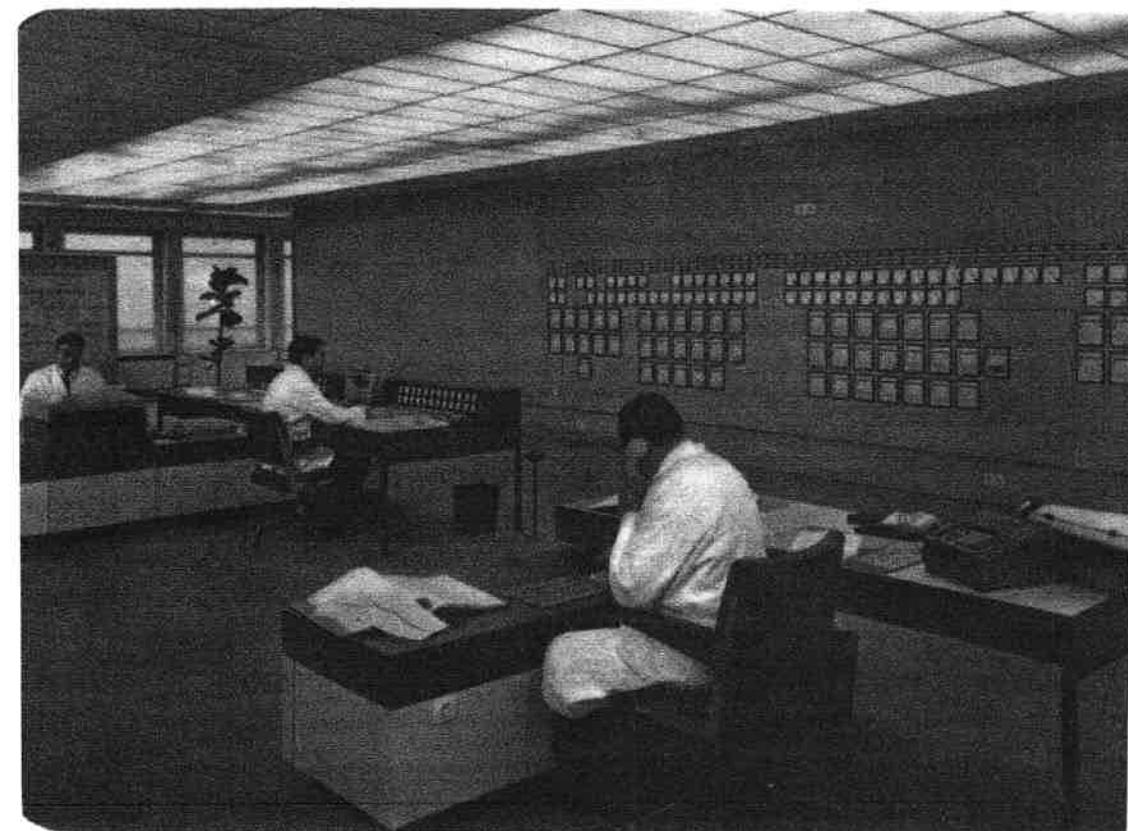


Joachim Prange,
BEWAG, Berlin

Die UNIVAC 492 als Hilfsmittel für die Lastverteilung der Berliner Kraft- & Licht (BEWAG)- Aktiengesellschaft

Abbildung 1: Die Warte der
Lastverteilung der BEWAG



Gliederung

1. Das BEWAG-Rechenzentrum
2. Die Lastverteilung
 - 2.1. Aufbau
 - 2.2. Aufgaben
3. Das Kostenzuwachsverfahren
4. Das Programm *Optimierung des Maschineneinsatzes*
 - 4.1. Programmablauf
 - 4.2. Berechnungsbeispiel
 - 4.3. Datenfluß
5. Künftige Weiterentwicklung
 - 5.1. Anforderungen an das Programm
 - 5.2. Datenfluß
 - 5.3. Programmablauf
6. Nutzen
7. Zusammenfassung
8. Literaturhinweise

1. Das BEWAG-Rechenzentrum

Das Rechenzentrum der BEWAG besteht aus einer UNIVAC 492 mit einem Kernspeicher von 2×32 K Wörtern zu je 30 Bit.

Angeschlossen sind ein Datenübertragungssystem (CMC), eine UNIVAC 1004 als Ein-/Ausgabeeinheit, ein Schnelldrucker, zwei Magnettrommeln (FASTRAND II, FH 880) und neun Magnetbaineinheiten UNISERVO VIII C.

