

UNTERSUCHUNG VON DAMPFKESSELN UND DAMPF- TURBINEN ALS MEHRFACHGEREGELTE SYSTEME

Von

E. PETZ

Lehrstuhl für Wärmekraftwerke, Technische Universität, Budapest

Eingegangen am 26. Juni, 1975

Vorgelegt von Prof. Dr. A. LÉVAI

1. Einleitung

Der Anspruch auf eine wirtschaftliche Energieerzeugung zieht eine rasche Erhöhung der Leistungsfähigkeit der Kraftwerke und der Blockleistung nach sich. Gleichzeitig wird der technologische Aufbau der Kraftwerkskreisläufe und der anschließenden Einrichtungen immer komplizierter. Demzufolge steigen notwendigerweise die technischen und wirtschaftlichen Anforderungen sowie die Anforderungen auf Betriebssicherheit. Da ein bedeutender Teil dieser Forderungen gerade von dem Regelungssystem des Kraftwerkes erfüllt werden soll, ist es klar, daß die Regelungstechnik oder allgemeiner die Automatisierung der Kraftwerke ein vorrangiges Problem der Projektierung, Investition und Inbetriebhaltung der Kraftwerke darstellt.

Es soll nur auf die wichtigsten und die Entwicklungstendenzen am besten widerspiegelnden Eigenschaften hingewiesen werden:

— mit der Erhöhung der technischen, wirtschaftlichen und Betriebssicherheitsanforderungen vermehrt sich die Zahl der zu je einem Block gehörenden Regelkreise. Bei den modernsten Kraftwerken können die Analogregelsysteme als beinahe komplett ausgebaut betrachtet werden. Dies bedeutet, daß zu je einem Block etwa 50 bis 70 Regelkreise gehören.

— die Erhöhung der Einheitsleistung erfordert die Vergrößerung der Dimensionen der Einrichtungen. Dadurch nimmt die Verzögerungszeit der geregelten Strecken notwendigerweise zu und zwar am ausgeprägtesten bei der Regelung des Kessels; besonders bei Druck- und Temperaturregelung eines kohlenstaubgefeuerten Kessels. Mit der Erhöhung der Zeitkonstanten verschlechtert sich die Regelbarkeit der geregelten Strecken, wobei die Anwendung komplizierterer Regelkreise bzw. Regelungssysteme erforderlich wird.

Um dies zu veranschaulichen, sind die in den Tabellen 1 und 2 zusammengefaßten Daten angeführt. Diese Daten wurden bei Messungen in verschiedenen Kraftwerken erhalten [1, 2, 3, 4]. *Tabelle 1* enthält die charakteristischen Zeitkonstanten der zu den Druck-Leistungsregelkreisen der untersuchten Kessel gehörenden Strecken bzw. die Quotienten der Zeitwerte. Bekanntlich

Tabelle 1

Kennwerte von Druck-Leistungsregelstrecken
(Turbinenregelventilhub: $h_{TU} = \text{const}$)

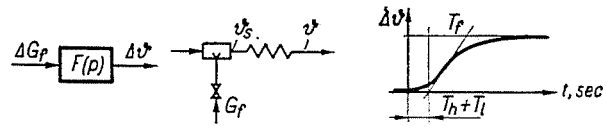


Kraftwerk	Dampfleist. t/h	Brennstoff	$T_h + T_l$ sec.	T_f sec.	$\frac{T_f}{T_h + T_l}$
Borsod	100	Braunkohle	30—40	350—400	10—11
Oroszlány	210	Braunkohle	40—50	420—450	9—10
Bánhida	320	Braunkohle	80	400	5—5,5
			110*	600	
Gyöngyös	320	Lignit	100—110	350—400	3—4
Dunamenti	500	Gudron	10	200	20

* sehr verschmutzt

Tabelle 2

Kennwerte von Temperaturregelstrecken



Kraftwerk	Zeich.	Hilfsregelgröße (θ_s)			Regelgröße (θ)			
		T_l sec	T_f sec	A_s C°/t/h	$T_h + T_l$ sec	T_f sec	A C°/t/h	$\frac{T_f}{T_h + T_l}$
Bánhida, 100 MW 320 t/h	1.	11	50	3,70	37	126	3,70	3,4
	2.	—	56	4,70	39	166	4,70	4,25
	3.	11	35	5,20	40	107	5,20	2,7
Gyöngyös, 100 MW 320 t/h	1.	4	32	3,70	35	87	5,65	2,5
	2.	5	50	4,98	63	144	7,20	2,3
	3.	9	37	7,65	48	135	8,80	2,8
	Zwisch. Überh.	11	58	10,8	45	178	6,60	3,95
Borsod, 100 t/h	(80% Leist.)	—	100	17	98	285	16	2,9
Dunamenti, 150 MW 500 t/h	1.	15	35	2,2	60	175	3,2	2,9
	2.	—	25	4,6	20	66	4,4	3,3
	Zwisch. Überh.	—	—	—	66	400	0,4C°/%	6,0

ist dieser Quotient gerade für die Beurteilung der Regelbarkeit geeignet und falls sein Wert unter 2,5 bis 3 sinkt, kann die Strecke als schwer regelbar betrachtet werden. In dieser Hinsicht sind die Bedingungen in dem ölgefeuerten Kraftwerk an der Donau (DUNAMENTI HÖERÖMŰ) weitaus am günstigsten.

In *Tabelle 2* sind ähnliche Daten für die Regelstrecken der Temperaturregelkreise angegeben. In Zusammenhang mit den Daten ist unbedingt zu bemerken, daß während im Wärmekraftwerk BORSOD die Regelung der Frischdampf­temperatur durch einen einzigen Regelkreis in Kaskadenschaltung erfolgt, in den Wärmekraftwerken GYÖNGYÖS und BÁNHIDA dieselbe Aufgabe durch drei seriengeschaltete Regelkreise je Überhitzerzweig mit Hilfsregelgröße und Störgrößenaufschaltung, also insgesamt durch sechs komplizierter aufgebaute Kreise erfüllt wird, wie aus *Abb. 1* ersichtlich ist. Der Grund hierfür ist klar, wenn man die Quotienten der Zeitkonstanten betrachtet; die Strecken sind ja z. B. im Kraftwerk GYÖNGYÖS selbst in dem erwähnten Falle gerade noch an der Grenze der Regelbarkeit.

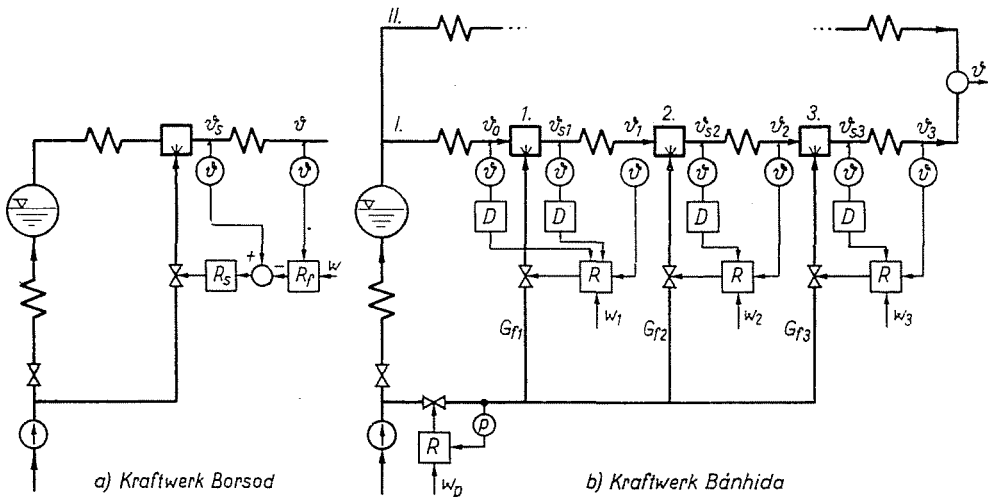


Abb. 1

Das vorgeführte Beispiel zeigt, wie die Verschlechterung der Regelbarkeit die Anwendung immer komplizierterer Regelkreise bzw. Regelungssysteme erfordert.

