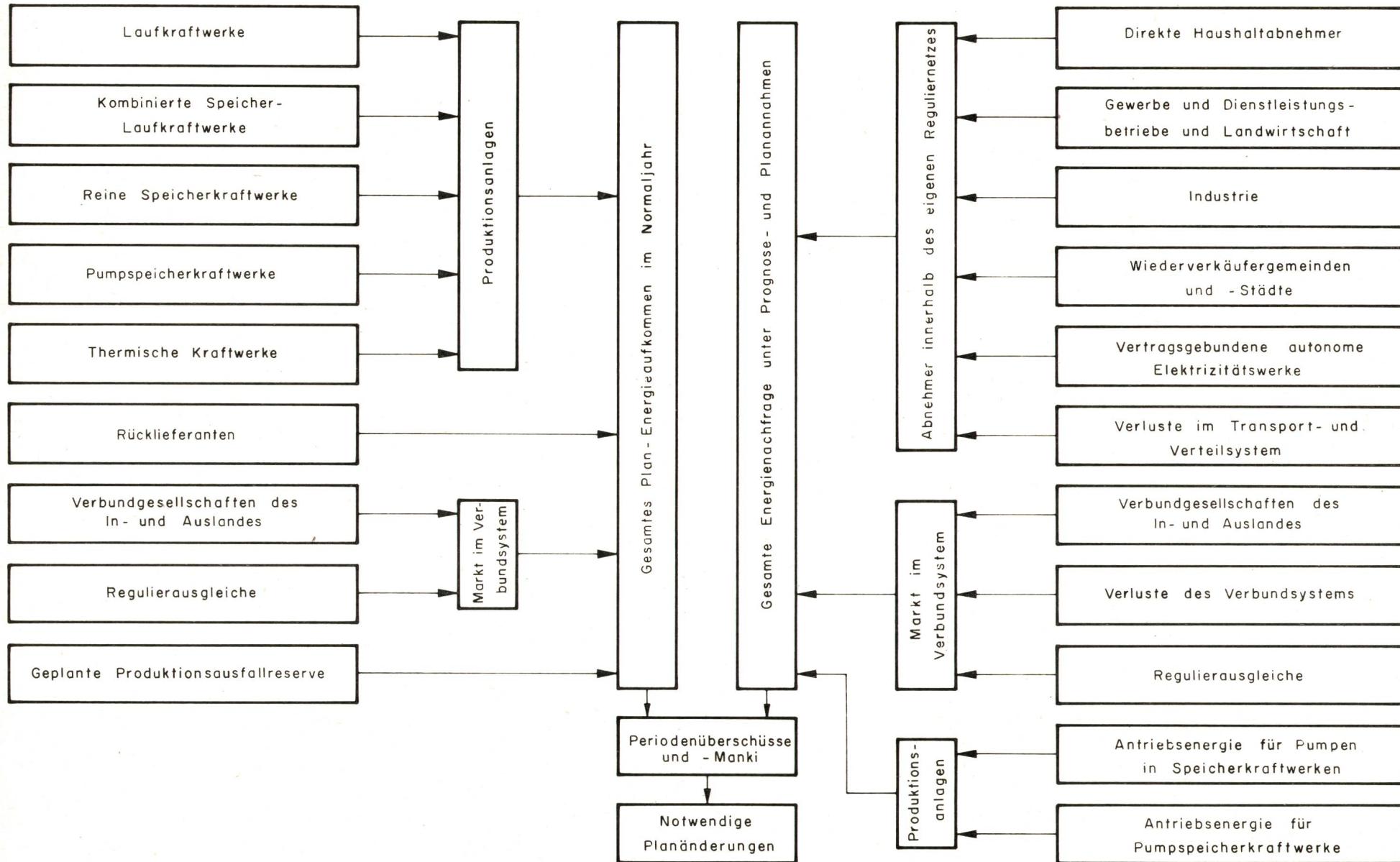


Fig. 11 Aufbau und Zusammensetzung von Energienengenplänen für eine Folge von Zeitperioden.