Die gewählte Konfiguration¹ ermöglicht es, alle zur Zeit anfallenden technischen und kaufmännischen Probleme zu lösen.² Die zur Verfügung stehende Rechenzeit wird zu einem Drittel für die Lösung technischer Probleme genutzt.

Eines dieser Probleme ist die Optimierung des Maschineneinsatzes. Es erfordert einen 24-Stunden-Betrieb der Anlage und eine Ein-/Ausgabestation des Datenübertragungssystems (CMC). Durch die Möglichkeit der Real-Time-Verarbeitung konnte der Aufwand für zwei getrennte Rechenzentren für technische und kaufmännische Probleme vermieden werden.

2. Die Lastverteilung

2.1. Aufbau

Der Neubau der BEWAG-Hauptverwaltung bot nicht nur die Möglichkeit, das neue Rechenzentrum, sondern auch die Lastverteilung (Abbildung 1) zentral unterzubringen.

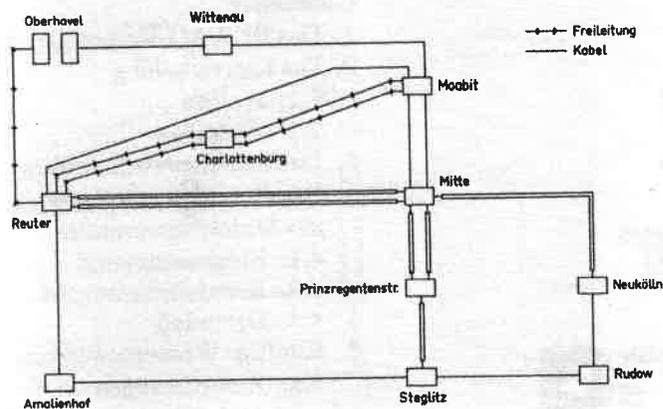


Abbildung 2: Die Kraftwerke und Abspannwerke im 110-kV-Netz der BEWAG

Im Oktober 1967 konnte die Lastverteilung die neuen Räume im obersten Stockwerk eines Hochhauses beziehen. Dieser hochgelegene Arbeitsplatz erlaubt es, die Entwicklung des Wetters selbst zu verfolgen. Für das Westberliner Inselnetz ist es von besonderer Bedeutung, die Größenordnung jeder wetterbedingten Lastspitze rechtzeitig abschätzen zu können, da nur die eigenen Kraftwerksreserven zur Verfügung stehen.

Das Blindschaltbild zeigt die 110-kV-Anlagen aller Kraft- und Umspannwerke sowie alle Verbindungselemente. Jede Schalterstellungsänderung wird mittels eines modernen Übertragungssystems, das auch alle für die Lastverteilung wichtigen Meßwerte überträgt, akustisch und durch Lampensignal gemeldet.

Die Frequenz wird von einem eigens für diese Warte konstruierten Pult aus geregelt. Mittels eines quartzesteuerten elektrischen Schwingkreises wird der Gang der Synchronuhren in West-Berlin gesteuert. Damit werden Abweichungen von Zehntelsekunden gegenüber der astronomischen Zeit erkannt und ausgeregelt.

Durch die vorhandene Fernschreibanlage ist die Lastverteilung nicht nur mit allen Kraftwerken, sondern auch mit der UNIVAC 492 direkt verbunden.

2.2. Aufgaben

Für den Leistungstransport aus den vorhandenen sechs Kraftwerken mit einer installierten Leistung von 1299 MW zu den Abspannwerken 110/30 kV in den Verbraucherschwerpunkten betreibt die BEWAG zwei induktiv gekoppelte 110-kV-Netze (Abbildung 2).

Alle Schaltungen in diesem Verbundnetz werden mit der Lastverteilung abgesprochen und nach ihrer Weisung vollzogen.

Die besondere Lage Berlins und der dadurch bedingte Betrieb als Inselnetz, d.h. ohne jegliche Stromversorgung von außen, erfordert einen sorgfältigen Einsatz der Erzeugungseinheiten bei Beachtung der Reserveleistung und der Netzsicherheit. Bei diesen gegebenen Einschränkungen ist es für die Lastverteilung von besonderer Bedeutung, die Erzeugungseinheiten so einzu-