— Als eine weitere Eigenschaft soll die große Zahl der äußeren Störgrößen und deren ungemein breiter Variabilitätsbereich erwähnt werden. Besonders soll die Belastung des Blocks bzw. des Kessels, d. h. die Änderung des Dampfbedarfs hervorgehoben werden. Die Last ist nämlich die Hauptstörgröße beinahe aller Regelkreise und die dynamischen Eigenschaften der

Strecke ändern sich in Abhängigkeit von der Last, was wiederum ein regelungstechnisches Problem bedeutet, in erster Linie bei der richtigen Auswahl und Einstellung des Reglers. Das deutet sogar auf die zukünftige Anwendung der adaptiven Regelungen hin. Einige Beispiele findet man schon bei dem Hartmann-Braun'schen Regelungssystem der 200-MW-Blöcke, die in dem Erweiterungsprogramm des Kraftwerks an der Donau (DUNAMENTI HÖERÖMŰ) vorgesehen sind. Bei der Feuerungsregelung kann mit der Anwendung von Optimumregelungen gerechnet werden.

— Als ein grundlegendes und mit dem Problem eng verbundenes Merkmal sollen schließlich die zwischen den verschiedenen Regelkreisen vorhandenen, starken und vielseitigen, streckenseitigen Kopplungen hervorgehoben werden. Dies bedeutet aus der Sicht der regelungstechnischen Untersuchungen, daß es sich nicht um unabhängige Regelkreise, sondern um ein verwickelt geschleiftes Regelungssystem handelt, wo die komplexen und umfassenden Untersuchungsmethoden der Mehrfachsysteme anzuwenden sind.

Obwohl auf dem Gebiet der im Kraftwerk angewandten Analogregelungstechnik noch eine bedeutende Entwicklung zu erwarten ist, kann eine revolutionäre Umwandlung in der Automatisierung der Kraftwerke erst von der Anwendung von Digitaleinzeleinrichtungen und Prozeßrechnern erwartet werden.

2. Untersuchung mehrfach geregelter Systeme

Bekanntlich bilden die dynamischen Untersuchungen (Analyse der Dynamik) die Grundlage der zu verschiedenen Zwecken durchgeführten regelungstechnischen Untersuchungen. Die Stabilitätsuntersuchung, Optimierung usw. (Analyse oder Synthese) eines Regelkreises oder eines komplizierteren Systems können nur dann durchgeführt werden, wenn das Übertragungsverhalten der Übertragungsglieder oder Gliedergruppen des Kreises bzw. des Systems bekannt ist. Zweck der dynamischen Untersuchung ist gerade die Bestimmung der Übertragungseigenschaften. Die erwünschten Ergebnisse können — selbstverständlich immer auf dem jeweils günstigsten Weg — entweder durch theoretische oder durch experimentelle Analyse erhalten werden.

Aufgrund der Erkenntnis, daß dynamische Untersuchungen eine entscheidende Rolle in den regelungstechnischen Aufgaben spielen, wurden in der ersten Phase dynamische Untersuchungen von Kraftwerkshaupteinrichtungen durchgeführt, wobei sowohl theoretische wie auch experimentelle Methoden angewandt wurden.

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen wurde unter anderem durch die Ermittlung der Übergangsfunktionenfolgen die komplexe dynamische Untersuchung des 100-t/h-Kessels im Kraftwerk BORSOD und des 500-t/h-Kessels im »Kraftwerk an der Donau« vorgenommen [1, 4]. Es soll

bemerkt werden, daß im letzteren Fall die Ermittlung der Daten mit einem Digitaldatensammler in einer für weitere Systemidentifikation geeigneten Form erfolgte, da das Endziel der Arbeit — ausgehend von dem Klemmenverhalten — die digitale Simulation des Kessels war.

Da die Methoden und Möglichkeiten der experimentellen und der theoretischen dynamischen Untersuchungen sehr verschieden sind, scheint es zweckmäßig, einige Bemerkungen vorzuschicken.

Auf Grund der Ergebnisse der sich auf die Aufnahme der Übertragungsfunktionen stützenden Untersuchungen (ohne auf andere Meßverfahren bzw. deren Bewertung einzugehen), läßt sich nur das Klemmenverhalten des Mehrfachsystems bestimmen, da nur sehr wenige kennzeichnende Zwischengrößen bemessen und dadurch nur die resultierenden (d. h. die zwischen Ein- und Ausgangssignal vorhandenen) Übergangsverhalten bestimmt werden können, was nur eine *globale* Erfassung des dynamischen Verhaltens der untersuchten Einrichtung ermöglicht.

Auf diese Weise kann aufgrund der Ergebnisse die Übertragungsmatrix des vorliegenden Systems aufgebaut werden. Um dies zu zeigen, sollen die Schaltungen in *Abb. 2* kurz betrachtet werden.

Der Einfachheit halber sind hier die Regelungssysteme von technologischen Einrichtungen mit je zwei Regelgrößen ($x_1; x_2$) dargestellt. Die mit gestrichelten Linien begrenzten und mit *S* bezeichneten Blöcke enthalten die hinsichtlich des dynamischen Verhaltens wesentlichen Eigenschaften repräsentierenden, streckenseitigen Glieder. Bei Schaltung a) sind zwischen den Regelkreisen keine Wirkungsverbindungen vorhanden, so daß die Kreise hier unabhängig behandelt werden können (d. h., es können die für einfache Kreise gültigen Untersuchungsmethoden angewandt werden). Beim System b), wo in einer der Richtungen eine streckenseitige Kopplung vorhanden ist, können die Regelkreise dennoch als einfache Kreise behandelt werden, und zwar derart, daß die Kopplung vom Gesichtspunkt des II. Kreises aus als eine Innestörgröße aufgefaßt wird. Dagegen besitzt das System c) eine qualitativ neue Struktur mit doppeltgerichteten, d. h. gegenseitigen Wirkungsverbindungen.

In diesem Falle ist leicht einzusehen, daß z. B. an der Ausbildung des Führungsprozesses des I. Kreises nicht nur die eigenen Glieder des Kreises, sondern durch die Wirkungskette $S_3—R_2—S_4$ auch die dynamischen Eigenschaften der Glieder teilnehmen. In solchen und ähnlichen Fällen kann vom Gesichtspunkt der Untersuchungsmethoden aus nur von zweifach- oder analog mehrfachgeregelten Systemen bzw. Mehrfachsystemen gesprochen werden. Schließen sich die streckenseitigen Koppelglieder (Kopplungen) an die Wirkungsketten der Regelkreise der Abbildung gemäß an, können die Übertragungsfunktionen der die Hauptwirkung ausübenden Glieder (S_1 und S_2) und der Koppelglieder (S_3 und S_4) unmittelbar durch die Identifizierung der während der streckendynamischen Untersuchungen ermittelten Übergangsfunk-