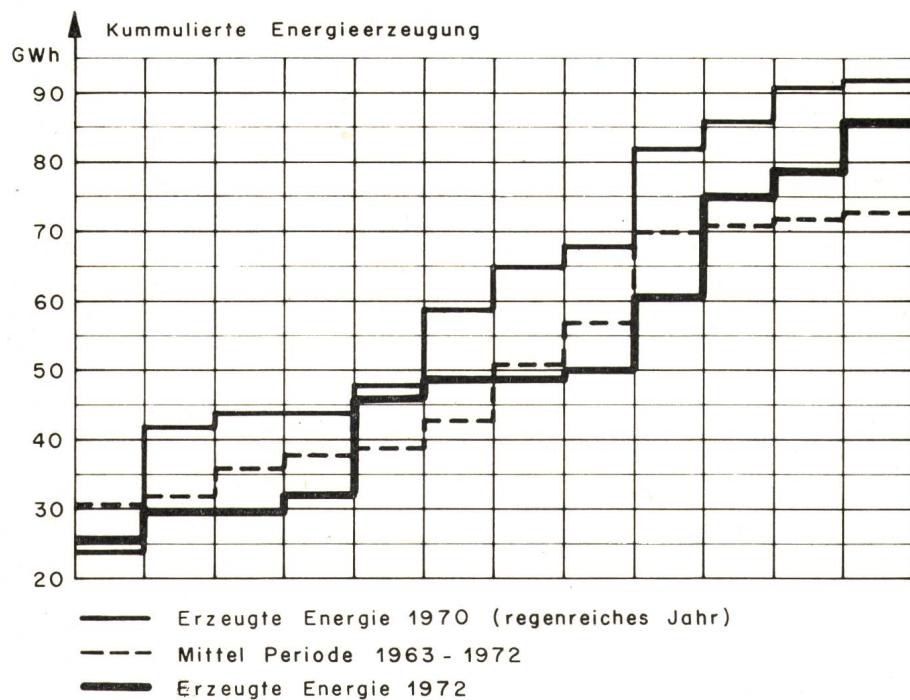
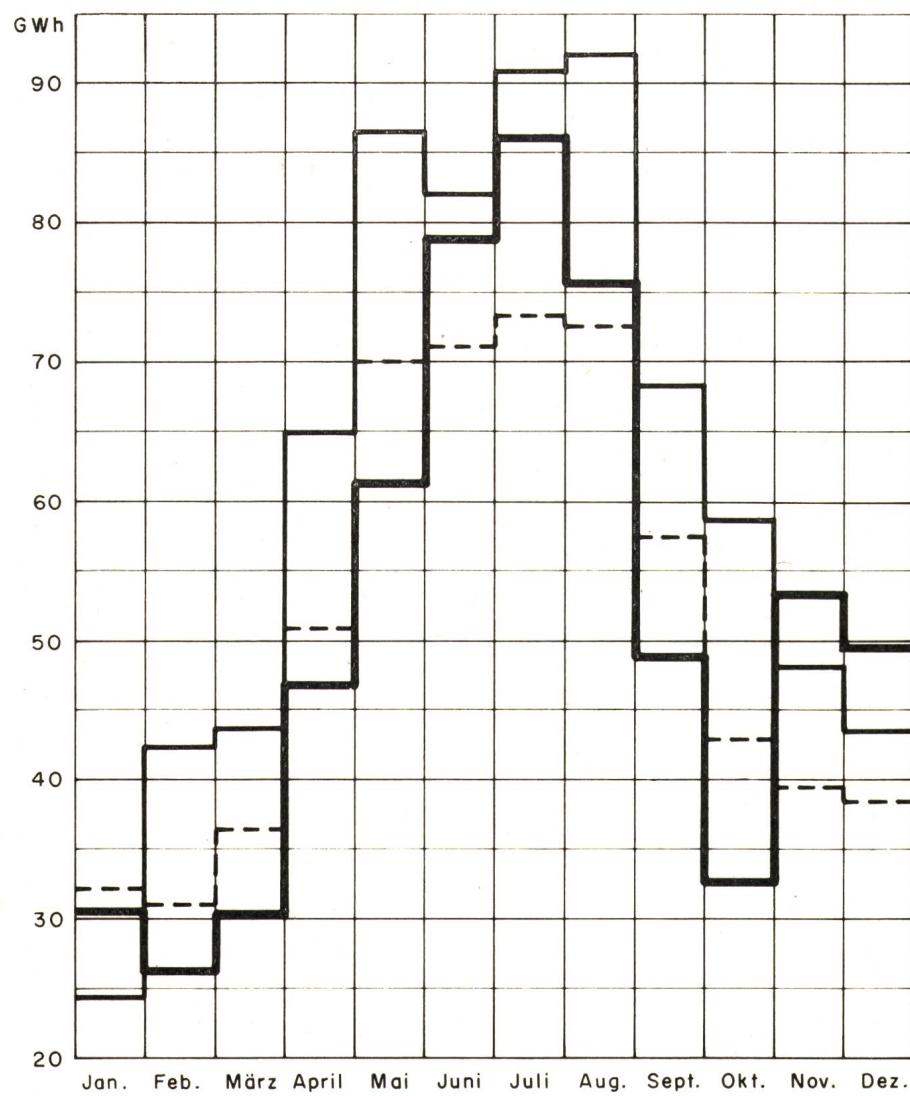


Fig. 12 Monatliche Energieerzeugung der eigenen hydraulischen Kraftwerke der BKW.

triebsenergie ist im wesentlichen durch betriebliche Belange sowie der aus ökonomischen Gründen wünschbaren zeitlichen Verschiebung des Energieeinsatzes (Veredelungsbetrieb) bestimmt.

Insgesamt kann damit langfristig die Energienachfrage durch folgende Parameter näherungsweise charakterisiert werden:

$$E_N = f_2(N_{t-1}, T_{T,J}, K, Z, V_p, V_N, E_A)$$

Dabei bedeuten:

N_{t-1} Nachfrage der Vorperiode

$T_{T,J}$ Tageszeitlicher und jahreszeitlicher Temperaturmittelverlauf

K Einkommensbestimmende Konjunkturlage

Z Zufällige Veränderungen, deren Ursache ungeklärt ist

V_p Geplante Verkäufe auf vertraglicher Basis oder als geplante Sollverkäufe

V_N Verluste im gesamten Transport- und Verteilernetz

E_A Geplante Antriebsenergie für den Pumpeneinsatz

Die zeitgerechte Gegenüberstellung von E_p und E_N wird je nach der geplanten Bedarfsentwicklung und dem vorhandenen und geplanten Produktionspotential in jeder Periode Energieproduktionsüberschüsse oder -manki ausweisen, die mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit auftreten und zu entsprechenden Planänderungen führen müssen.

$$E_{pt} = E_{Nt} \pm \Delta E_t$$

wobei

E_t den in der Periode t wirksamen Planüberschuss oder das Planmanko bedeutet.