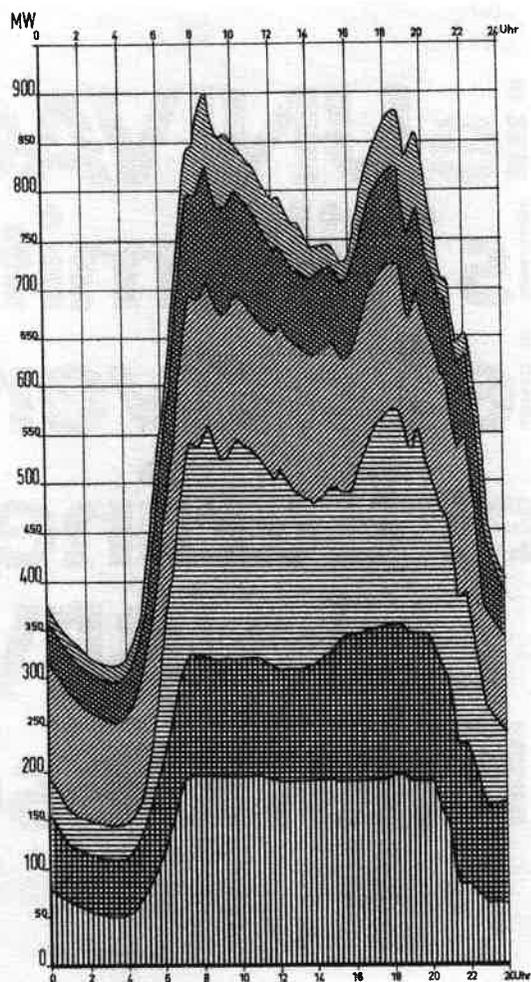


Abbildung 3: Belastungsverlauf eines Tages und seine Deckung durch die vorhandenen Kraftwerke

setzen, daß ein wirtschaftliches Optimum, d.h. ein Minimum an Kostenaufwand erzielt wird.

Diese recht umfangreiche Aufgabe erfordert eine möglichst genaue Vorausschätzung der zu erwartenden Belastung.

Um jeden Punkt dieses »Belastungsgebirges« (Abbildung 3) mit dem geringsten Aufwand an Kosten zu decken, sind zwei Maßnahmen durchzuführen.

Die erste Maßnahme bezieht sich auf die Erzeugungseinheiten, die in Betrieb genommen werden müssen, um die Belastung einschließlich Reserve zu decken (Leistung der größten Einheit und 6% der Gesamtlast). Dafür stehen der Lastverteilung in den sechs Kraftwerken 18 Erzeugungseinheiten sowie ein Sammelschienenkraftwerk und zwei Dampfspeichermaschinen zur Ver-

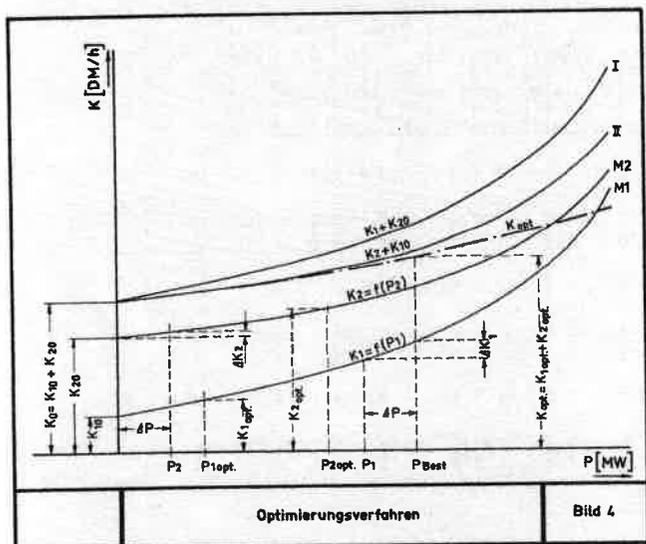


Abbildung 4: Einsatz zweier Maschinen mit gleicher Leistung, aber unterschiedlichen Kosten

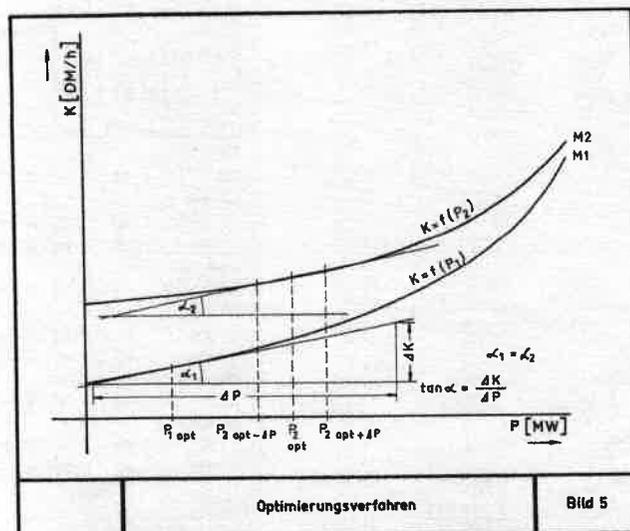


Abbildung 5: Graphische Optimierung

fügung. Für die Auswahl dieser Einheiten sind die Verbrauchslinien, die An- und Abfahrkosten, die Netzsicherheit und die von den vorhandenen Entnahmekondensationsmaschinen abgegebenen Dampfmen gen an den Heizkondensator entscheidend.