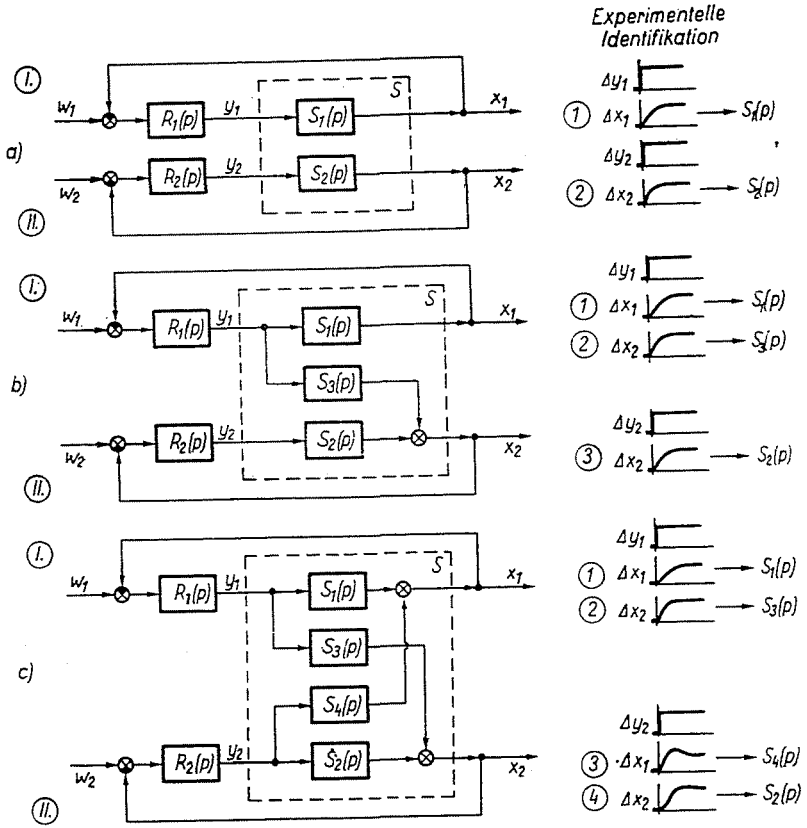


Abb. 2

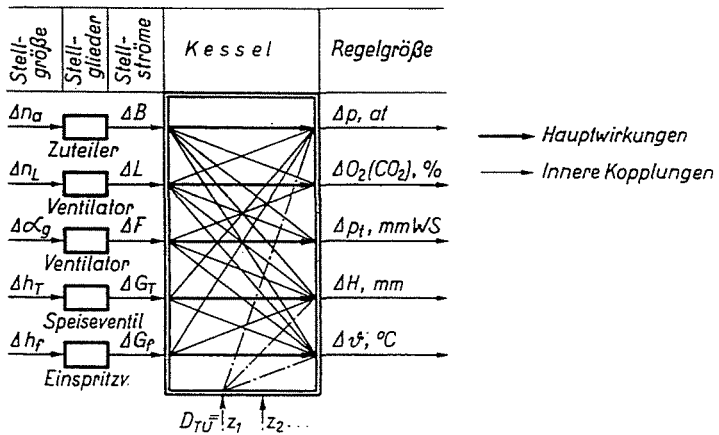


Abb. 3

tionen bestimmt werden, wie es auf der rechten Seite der Abbildung symbolisch dargestellt ist. In Wirklichkeit sind aber die Wirkungsverbindungen nicht so einfach, was auch anhand des vereinfachten Beispiels des Dampfkessels auf Grund unserer Untersuchungen gezeigt werden kann

Die aus der Sicht der Regelungstechnik wichtigen Ein- und Ausgangsgrößen (d. h., die Regelgrößen bzw. die Stellströme und die äußeren Störgrößen) eines Trommelkessels und die zwischen ihnen vorhandenen Wirkungsbedingungen sind in *Abb. 3* veranschaulicht, wobei die Wirkungslinien innerhalb des Blocks nur das Vorhandensein und die Richtungen der Wirkungsverbindungen darstellen, ohne Informationen über die Signalübertragungseigenschaften der Wirkungen oder über die innere Ausbildung bzw. den Mechanismus der resultierenden Übertragungsverhalten zu geben.

Wie bereits erwähnt, können die resultierenden Übertragungsverhalten der einzelnen Wirkungsverbindungen zweckmäßig durch experimentelle dynamische Messungen bestimmt werden. Dazu wird der Kessel bei Handbedienung (d. h. bei Ausschaltung aller Regler) in stationärem Betriebszustand bei dem Arbeitspunkt gehalten, wobei die Stellgrößen bzw. die Stellströme nacheinander sprungfunktionsartig verändert und die Ausgangsgrößen gleichzeitig registriert werden. Somit wird als Ergebnis eine Übergangsfunktionsfolge je Eingriff erhalten, wie es anhand des Beispiels in *Abb. 4* gezeigt ist. Durch die Identifikation der so erhaltenen Übergangsfunktionen werden die das Übertragungsverhalten zwischen Ein- und Ausgangsklemmen beschreibenden Übertragungsfunktionen gemäß *Abb. 4* bestimmt. Die jeweils zweckmäßigste Methode soll unter sämtlichen Identifikationsstrukturen bzw. Identifikationsmethoden in Kenntnis der sich in der technologischen Einrichtung abspielenden physikalischen Prozesse ausgewählt werden. Auf diesem Gebiet haben wir neuerdings — teils mit den eigenen Forschungsergebnissen — ein Identifikationshandbuch zusammengestellt, in dem leicht anwendbare und in erster Linie für die Betriebsfachleute nützliche graphoanalytische Methoden beschrieben sind [5].

Nach unseren Erfahrungen sollen die streckendynamischen Messungen solange wiederholt werden, bis für jede einzelne Stellgröße wenigstens 5 bis 10 gut bewertbare Übergangsfunktionsfolgen erhalten werden. Danach werden die Durchschnittswerte der regelungstechnischen Kennwerte berechnet. Schon aus dem Gesagten kann beurteilt werden, daß die Durchführung einer vollständigen kesseldynamischen Untersuchung, wo die Zahl der Ein- und Ausgangsgrößen größer ist als in dem erwähnten vereinfachten Beispiel, eine Aufgabe darstellt, die viel Geduld und zahlreiche Meßreihen erfordert. Nach den Erfahrungen sind infolge der ungünstigen Betriebsbedingungen in einem Kraftwerk nur etwa 50% aller durchgeführten Messungen ergebnisreich.

Die schließlich als Ergebnis erhaltenen Übergangsfunktionen werden in geordneter Form gemäß *Abb. 5* zusammengefaßt. Besonders bedeutend sind