Will man das Verhalten eines solchen vielperiodigen Langfristplanes testen und die in den einzelnen Perioden wahrscheinlichsten Überschüsse und Manki ermitteln sowie das Systemverhalten untersuchen, so sind den ausgewiesenen Produktions- bzw. Nachfragemengen bestimmte Eintreffwahrscheinlichkeiten zuzuordnen. Dies kann dann – im konkreten Fall selbstverständlich diskrete – Verteilungsfunktionen zur Folge haben, wie dies Fig. 14 veranschaulicht.

Bisher haben wir uns mit der reinen Mengenplanung befasst. Diese bildet selbstverständlich die Grundlage für den Kosten- und Ertragsplan.

Bezüglich der Kostenplanung wollen wir uns hier auf zwei wichtige Aspekte beschränken.

Zuerst wollen wir uns die Frage stellen, ob es für eine sehr kapitalintensive Unternehmung, wie dies ein Elektrizitätswerk ist, ein auf eine umgesetzte Energieeinheit (kWh) bezogenes spezifisches Kostenoptimum in einer Periode (etwa einem Jahr) gibt. Dazu dient uns Fig. 15. Hier sind die anfallenden Jahrestypen K_j über der Beschäftigung im Sinne der Kostentheorie, konkret über die in Anspruch genommene Benutzungsdauer der Höchstlast aufgetragen. Die im Verhältnis zu den beschäftigungsvariablen Kosten sehr hohen Fixkosten der Produktion und insbesondere des Transport- und Verteilungssystems führen zu einer abgeflachten Kostenkurve und stark degressiven spezifischen Kosten, deren Minimum bei maximaler Systemauslastung auftritt. Praktisch tritt die Begrenzung durch die effektive Nachfrage auf, weshalb jede Nachfrageänderung, die zu einer höheren Benutzungsdauer (d. h. höherer Auslastung des bestehenden Systems) führt, geringere spezifische Kosten zu erreichen gestattet. Bei der Aufstellung eines langfristigen Kostenplanes wird sich für jedes größere Elektrizitätswerk immer wieder folgende Frage stellen: Soll die in

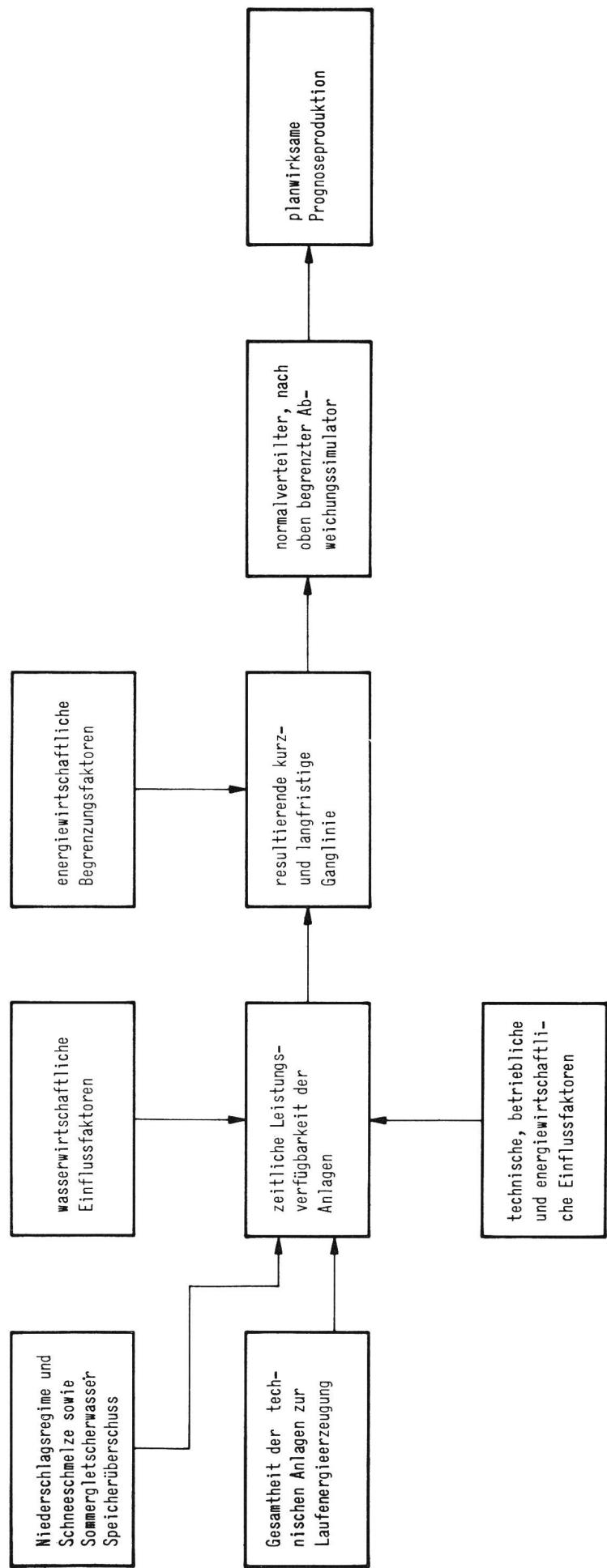
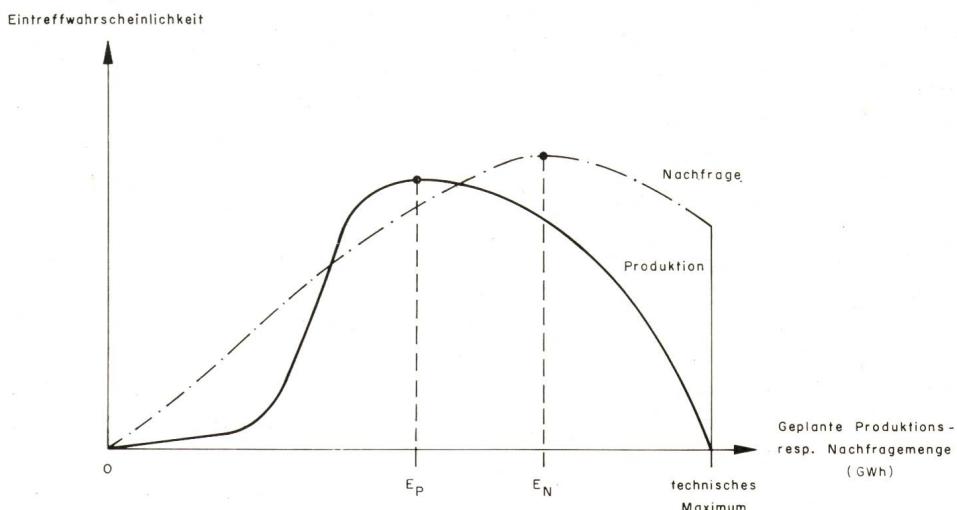