Die zweite Maßnahme, die in den folgenden Ausführungen näher untersucht werden soll, bezieht sich auf die Frage: Nach welchen Gesetzen sind diese in Betrieb befindlichen Erzeugungseinheiten bei schwankender Netzlast zu belasten?

3. Das Kostenzuwachsverfahren

Angenommen, es müssen, um eine bestimmte Last einschließlich Reserve zu decken, zwei Maschinen in Betrieb sein. Die stündlichen Kosten der Maschinen stellen die Kurven M 1 und M 2 dar (Abbildung 4).

Die Kosten setzen sich zusammen aus dem Wärmeverbrauch der Anlagen (ermittelt durch Versuche und Wärmekreislaufrechnung³) und dem Wiederbeschaffungspreis des verfeuerten Brennstoffes.

Befinden sich beide Maschinen im Leerlauf, so ergeben sich die Leerlaufkosten:

$$K_0 = K_{10} + K_{20}$$

Belastet man zuerst die billigere

Maschine M 1 bis zu ihrer Nennlast und läßt die Maschine M 2 im Leerlauf, so verläuft der Gesamtkostenaufwand nach Kurve I. Belastet man dagegen die Maschine M 2 bis zu ihrer Nennlast und läßt die Maschine M 1 im Leerlauf, so ergibt Kurve II den Gesamtkostenaufwand. Obwohl in diesem Fall die teurere Maschine zuerst belastet wurde, liegen die Kosten niedriger. Angenommen, die erforderliche Last habe die Größe P_{Best} und wird, da sie dem Bestpunkt der Maschine M 1 entspricht, von dieser gedeckt, so ergibt eine Verringerung der Last von Maschine M 1 um ΔP und Erhöhung der Last von Maschine M 2 um ΔP eine Kostenersparnis, da

$$\Delta K_1 > \Delta K_2.$$

Wo liegt nun das eindeutige Kostenminimum? Man erhält es für die Last P_{Best} , wenn beide Maschinen auf gleichen Kostenanstieg belastet werden:

$$P_{1\ opt} + P_{2\ opt} = P_{Best}.$$

Die Kosten betragen in diesem Fall

$$K_{1\ opt} + K_{2\ opt} = K_{opt}.$$

Nach dieser Methode des Kostenzuwachsverfahrens⁴ ergibt sich der Kostenverlauf gemäß Kurve K_{opt} . Gleicher Kostenanstieg bedeutet, daß der Winkel, unter dem die Tangente an die Kurve M 1 im Punkt $P_{1\ opt}$ die Abszisse schneidet, gleich

dem Schnittwinkel der Tangente im Punkt $P_{2\ opt}$ mit der Abszisse ist, d. h. die Tangenten verlaufen parallel (Abbildung 5). Der Kostenanstieg ist dann gleich dem Tangens des Schnittwinkels, d. h. der Differentialquotient der Kostenfunktion der Maschine 1 ist gleich dem Differentialquotienten der Kostenfunktion der Maschine 2.

Für eine mathematische Lösung stehen folgende Aussagen zur Verfügung:

1. Die Summe aller Einzelerzeugungen ergibt die Gesamterzeugung.

$$P_G = \sum_{i=1}^n P_i$$

2. Die Differentialquotienten aller Kostenfunktionen sind gleich.

$$\frac{dK_1}{dP_1} = \frac{dK_2}{dP_2} = \dots = \frac{dK_n}{dP_n}$$

Zur Vereinfachung wird die Kostenfunktion durch eine Parabel durch drei beieinander liegende Punkte ersetzt, z. B.

$$P_{2\ opt} - \Delta P, P_{2\ opt}, P_{2\ opt} + \Delta P.$$

Die mathematische Lösung muß, damit nicht nur ein optimales, sondern auch sinnvolles Ergebnis erzielt wird, die Leistungsgrenzen der Maschinen und den Ersatz der Kostenkurven durch die Parabeln mit ihrem jeweiligen Gültigkeitsbereich berücksichtigen.