DINAMISCHE MESSUNGEN
Kraftwerk Borsod, Kessel 9

Leistung: 100 t/h
Erdgasm.: 800 m³/h
4 Mühlen in Betrieb

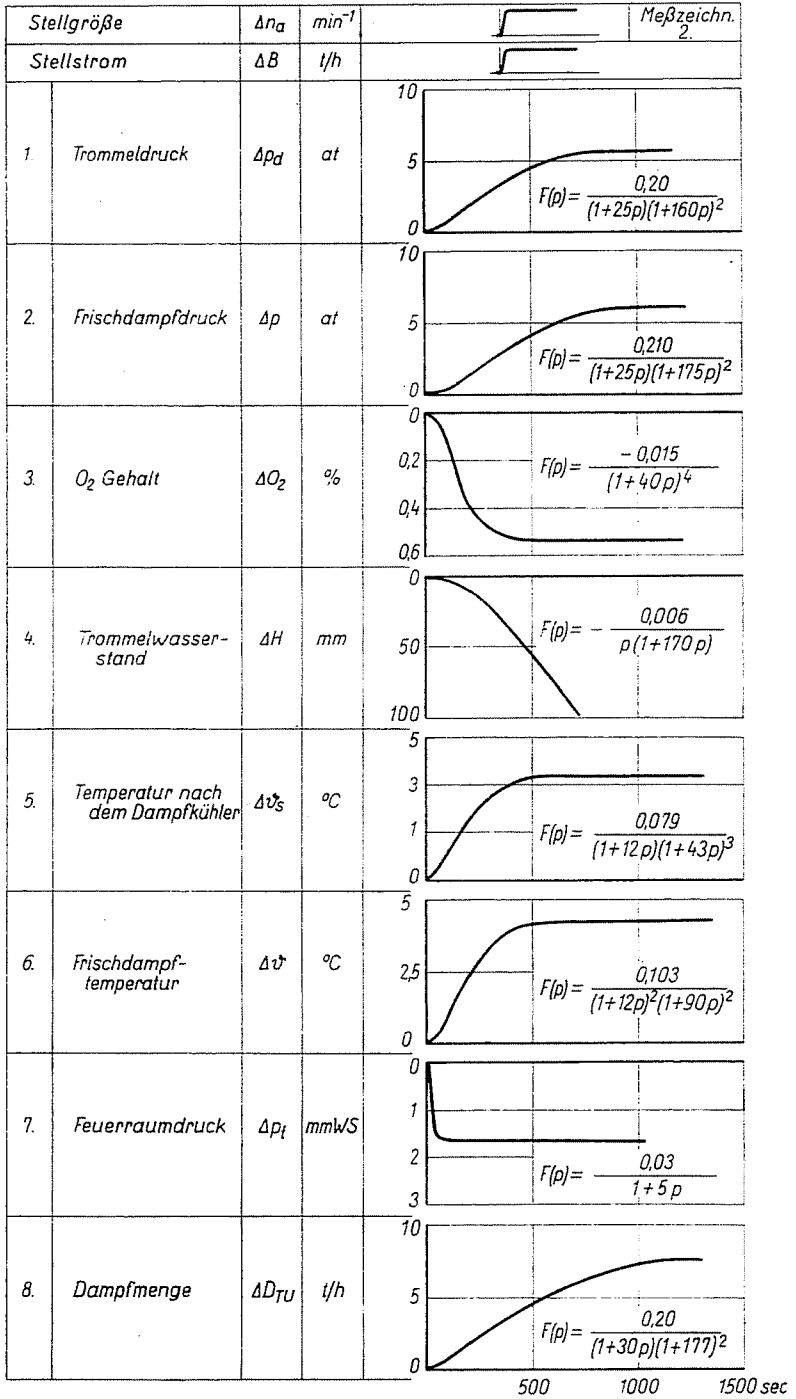


Abb. 4

Stellgr.	Δn_a	Δn_L	$\Delta \alpha_g$	Δh_T	Δh_f	Störgr.
Regelgr.	ΔB	ΔL	ΔF	ΔG_T	ΔG_R	ΔD_{TU}
Δp			—			
ΔO_2				—	—	—
Δp_t				—	—	—
ΔH						
Δv						
Δv_s						

Abb. 5

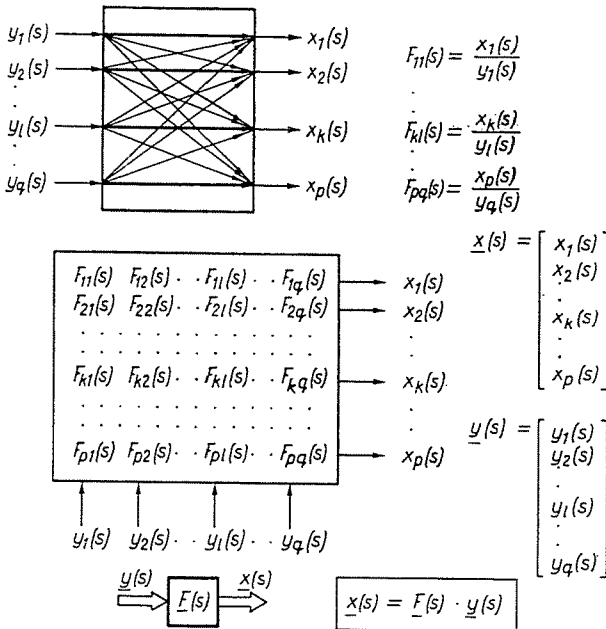


Abb. 6

die Hauptwirkungen die Diagonale entlang. Wie bereits erwähnt, kann jeder Übergangsfunktion eine Übertragungsfunktion zugeordnet werden, die die dynamischen Eigenschaften der in Abbildung 3 angeführten Wirkungsbedingungen mathematisch erfaßt. Sind diese bekannt, kann die Übertragungsmatrix des Kessels gemäß Abb. 6 formuliert werden. Somit kann der Kessel als Mehr-

fachsystem durch die Übertragungsmatrix, z. B. bei größeren Systemuntersuchungen sogar als ein einziges »Glied« mit mehreren Ein- und Ausgangsgrößen behandelt werden (Abbildung 6).

In den meisten Fällen genügt es aber nicht, nur die bisher behandelten resultierenden Übertragungseigenschaften zu kennen. Es sollen z. B. bei Untersuchungen, die zwecks Verbesserung der Streckeneigenschaften durchgeführt werden, oder bei Konstruktionsarbeiten, wo auch die regelungstechnischen Anforderungen berücksichtigt werden müssen, die physikalischen Vorgänge, die innerhalb der technologischen Einrichtung die resultierenden Übertragungseigenschaften zustande bringen, sowie ihr innerer Wirkungsmechanismus ebenfalls bekannt sein. Um diese zu erfassen, werden die *theoretischen dynamischen Untersuchungen* — deren notwendige Bedingung die eingehende Kenntnis der Einrichtung ist — herangezogen. Die bei den Untersuchungen angewandte Methode ist nämlich die Synthese: es werden die elementaren Prozesse erforscht und das Modell des Gesamtsystems wird aus ihren dynamischen Verhalten aufgebaut, was schließlich das Aufzeichnen des ausführlichen Blockschaltbildes ermöglicht [6]. *Abb. 7* zeigt ein Beispiel, und zwar das ausführliche Blockschaltbild des verhältnismäßig einfachen Regelungssystems des 100-t/h-Trommelkessels im Wärmekraftwerk BORSOD. Die dynamischen Eigenschaften des Systems können nur in dem Fall als bekannt betrachtet werden, wenn die Übertragungsfunktionen aller Glieder des Blockschaltbildes bereits bestimmt wurden. Es soll hier, ohne auf die Einzelheiten des Blockschaltbildes einzugehen, der Verwickeltheit des Systems besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden.

Bei der theoretischen Untersuchung eines solchen verwickelten Systems ist die Anwendung von Rechenanlagen unentbehrlich. In dieser Weise können sowohl Analogmodellierung wie auch Digitalsimulation erfolgreich angewandt werden.

3. Beispiele für die Untersuchung von Zweifachsystemen

Im weiteren sollen die Ergebnisse von zwei konkreten Untersuchungen angegeben werden, die gleichzeitig zur Erläuterung der vorigen Ausführungen geeignet sind.

3.1 Untersuchung der Druck-Temperaturregelkreise des Dampfkessels

Das erste Beispiel betrifft den Dampfkessel (320 t/h) des Kraftwerks BÁNHIDA, bei dem schon während des Probetriebs unzulässige Leistungs- und Druckschwankungen auftraten.

Die Zielsetzung der vielseitigen Untersuchungen war unter anderem die Ermittlung des Einflusses der streckenseitigen Kopplungen auf die Stabilität des Systems und die Qualität der Regelungen. Da sich die kräftigsten Kopplun-