Fig. 13 Simulationsmodell der täglichen und monatlichen Laufenergieerzeugung.

Fig. 14

Empirische Verteilungsfunktionen der Plan-Produktions- bzw. -Nachfragemengen einer Energiequalität.



Zukunft erwartete Mehrnachfrage durch Energiezukaufe über langfristige Verträge oder durch den Neubau eigener Produktionsanlagen sichergestellt werden? Betrachten wir zur Beantwortung dieser Frage Fig. 16. Hier sind erwartete preiskorrigierte reale Jahreskosten über dem erwarteten Energieumsatz der einander folgenden Planjahre aufgetragen. Diese Figur veranschaulicht einen echten Gegensatz zwischen den Ausgaben für den Zukauf von Energie oder die Erstellung neuer Produktionsanlagen einerseits und der Durchschnittskostenentwicklung andererseits. Also ein echter Gegensatz zwischen Finanzwirtschaft und Energiewirtschaft. Entfällt die Beschränkung der Geldmittel für die Finanzierung und kann die zu erwartende Mehrproduktion in genügendem Umfang marktmäßig verwertet werden, dann wird auf lange Sicht das Kostenopti-

mum immer mit dem Bau von eigenen Erzeugungsanlagen realisiert, weil angenommen werden darf, dass die Energie anbietende Konkurrenz langfristig nicht billigere Produktionsanlagen erstellen kann. Mit diesen Ausführungen sind wir nun bereits auf den engen Zusammenhang zwischen Energiewirtschaft und Finanzwirtschaft gestossen.

6. Die Interdependenz zwischen Energiewirtschaft und Finanzwirtschaft

Will man die Interdependenzen zwischen der Energiewirtschaft und der Finanzwirtschaft untersuchen, so hat man zwangsläufig vom Energieplan auszugehen.

Dem Energieplan nachgelagert ist die Leistungsbilanz als Leistungsplan, wobei allfällige Restriktionen erst den bereinig-