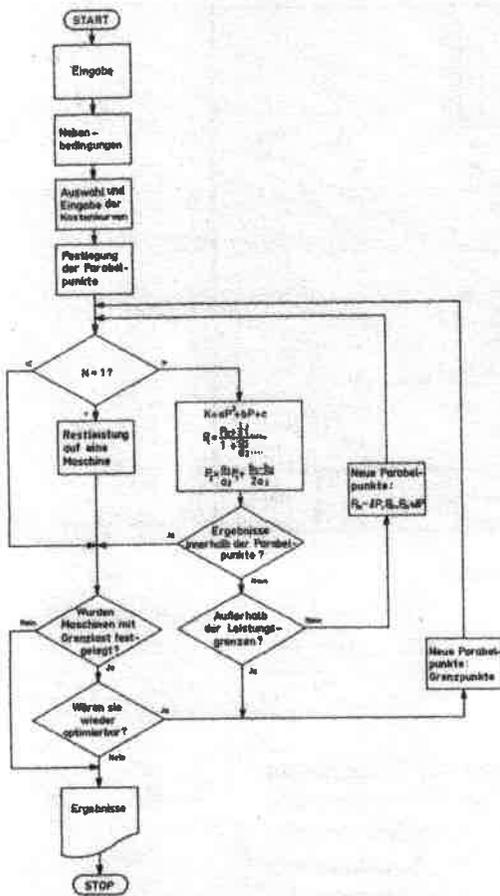


Abbildung 6: Schema des Rechenganges für das Programm »Optimierung«

4. Das Programm

Optimierung des Maschineneinsatzes

4.1. Programmablauf

Nach Empfang der Eingabedaten und deren Kontrolle legt das Programm die Nebenbedingungen fest (Regel- bzw. Heizmaschinen) und ermittelt aus einer Anzahl gegebener Kostenkurven die für die Berechnung benötigten Kurven (Abbildung 6). Nach dem Einlesen der Werte zu diesen Kurven von der Magnettrommel werden für jede Kostenfunktion die drei Parabelpunkte für den ersten Rechengang festgelegt. Der Rechengang, auf dessen Einzelheiten hier nicht näher eingegangen werden soll, ergibt sich aus den im vorigen Abschnitt genannten mathematischen Aussagen. Die Gültigkeit der ermittelten Leistungen wird mittels einer Reihe von Abfragen geprüft und gegebenenfalls der Kostenparabelbereich verändert. Dazu stellt das Pro-

	Reuter				O'havel				Charlottenburg				Modbit				Rudow				Steglitz				Kf		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	
TZ1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	
TZ2/																											a)
TZ1 025/																											b)
025																											c)
195																											d)
TZ2 0/																											e)
TZ2																											f)
TZ1 025/																											g)
025																											h)
195																											i)
TZ2 5100r																											j)
TZ2																											k)
TZ1 025/																											l)
025																											m)
195																											n)
TZ2 5100r																											o)
TZ2																											p)

Abbildung 7: Beispiel einer Optimierungsrechnung

gramm fest, ob die Ergebnisse jeweils innerhalb der angenommenen drei Punkte liegen. Ist das bei einer oder mehreren Maschinen nicht der Fall, so werden drei neue Punkte ermittelt.

Liegen die Ergebnisse innerhalb der Leistungsgrenzen der Maschinen, so wird zum Ergebnis ΔP addiert und subtrahiert. Liegen sie außerhalb der Leistungsgrenzen, so werden die drei grenznächsten Punkte

$$P_{Gr}, P_{Gr} \pm \Delta P, P_{Gr} \pm 2 \Delta P$$

gewählt, und die Berechnung beginnt von vorn. Ergibt die nächste Berechnung wieder ein Ergebnis außerhalb der Leistungsgrenzen, so werden diese Maschinen mit ihrer Grenzlast festgelegt und aus der weiteren Berechnung genommen. Deshalb wird vor jeder neuen Berechnung festgestellt, ob noch optimierbare Maschinen vorhanden sind. Sind keine optimierbaren Maschinen mehr vorhanden ($N=1$), wird die übriggebliebene Leistung auf die letzte Maschine verteilt. Im Falle $N < 1$ wird die Rechnung abgebrochen. Diese beiden Programmzweige werden nur durchlaufen, wenn die Kostenfunktionen der zu optimierenden Maschinen sehr unterschiedlich sind, was in der Praxis selten vorkommt.

Der n-te Durchlauf ergibt dann ein sinnvolles Ergebnis, jedoch wird vor dem Ausdrucken der Ergebnisse festgestellt, ob die festgelegten Maschinen durch Veränderung des Ge-

samtdifferentialquotienten aus ihrer Grenzlast freikommen würden. Ist das der Fall, so beginnt die Rechnung wieder von vorn.