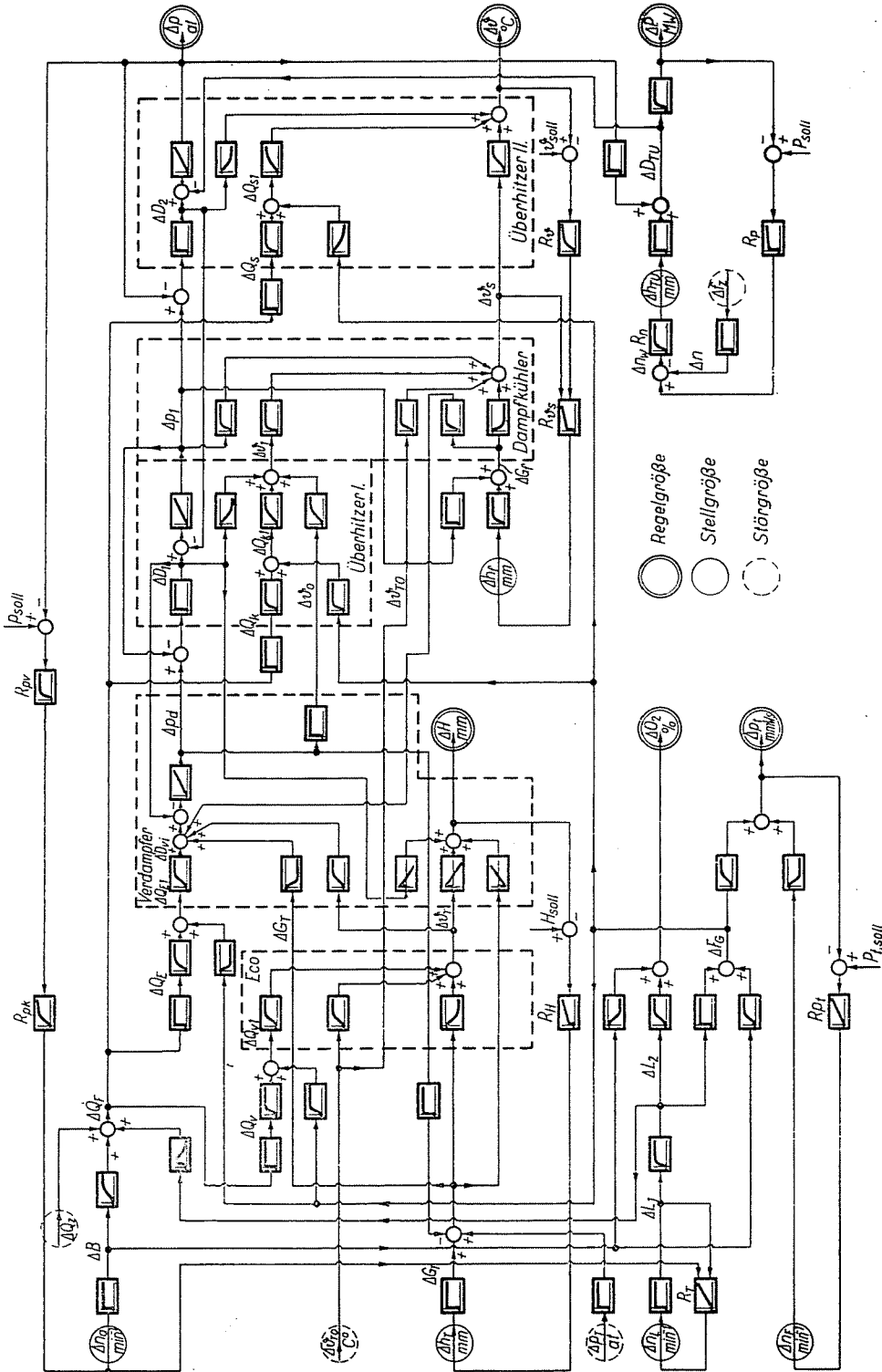


Abb. 7

gen zwischen den Druck- und Temperaturregelkreisen zeigten, wurde als Objekt der Untersuchungen das aus diesen hervorgehobenen Kreisen bestehende System gewählt. Das Blockschaltbild des Systems ist in *Abb. 8* dargestellt. Die Übertragungsverhalten der gegenseitigen Wirkungsverbindungen

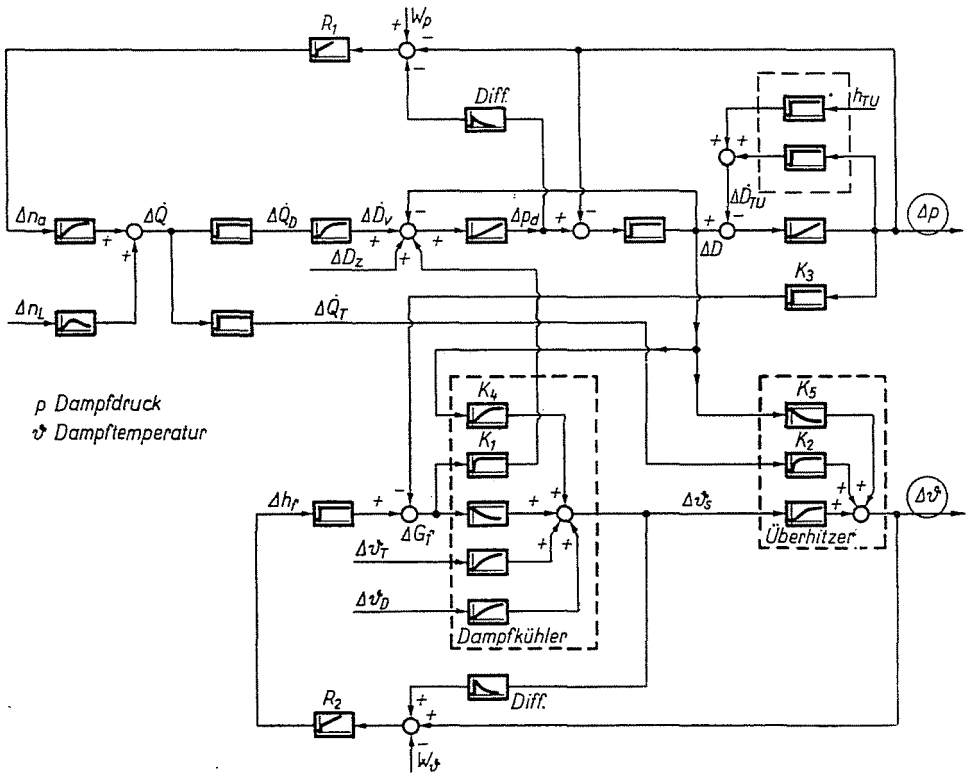


Abb. 8

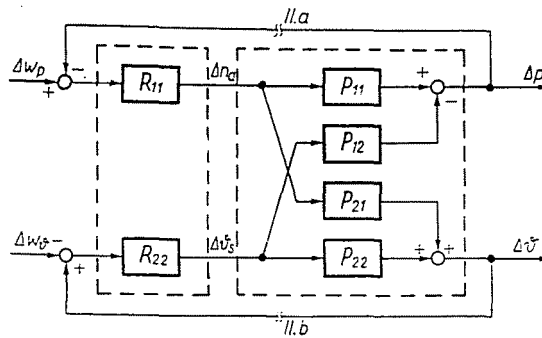


Abb. 9

sind durch die mit K_1 — K_5 bezeichneten Kopplungsglieder dargestellt. Um die Behandlung dieses Zweifachsystems zu erleichtern, wird das Blockschaltbild des Systems in die in *Abb. 9* angeführte sog. Normalschaltung umgewandelt [7]. Die Übertragungsfunktion dieser P -kanonischen Struktur kann durch eine schrittweise durchgeführte Umwandlung des Blockschaltbildes erreicht werden, vorausgesetzt, daß die Übertragungsfunktionen aller Glieder in dem ausführlichen Blockschaltbild bekannt sind. Diese Methode würde aber auch in diesem verhältnismäßig einfachen Fall zu komplizierten Funktionen führen, die schwer zu handhaben sind. Deshalb wurden die Übertragungsfunktionen der streckenseitigen Glieder durch die Identifizierung der während der dynamischen Messungen bestimmten Übergangsfunktionen aufgebaut. Demnach wurden bei den Reglern die während des Einstellversuchs erhaltenen optimalen Einstellwerte berücksichtigt.

Als Vergleichsbasis werden im weiteren die so erhaltenen unabhängigen Kreise betrachtet. Die Übertragungsfunktionen der Abbildung 9 lauten nacheinander wie folgt:

Übertragungsfunktionen der äquivalenten Regler:

$$R_{11} = \frac{\left(1 + \frac{1}{133p}\right)(1 + 57p)}{(1 + 10p)^2} \cdot 5,0 \quad (1)$$

$$R_{22} = \frac{1,32}{1 + 54p} \cdot \frac{1 + \frac{1}{16,3p}}{1 + 4,3 \frac{1 + 16,3p}{(1 + 54p)(1 + 62p)}} \quad (2)$$

Übertragungsfunktionen der streckenseitigen Glieder (auf Grund der Meßergebnisse):

$$P_{11} = \frac{0,185}{(1 + 23p)(1 + 120p)(1 + 192p)} \cdot e^{-6p} \quad (3)$$

$$P_{22} = \frac{1}{(1 + 40p)^2} e^{-2p} \quad (4)$$

$$P_{12} = 0,053 \frac{1 + 54p}{1 + 31p} \quad (5)$$

$$P_{21} = \frac{0,26}{(1 + 45p)^3} e^{-14p} \quad (6)$$

Zweckmäßig werden zur Beurteilung der Rolle der Kopplungen die Führungsverhalten der Untersysteme untersucht, wobei das geschlossene System in den Punkten II/A, II/b, (*Abb. 9*) geöffnet wird.