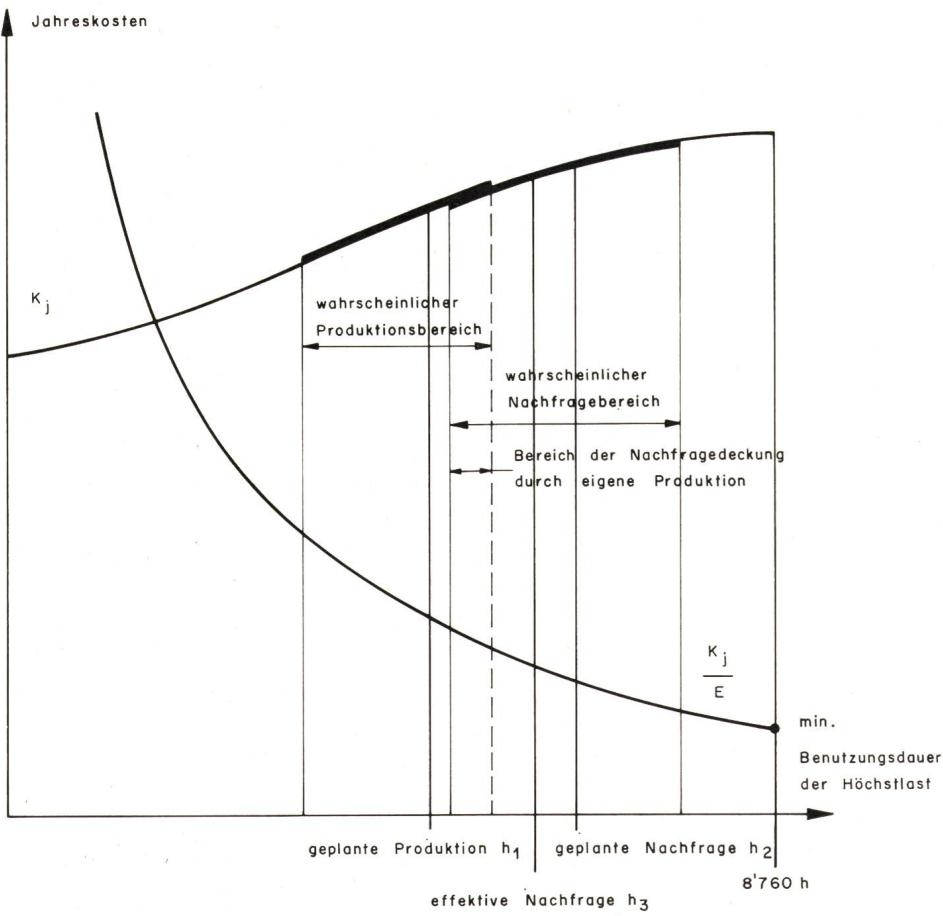
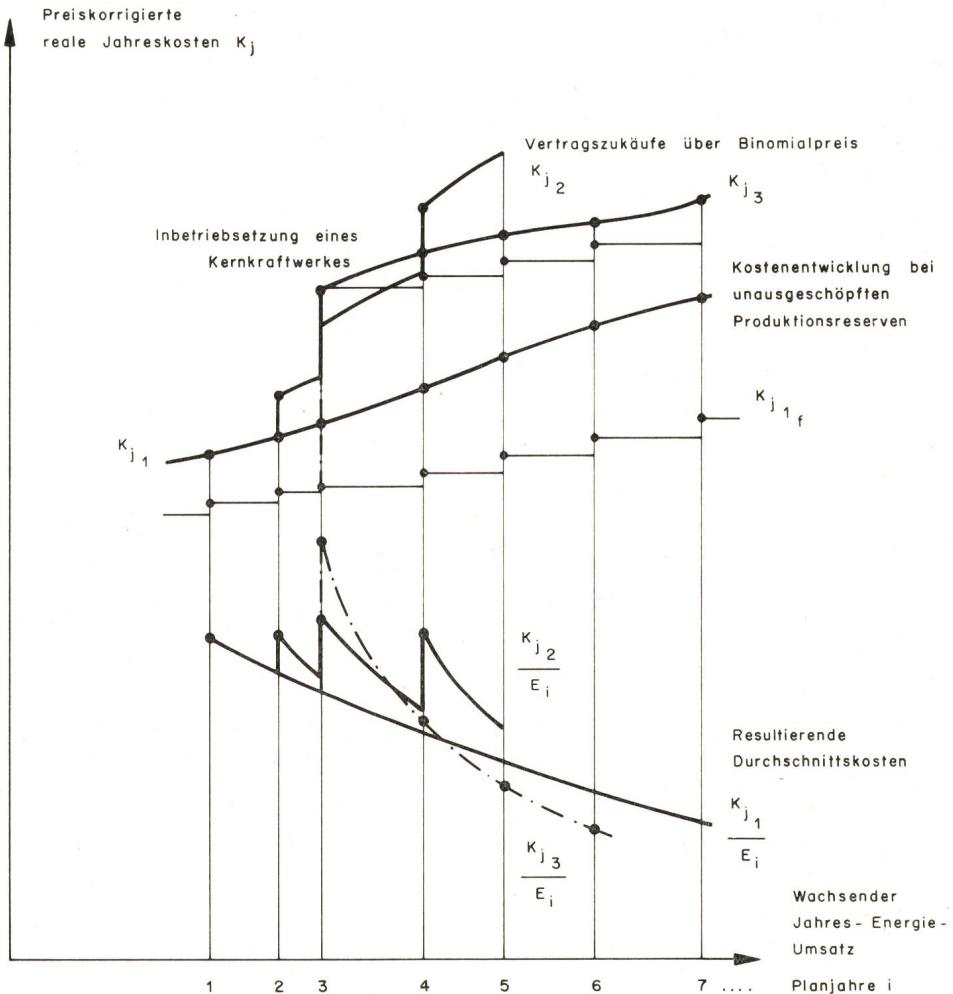


Fig. 15

Zum Problem des Gesamtkostenoptimums in einer Periode.