Obwohl es scheint, als ob die Anzahl der Durchläufe ins Unermessliche steigen würde, liegt sie für die Berechnung von 21 Maschinen nur bei durchschnittlich sechs Durchläufen.

Diese Betrachtungen haben nur Gültigkeit, wenn die Kostenkurven stetig verlaufen. Zeigen die Zuwachskosten jedoch Sprünge, so werden weitere Programmzweige aufgerufen, die aus Gründen der Übersichtlichkeit weggelassen wurden. Die Ergebnisse werden auf 5 MW gerundet ausgegeben.

4.2. Berechnungsbeispiel

Der Benutzer des Programms gibt einmalig über einen Fernschreiber die in Betrieb befindlichen Maschinen sowie eventuelle Nebenbedingungen (z.B. Heiztonnen der Entnahmekondensationsmaschinen) ein (Abbildung 7). Maschinen, die aus betrieblichen Gründen eine bestimmte Leistung fahren müssen, werden mit dieser festgelegt. Bei Anlagen mit mehreren Kesseln wird die Anzahl der in Betrieb befindlichen angegeben.

Der jeweils letzte Einsatzplan ist auf der Magnettrommel gespeichert. Der Benutzer hat damit jederzeit die Möglichkeit, mit dem Aufruf a den letzten Einsatzplan abzufragen (b). Hat sich nichts geändert, erfolgt mit

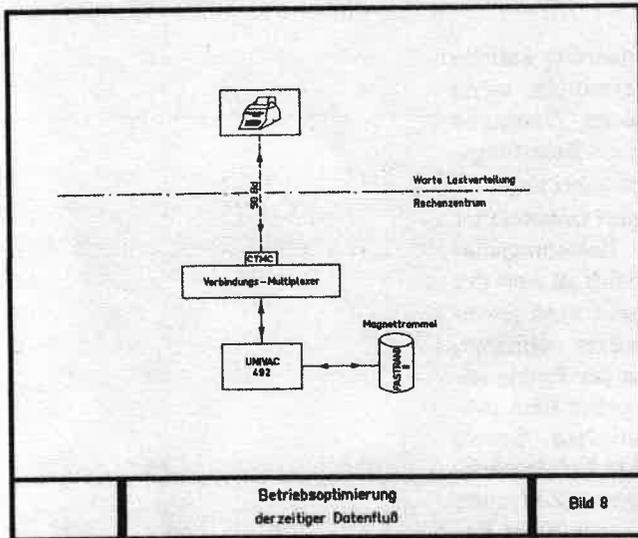


Abbildung 8: Derzeitiger Datenfluß

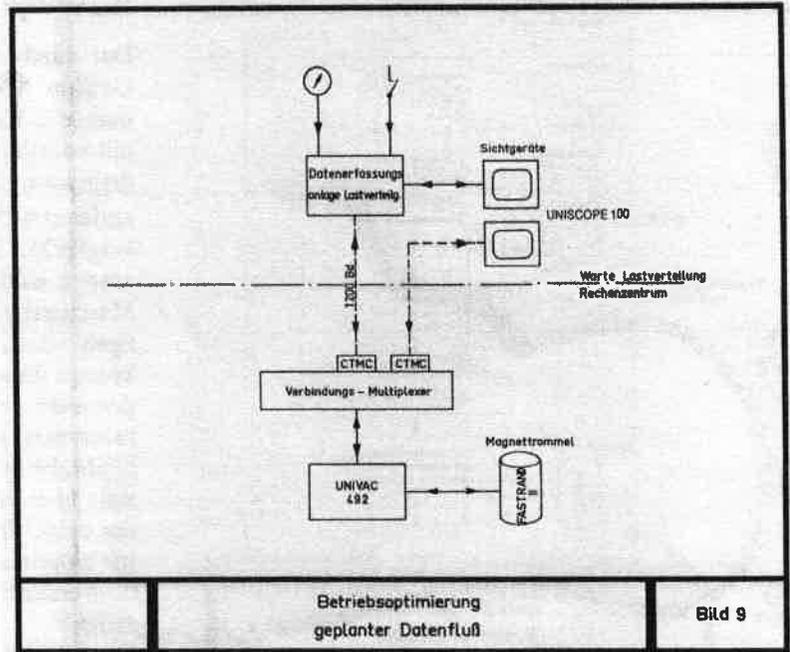


Abbildung 9: Künftiger Datenfluß

dem Aufruf c die Vorgabe der zu verteilenden Gesamtleistung. Das Programm verteilt diese Gesamtleistung optimal auf die einzelnen Maschinen, ermittelt den Kostenfaktor (d) und die Reserven (e). Die Gesamtreserve von 195 MW erlaubt es, die Gasturbine im Kraftwerk Steglitz abzufahren. Mittels Aufruf f wird diese Maschine aus der weiteren Berechnung entfernt. Als Antwort erscheint der neue Einsatzplan (g). Nach erneuter Vorgabe der Gesamtlast (h) wird die neue Fahrweise ermittelt (i, k), die eine Kostenverringerung, bedingt durch das Abfahren einer Einheit, aufweist.