Wird zuerst das *Druckregelungs-Untersystem* (durch Aufschneiden in Punkt II/a) untersucht, dann können die charakteristische Gleichung des Systems und die Führungsübertragungsfunktion folgenderweise geschrieben werden:

$$Q_{11,a}(p) = 1 + R_{11} P_{11} \left(1 - \frac{R_{22} P_{12} P_{21}}{P_{11}(1 + R_{22} P_{22})} \right) = 0, \quad (7)$$

wobei $R_{11} P_{11} = F_{01}$ die Übertragungsfunktion des geöffneten unabhängigen Regelkreises,

$\frac{R_{22} P_{22}}{1 + R_{22} P_{22}} = F_{w2}$ die Führungsübertragungsfunktion des unabhängigen Temperaturregelkreises bedeuten und

$\frac{P_{21} P_{22}}{P_{11} P_{22}} = C$ ein die Eigenschaften der Kopplungen widerspiegelnder Faktor ist; und mit diesen Bezeichnungen ist:

$$Q_{11,a}(p) = 1 + F_{01}(1 - CF_{w2}) = 1 + F'_{01}(p) = 0 \quad (8)$$

und die Übertragungsfunktion lautet:

$$F'_{w1}(p) = \frac{F'_{01}(p)}{1 + F'_{01}(p)} = \frac{x_1(p)}{w_1(p)}. \quad (9)$$

Im Falle von unabhängigen Kreisen (d. h. wenn $P_{12} = P_{21} = C = 0$), gelten:

$$Q_{11,a}(p) = Q_1 = 1 + F_{01} \quad (10)$$

und

$$F'_{w1}(p) = F_{w1} = \frac{F_{01}}{1 + F_{01}}. \quad (11)$$

Den Gleichungen ist zu entnehmen, daß die Übertragungsfunktion $F'_{01}(p)$ des auch die Kopplungen enthaltenden Untersystems von der Übertragungsfunktion $F_{01} = R_{11} \cdot P_{11}$ des als unabhängig betrachteten Kreises abweicht, und zwar um den Wert des Faktors $(1 - CF_{w2})$, d. h. die Folgen der Kopplungen mit dem Temperaturregelkreis werden gerade durch diesen Faktor verdeutlicht. Wie bereits erwähnt, wurde die Übertragungsfunktion (9) als Untersuchungsbasis der Übergangsvorgänge gewählt. Dabei wurde unter Berücksichtigung der Möglichkeiten eine graphische Methode angewandt, deren Arbeitsdiagramm in *Abb. 10* dargestellt ist und deren Zielsetzung die Bestimmung des zur Frequenzfunktion $F'_{01}(j\omega)$ gehörenden Bode-Diagramms war [7]. Die erhaltenen Bode-Diagramme sind in *Abb. 11* und die zu den Frequenzfunktionen $F_{01}(j\omega)$ bzw. $F'_{01}(j\omega)$ gehörenden Ortskurven in *Abb. 12* angeführt. Da die gestrichelten Kurven den als unabhängig betrachteten Druckregelkreis und die vollausgezogenen Kurven die Berücksichtigung der Kopplungen bezeichnen, kann die Wirkung der Kopplungen einerseits nach dem Ver-

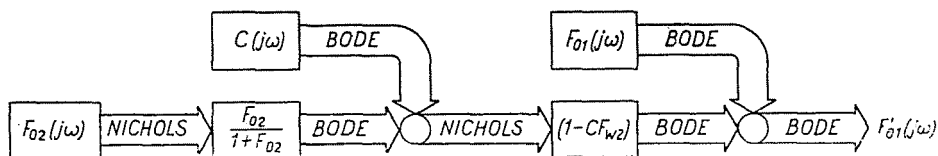


Abb. 10

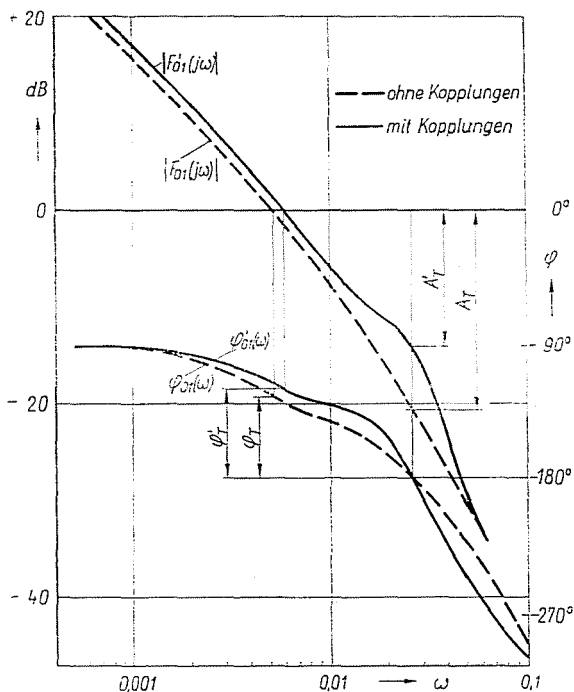


Abb. 11

lauf der Kurven, andererseits nach der Veränderung der Phasenreserven (φ_T) und Amplitudenreserven (A_T) beurteilt werden.

Die Untersuchung des Temperaturregelsystems kann in analoger Weise durchgeführt werden, da nach Öffnen des Systems in Punkt II/b die charakteristische Gleichung und die Führungsübertragungsfunktion in ganz gleicher Form aufgeschrieben werden können:

$$Q_{II,b}(p) = 1 + F_{02}(1 - CF_{w1}) \tag{12}$$

$$Q_{II,b}(p) = 1 + F'_{02}(p) = 0. \tag{13}$$

Die Führungsübertragungsfunktion ist:

$$F'_{w2}(p) = \frac{F'_{02}(p)}{1 + F'_{02}(p)} = \frac{x_2(p)}{w_2(p)}. \tag{14}$$

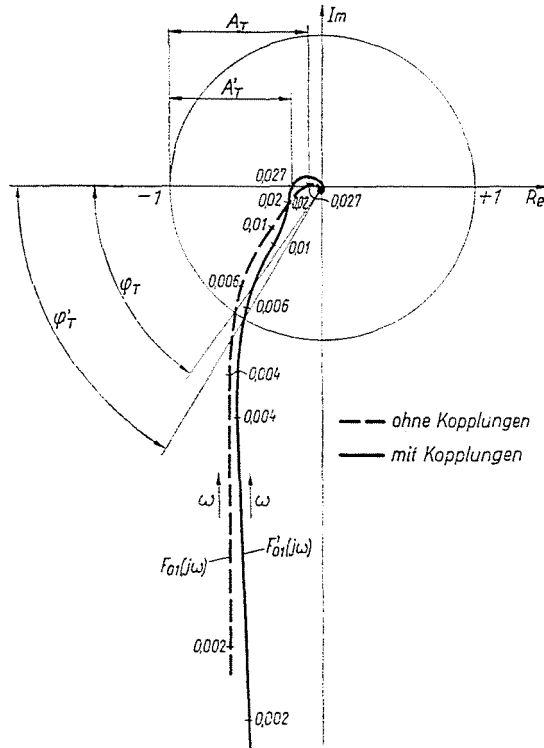


Abb. 12

Im Falle von unabhängigen Kreisen ($C = 0$):

$$Q_{11,b}(p) = Q_2 = 1 + F_{02} \quad (15)$$

und

$$F'_{w2}(p) = F_{w2}(p) = \frac{F_{02}}{1 + F_{02}}. \quad (16)$$

Damit können die zu diesem Untersystem gehörenden Bode-Diagramme und Ortskurven gemäß *Abb. 13* und *14* aufgetragen werden. Um den Vergleich zu erleichtern, faßt *Tabelle 3* die als Ergebnis erhaltenen Phasen- und Amplitudenreserven zusammen. Ein wesentlich eindeutigeres Bild ergibt sich über die Qualität der Regelung, wenn die Untersuchung der Führungsübergangsvorgänge im Zeitbereich durchgeführt wird. Deshalb werden die Frequenzgänge der geöffneten Untersysteme in NICHOLS-Diagrammen gemäß *Abb. 15* und *16* dargestellt, da diese bekanntlich die Bestimmung der Ortskurven bzw. Bode-Diagramme geschlossener Systeme von den Kurven der geöffneten Untersysteme ausgehend ermöglichen. Um die Kennwerte der Führungsüber-