Fig. 16

Die Änderung der Kostenstruktur bei verschiedenen Energiebedarfsdeckung und wachsendem Umsatz



ten und für alles Folgende massgebenden Energieplan aufzustellen gestatten. Aus diesem Mengenplan kann anschliessend der Energiekostenplan und unter Berücksichtigung der Preispolitik auch der Energieertragsplan aufgestellt werden. Dem Energieertragsplan vorgelagert ist ein Preissystem, das auf sehr verschiedenen Überlegungen basieren kann. Betrachten wir dazu Fig. 19. Hier ist links das Entwicklungsmässig ältere, aber für eine Versorgungsunternehmung typische einzelkostenorientierte Preissystem dargestellt. Man geht dabei vom Typus des Abnehmers oder bestimmten technischen Verbrauchsgeräten aus und versucht, über Einzelkostenzurechnungen und bestimmte Zuschläge zu Preisen zu gelangen, die dem Verwendungszweck angemessen sind. Einer solchen Berechnung liegen dann Kostenträgerzurechnungen zugrunde, wie sie etwa als Spitzenlastanteilverfahren, Höchstlastverfahren oder Benutzungsdauerverfahren in der Literatur bekanntgeworden sind. Alle diese Verfahren – und auch Kombinationen davon – befriedigen jedoch kaum, um für eine Vielzahl von verschiedenen Verbrauchertypen ein angemessenes kostenorientiertes Preissystem aufzustellen. Man geht deshalb heute mehr vom Gesamtkostenplan aus und versucht, über einen Ein- oder Mehrfaktorentarif ein an den Gesamtkosten orientiertes Tarifpreissystem aufzubauen, wie dies durch die Fig. 19 rechts veranschaulicht wird.

Kommen wir wiederum auf den Kosten- und Ertragsplan und das Ablaufschema der Fig. 17 zurück, so erhält man unter Berücksichtigung der übrigen Unternehmungsaktivitäten die Energie-Erfolgsrechnung.

Der rektifizierte langfristige Energieplan determiniert nun aber auch den Investitionsplan und daher wiederum zusammen mit der Energie-Erfolgsrechnung den langfristigen Finanzplan, bestehend aus dem Plan der Mittelherkunft und der Mittelverwendung. Damit kann dann auch die Planbilanz erstellt und ein langfristiger Liquiditätsplan aufgestellt werden. Die Planbilanz und die Energie-Erfolgsrechnung erlauben sodann die Aufstellung eines Rentabilitätsplanes als Grundlage der für die Zukunft anzustrebenden Preis- und Tarifpolitik der Unternehmung.

Sind auch aus kurzfristiger Sicht Rentabilitätsplan und Liquiditätsplan in ihren Zielsetzungen gegensätzlich, so ist auf lange Sicht eine ausreichende Rentabilität in jedem Fall Voraussetzung für eine jederzeit genügende Liquidität.

Der Rentabilitätsplan ist langfristig wiederum massgebend für die Art der Energiebeschaffung und damit der Investitionspolitik der Unternehmung.

Für ein im Sinne der Systemtheorie vollständiges Planungssystem müssen die meisten der bisher besprochenen Hauptpläne weiter untergliedert werden. Dies sei hier nur noch anhand des Plansystems für eine langfristige Planerfolgsrechnung anhand der Fig. 18 gezeigt. Je nach der Struktur der Unternehmung werden dabei gewisse Pläne von grösserer Bedeutung sein als andere. Wichtig ist aber in jedem Fall, dass erkannt wird, dass die Ziele der einzelnen Pläne voneinander und auch von andern Führungsdispositionen abhängig sind und nicht isoliert aufgestellt werden dürfen.