Ist es aus betrieblichen Gründen notwendig, eine Maschine in ihrer Leistung zu begrenzen (z. B. Maschine C im Kraftwerk Reuter, Aufruf l, Antwort m), so zeigt das Ergebnis (o und p) nicht nur die neue Fahrweise, sondern auch die Verteuerung gegenüber Fahrweise i durch die Differenz der beiden Kostenfaktoren.

Die Genauigkeit der Optimierung hängt weitgehend von der Güte der Kostenkurven ab. Zu ihrer laufenden Überwachung und Korrektur sind mehrere Hilfsprogramme im Einsatz.

4.3. Datenfluß

Die Daten gelangen über die Fernschreibleitung mit einer Geschwindigkeit

von 50 Zeichen/s in das Datenübertragungssystem der UNIVAC 492 und von dort in den Rechner (Abbildung 8). Die Real-Time-Konzeption bewirkt die Unterbrechung aller laufenden Programme, um das Programm *Optimierung* zu bearbeiten.

Die Zeit vom letzten Eingabezeichen des Bedieners bis zum ersten Ausgabezeichen beträgt im Mittel 15 Sekunden. Da die Ausgabe mittels Fernschreiber jedoch ca. eine Minute in Anspruch nimmt, ist daran gedacht, ab 1971 ein Bildschirmgerät UNISCOPE 100 anzuschließen.

5. Künftige Weiterentwicklung

5.1. Anforderungen an das Programm

Es ist bekannt, daß das vorliegende Programm nur ein bescheidener Anfang auf dem Wege zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit bei der Lastdeckung ist. Deshalb wird parallel an der Weiterentwicklung und Vervollkommnung des Verfahrens gearbeitet.

In Zukunft soll neben dieser Momentanoptimierung eine Langzeitoptimierung erstellt werden. Unter Langzeitoptimierung soll hier der wirtschaftliche Maschineneinsatz über einen längeren Zeitraum einschließlich An- und Abfahren der Maschinen verstanden werden.

Mit dem Aufbau des Verbundes des BEWAG-Heiznetzes wird es erforderlich, neben der elektrischen Erzeugung auch die Heizung in die Optimierung mit einzubeziehen.^{5,6} Der weitere Ausbau des Verbundnetzes erfordert auch eine stärkere Berücksichtigung der Netzsicherheit im Programm.

Aus diesen Forderungen heraus ergibt sich für die Zukunft ein Mehraufwand an Geräten, die es ermöglichen, die Ein-/Ausgabe der benötigten Daten so schnell wie möglich zu vollziehen.

Eine künftige Lösung könnte folgendes Aussehen haben:

5.2. Datenfluß

Alle in der Lastverteilung anfallenden interessanten Daten werden mittels einer Datenerfassungsanlage (Prozeßrechner) gesammelt, kontrolliert und ausgewertet (Abbildung 9). Dieser Prozeßrechner wird mit der Großrechenanlage verbunden, wo dann die größeren Berechnungen ausgeführt werden. Die Korrespondenz zwischen Lastverteilung und Großrechenzentrum erfolgt über Sichtgeräte.

Diese künftige Konzeption bietet die Möglichkeit der Dokumentation auf kompakten Datenträgern (z. B. Magnettrommeln bzw. -bändern) und schafft die Voraussetzung für eine aktuelle Information der einzelnen Sachbearbeiter und eine wertvolle

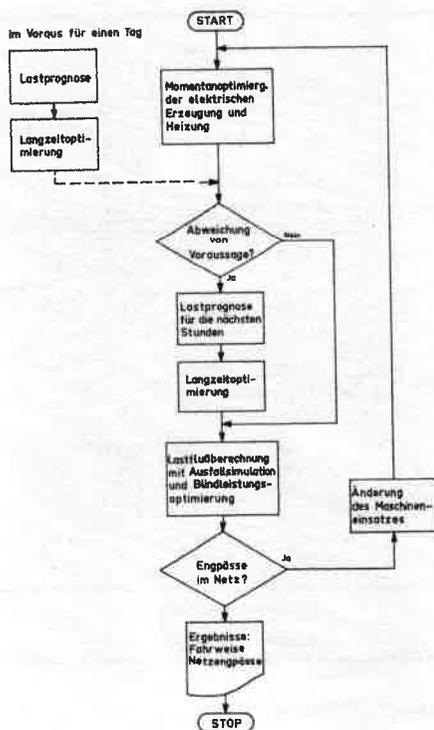


Abbildung 10: Schema des Rechenganges für das künftige Programm »Betriebsoptimierung«

Entscheidungshilfe für die Unternehmensführung.