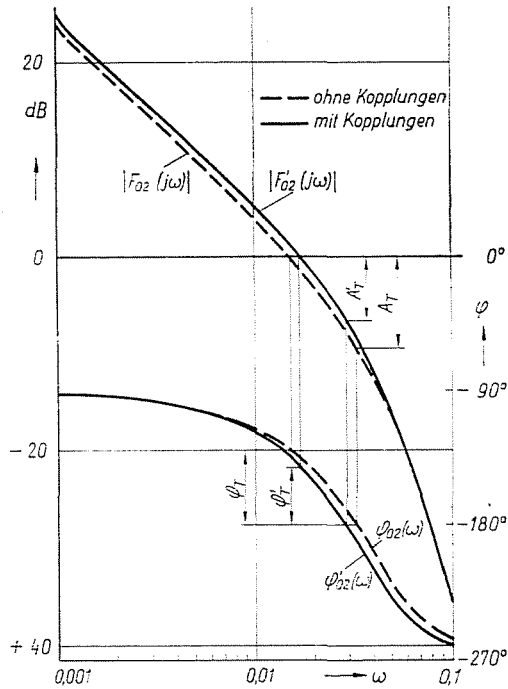


Abb. 13

tragungsfunktionen mit guter Näherung bestimmen zu können, genügt im vorliegenden Fall das Aufzeichnen der Amplitudenkreisfrequenz-Charakteristiken (Abb. 17 und 18) [9]. Die wichtigsten Kennwerte sind in Tabelle 4 zusammengefaßt.

Zusammenfassend kann auf Grund des angeführten Beispiels festgelegt werden, daß bei eingehenden Untersuchungen die Dampfkessel als Mehrfachsysteme behandelt werden sollen, unter Berücksichtigung der streckenseitigen Kopplungen.

Ferner kann aus den numerischen Ergebnissen der für das vorliegende Zweifachsystem durchgeführten Untersuchungen festgestellt werden, daß die Kopplungen zuerst die Temperaturregelung beeinflussen, wobei sich die Phasen- und Amplitudenreserven gleicherweise um 25% verringern, d. h., sie üben eine instabilisierende Wirkung auf diesen Kreis aus. Für Druck- und Leistungsregelung sind die Wirkungen ausgeglichen, da sich die Phasenreserve in diesem Fall um 11% erhöht und sich die Amplitudenreserve gleichzeitig um 27% verringert. Dagegen nehmen die maximale Überschwingung und die Ausregelzeit ab, so daß sie schließlich doch eine stabilisierende Wirkung auf den Kreis haben. Daher soll in diesem Fall der Temperaturregelkreis zweckmäßig mit größeren Stabilitätsreserven eingestellt werden. Aus den Ergebnis-

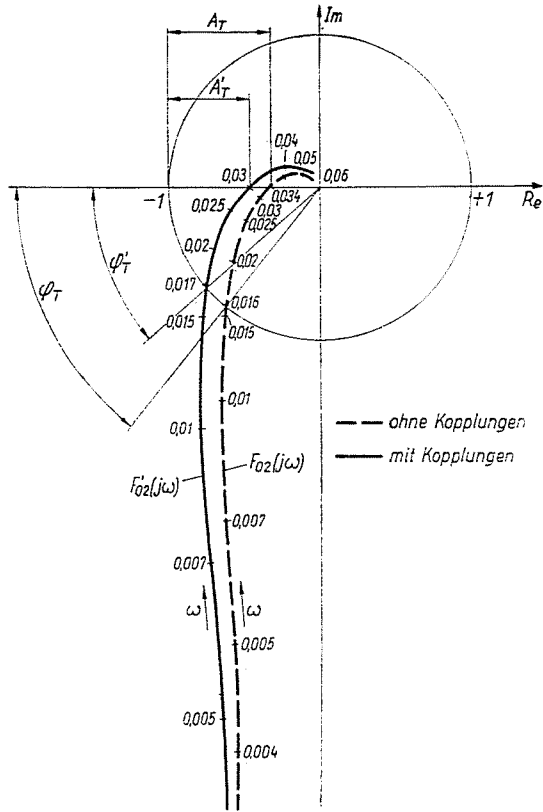


Abb. 14

Tabelle 3
Phasen- und Amplitudenvorrat

Untersystem	Ohne Kopplungen		Mit Kopplungen	
	φ_T Grad	A_T dB	φ'_T Grad	A'_T dB
Druckregelung	$F_{w1}(j\omega)$	55	20	—
	$F'_{w1}(j\omega)$	—	—	61
Temperaturregelung	$F_{w2}(j\omega)$	52	9,5	—
	$F'_{w2}(j\omega)$	—	—	40

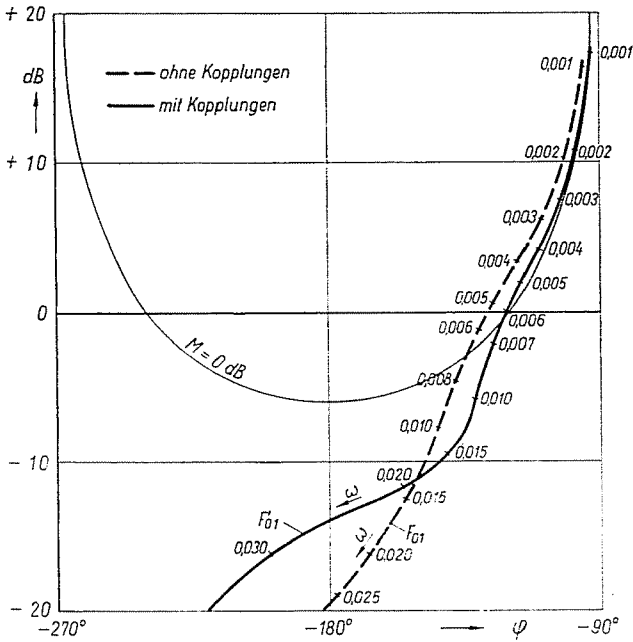


Abb. 15

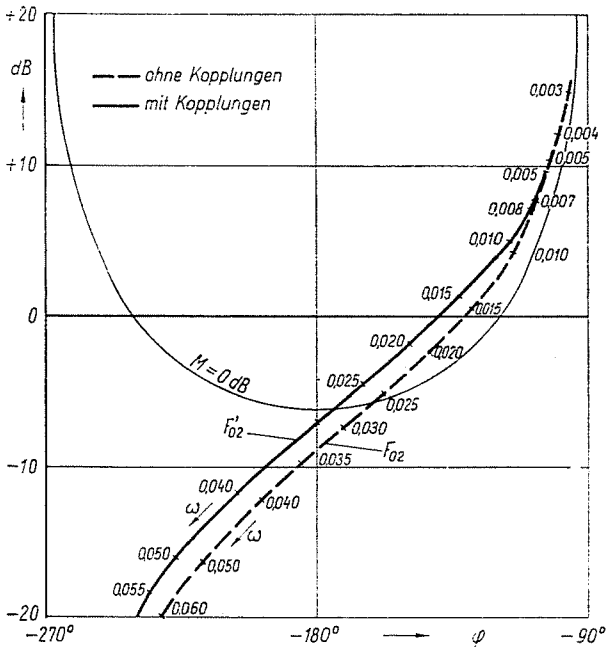


Abb. 16

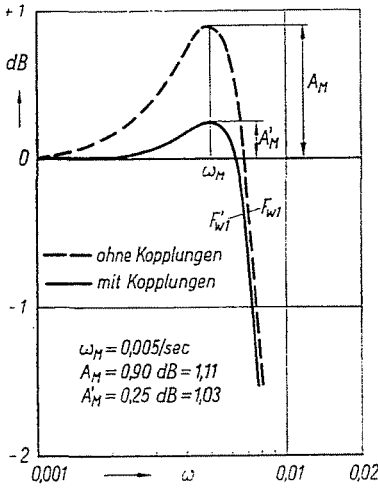


Abb. 17

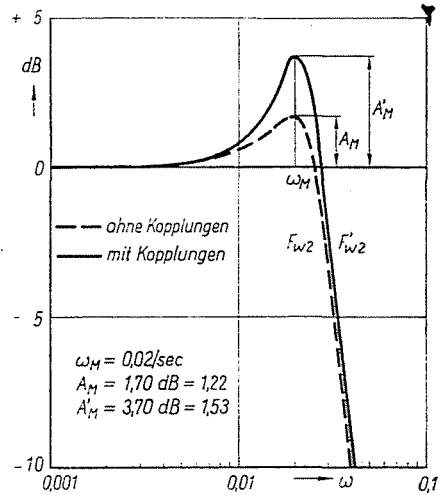
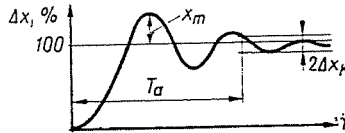