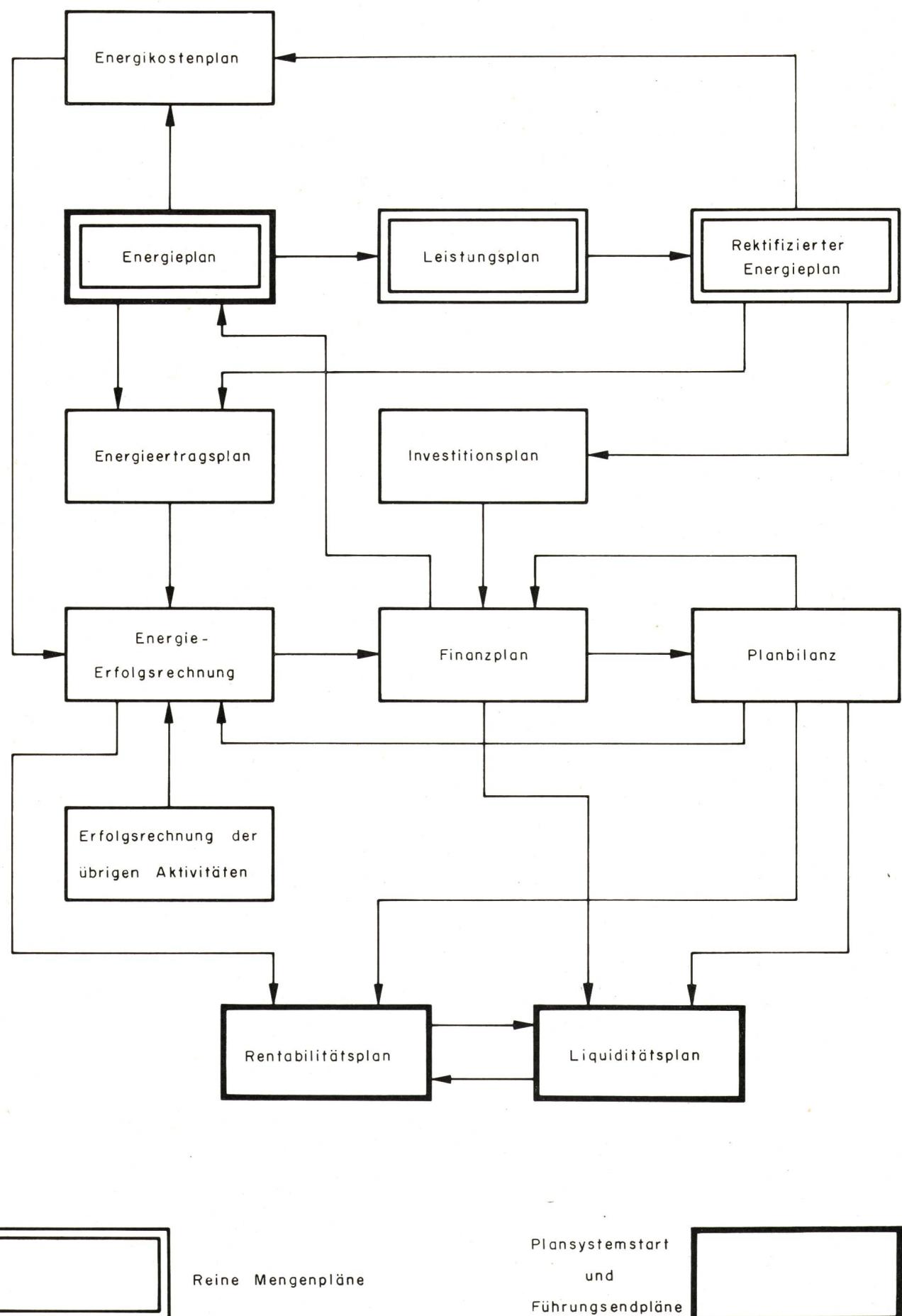


Fig. 17 Die Interdependenzen von Energieplan und Finanzplan im Hinblick auf die Planrentabilität und Planliquidität.

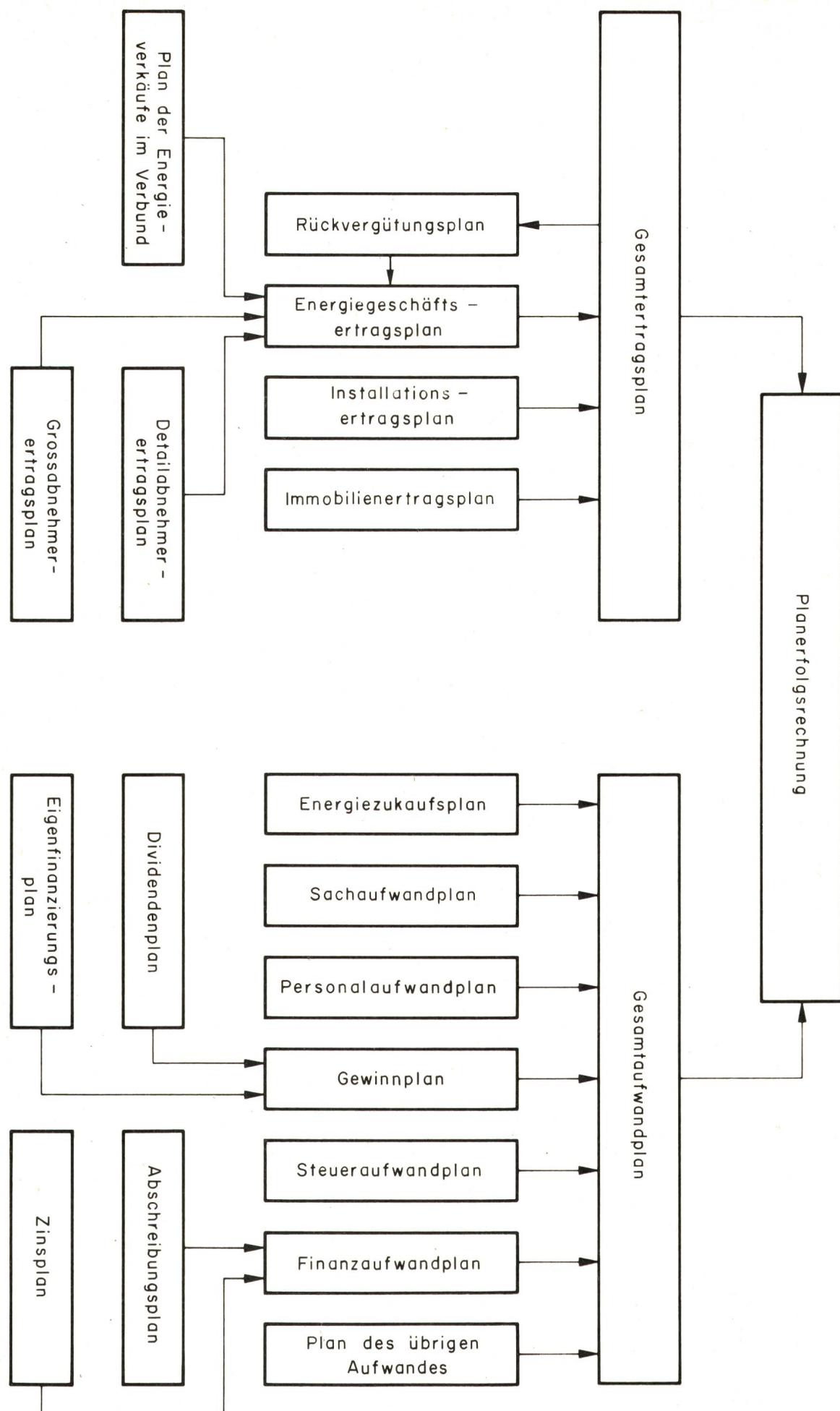


Fig. 18 Die wichtigsten Teilpläne zur Erstellung einer Planerfolgsrechnung eines EW.