5.3. Programmablauf

Datenerfassung und Dokumentation bilden auch die Grundlage für eine Lastprognose und Langzeitoptimierung als Vorprogramme für eine umfassendere Optimierung (Abbildung 10). Ein Lastzuwachs startet dann die Betriebsoptimierung, die nicht nur die elektrische Erzeugung einschließlich der Heizung optimiert. Die Ergebnisse werden mit denen der Langzeitoptimierung verglichen. Treten Abweichungen auf, so wird für den nächsten Zeitraum eine neue Lastprognose und Langzeitoptimierung mit Simulation verschiedener Netz- bzw. Maschinenausfälle und eine Optimierung der Blindleistung zur Minimalisierung der Netzverluste durchgeführt. Zeigen sich bei diesen Berechnungen Engpässe im Netz, so wird versucht, diese durch Veränderung des Maschineneinsatzes zu beheben. Der Lastführer bekommt als Ergebnis dann ständig, ohne selbst eingreifen zu müssen, die Fahrweise und die eventuellen Engpässe im Netz am Sichtgerät angezeigt. Er hat natürlich außerdem die Möglichkeit, direkt mit der Datenverarbeitungsanlage zu verkehren.

6. Nutzen

Der durch die Optimierung erzielte Gewinn ließe sich ermitteln, wenn man die Kosten zweier Zeiträume mit vollständig gleichem Belastungsdiagramm einmal optimiert und zum anderen nicht optimiert miteinander vergleicht. Da das Belastungsdiagramm jedoch nie gleich ist und der Maschineneinsatz meist vom jeweiligen Betriebsgeschehen abhängt, kommt dieser Fall in der Praxis leider nicht vor. Was außer dem momentanen mathematischen Beweis bleibt, ist der indirekte Erfolgswachweis über einen längeren Zeitraum, der zeigt, daß der Nutzen einer Betriebsoptimierung die Kosten der notwendigen Rechanlagen übersteigt.⁷

Die bisher erzielten Erfolge mit diesem Verfahren verlangen zwangsläufig den weiteren Ausbau und die Verfeinerung.

7. Zusammenfassung

Der Real-Time-Betrieb mit der UNIVAC 492 hat in den drei Jahren seiner Benutzung durch das vorhandene Programm zur vollsten Zufriedenheit gearbeitet. Die Momentanoptimierung des Maschineneinsatzes nach dem Kostenzuwachsverfahren ist durchaus nicht neu. Man verwendete früher graphische Verfahren. Die Darstellung der Kostenfunktionen als Parabel durch drei Punkte und die schnelle Datenverarbeitungsanlage sowie die Real-Time-Verarbeitung machten die Erstellung eines Rechenprogramms möglich.

8. Literaturhinweise

- 1 Brack, Dr. Werner: Stromabrechnung der Berliner Kraft- und Licht-(BEWAG-)Aktiengesellschaft mit einer UNIVAC 492. Datascope Heft 1/1970, S. 44 ff.
- 2 Schmidt, Dipl.-Ing. Rüdiger: Optimierung und Verbrauchsabrechnung. Energiewirtschaftliche Tagesfragen, Heft 3/1968.
- 3 Dorn, Dr. Erwin: Kennzahlen des Kraftwerkbetriebes bei Kraft-Wärme-Kupplung. Elektrizitätswirtschaft, Heft 23/1960, S. 825 ff.
- 4 Heueck, Dipl.-Ing. Rudolf: Steuerung des Kraftwerkeinsatzes. Energie und Technik, Heft 9/1964, S. 283 ff.
- 5 Dorn, Dr. Erwin: Der optimale Einsatz von Heizkraftwerken. Elektrizitätswirtschaft, Heft 2/1967, S. 21 ff.
- 6 Dorn, Dr. Erwin: Grundlagen für den Einsatz von Heizkraftwerken. Elektrizitätswirtschaft, Heft 4/1970, S. 100 ff.
- 7 Vorbach, Dipl.-Ing. Alfred: Technische Datenverarbeitung aus der Sicht Deutscher Elektrizitätsversorgungsunternehmen. Elektrizitätswirtschaft, Heft 20/1968, S. 598 ff.