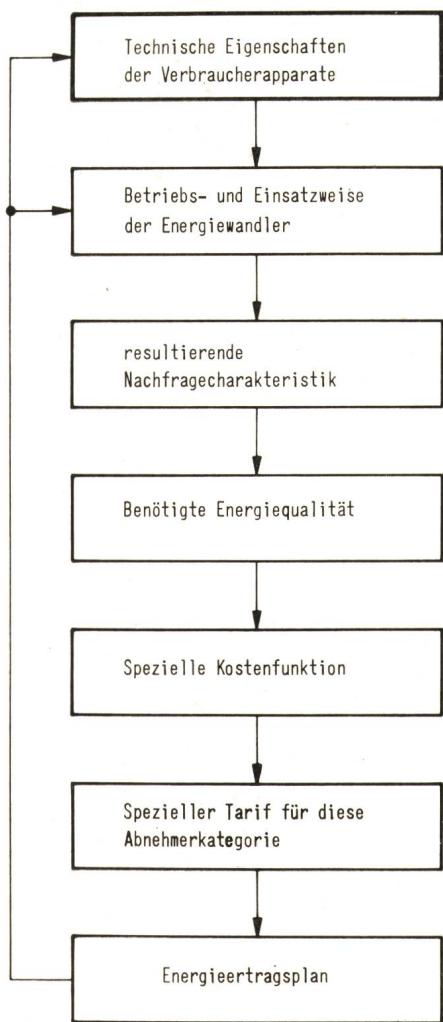


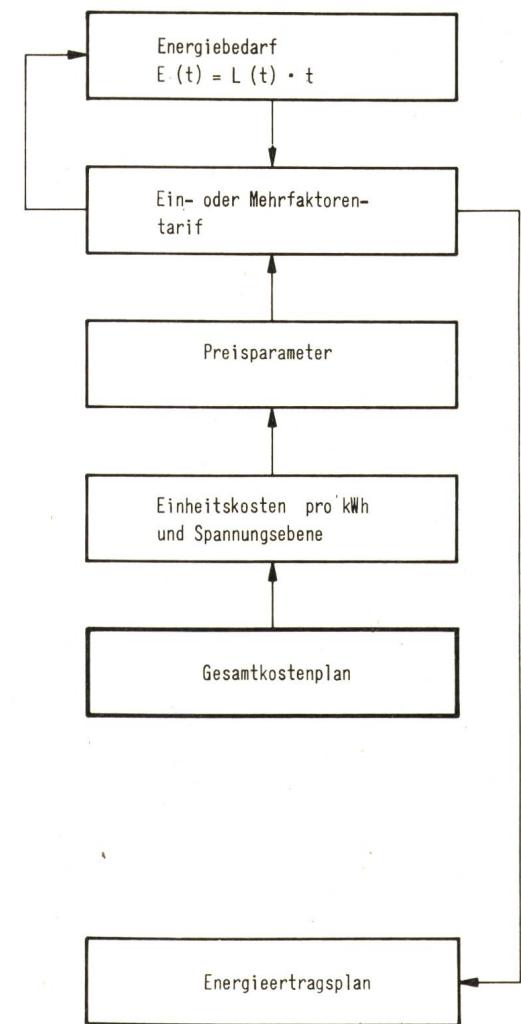
Fig. 19 Einzelkostenorientiertes Preissystem

In der Praxis erscheint mir nur ein institutionalisiertes Vorgehen beim Aufstellen der Pläne mit mehreren iterativen Planungsdurchläufen geeignet, jeweils optimale Pläne bzw. Plandaten zu gewährleisten, die dann als Entscheidungsgrundlage für das verantwortliche Management dienen können.

7. Schlussfolgerungen

Fassen wir nun kurz zusammen, für welche Zwecke OR-Methoden im anfangs definierten Sinne zur Führung einer grösseren Elektrizitätsunternehmung eingesetzt werden können, so sind dies folgende wichtigste Einsatzgebiete:

1. Die Verbesserung der Information über die Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft einzelner Unternehmungsbereiche und der Gesamtunternehmung.



Gesamtkostenorientiertes Preissystem

2. Die Optimierung der technischen Prozessabläufe in einzelnen und der Gesamtheit der Produktionsanlagen sowie des Netzbetriebes.

3. Die Optimierung der Gesamtplanung der Unternehmung.

In allen diesen Aufgabengebieten können m. E. in Zukunft gegenüber heute noch ganz wesentliche Verbesserungen und grundsätzliche Fortschritte, gerade auch mit Methoden des OR, erzielt werden.

Adresse des Autors:

Dr. H. Lienhard, Vizedirektor der BKW, Viktoriaplatz 2, 3000 Bern.