Abb. 18

Tabelle 4

Wichtigste Kennwerte der Führungsübergangsfunktionen



Kennwerte der Führungsübergangsfunktion	Druckregelung		Temperaturregelung	
	F_{W1}	F'_{W1}	F_{W2}	F'_{W2}
Überschwingung (x_m , %)	13	9	21	33
Ausregelzeit (T_a , sec)	705	436	254	378
Dämpfungsgrad (D)	0,55	0,62	0,45	0,35
Schwingungszahl während T_a	0,67	0,62	1,0	1,25

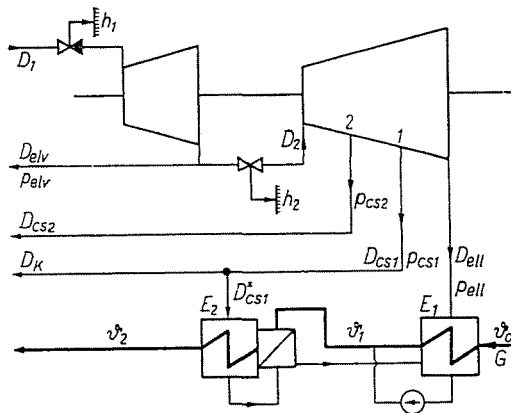


Abb. 19

sen ist zu erkennen, daß in dem untersuchten Zweifachsystem der Druck-Leistungsregelkreis in der Stabilität eine entscheidende Rolle spielt, was bei der Einstellung der Regler keinesfalls außer Acht gelassen werden darf.

3.2 Untersuchung der Entnahme-Kondensationsturbine als zweifachgeregeltes System [10]

Das zweite Beispiel bezieht sich auf die Entnahme-Kondensationsturbine des »Kraftwerks an der Donau«, in dessen Betrieb sich ähnliche Leistungsschwankungen zeigten. *Abbildung 19* zeigt die schematische Schaltung der Turbine. Hier soll unbedingt bemerkt werden, daß die Ansatzsturbine nur die Speisewasservorwärmer mit Heizdampf versorgt, so daß die nach hinten geführte Dampfmenge D_2 wesentlich kleiner als die Entnahmedampfmenge ist, d. h., es handelt sich um einen Spezialfall. *Abb. 20* zeigt das Regulationssystem der Turbine, dessen Aufgabe die Regelung der Entnahme- und Gegendrucke ist. Erwähnenswert ist ferner der in das System eingebaute »Druckwechsel«, dessen Bestimmung dem Plan gemäß die Entkopplung der Kreise ist.

In Zusammenhang mit dem primären Problem ist eine weitere Zielsetzung der vorliegenden Untersuchungen, die Stabilität des zweifachgeregelten Systems zu prüfen. Um die Übertragungsmatrix bzw. die charakteristische Gleichung aufzustellen, soll hier wiederum die P -kanonische Struktur des Systems hergestellt werden. Hier werden nur die wichtigsten Stufen der Untersuchung angeführt:

— *Abb. 21* zeigt das ausführliche Blockschaltbild des Gegendrucksystems. Nach Bestimmung der in unserem Fall als entscheidend betrachteten resultierenden Übertragungseigenschaften ergab sich die Möglichkeit, die Schaltung wesentlich zu vereinfachen (siehe *Abb. 22*).

— Die stufenweise Umwandlung des Blockschaltbildes führt schließlich zu der kanonischen Struktur.

In diesem Fall war die Durchführung streckendynamischer Messungen nicht möglich, so daß die Übertragungsfunktionen der einzelnen Glieder bzw. Gliedergruppen theoretisch bestimmt werden mußten.

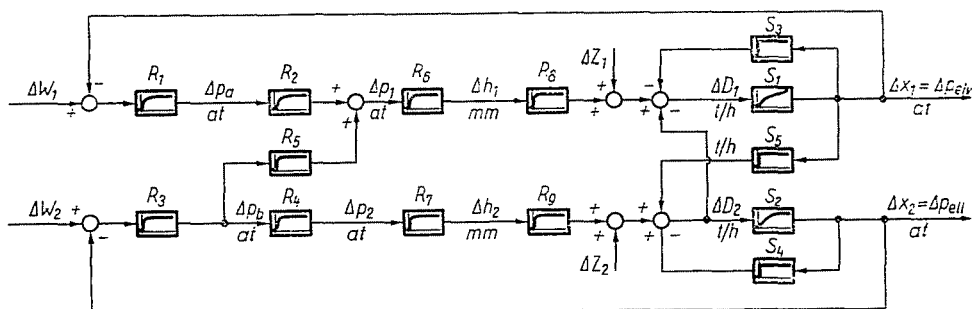


Abb. 22

Ohne alle mit der Gesamtproblematik der Untersuchung zusammenhängenden Fragen an dieser Stelle zu beantworten, sollen hier nur die wichtigsten Feststellungen und Schlußfolgerungen angeführt werden:

1 — Das ursprüngliche System, das über einen »Druckwechsel« verfügt, ist instabil.

2 — Die durch den Druckwechsel hergestellte gegenseitige Kopplung gewährleistet nicht die erwünschte Entkopplung der Kreise. Den Untersuchungen gemäß ist das System ohne »Druckwechsel« sogar weniger instabil, obwohl die Veränderungen unbedeutend sind.

3 — Auf Grund der Bode-Diagramme des Frequenzganges $F_0(j\omega)$ des geöffneten zweifachen Systems kann festgestellt werden, daß das System sehr zur Instabilität neigt. Daraus folgt, daß in dem vorliegenden Fall die Einstellung der Regler eine größere Rolle als im allgemeinen spielt.

4 — Durch die Verringerung der Übertragungsfaktoren der eingebauten Druckregler kann das System stabilisiert werden.

5 — Bei gegebener Eintrittsdampfmenge verschieben sich mit Erhöhung des Verhältnisses Entnahme/Gegendruckdampf sowohl der Entnahme- wie auch der Gegendruckregelkreis gegen die Instabilität.

Infolge seiner Trägheit spielt der Entnahme-Gegendruckregelkreis mit der Erhöhung der Entnahmedampfmenge eine immer entscheidendere Rolle in der Stabilität des Systems.

6 — Die richtige Ausbildung des Regelungssystems von Entnahme-Gegendruckturbinen wird entscheidend durch die dynamischen Eigenschaften des an die Turbinen angeschlossenen Verbrauchersystems (Dampfleitungen, Vorwärmer, Wärmeaustauscher usw.) bestimmt. Da aber diese von Fall zu Fall unterschiedlich sind, sollen sogar bei gleichen Turbinen unterschiedliche Streckeneigenschaften in Betracht gezogen werden. Deshalb sind die Ausgestaltung eines Regelungssystems (Wahl der Reglertypen, Anwendung etwaiger reglerseitiger Koppelglieder zur Entkopplung) sowie die optimale Einstellung des Systems in Kenntniss der Streckeneigenschaften von Fall zu Fall eigens für die gegebenen Verhältnisse durchzuführen. Dies erfordert aber schon in der Planungsphase eine ausführliche Kenntnis der technologischen, strömungstechnischen, thermodynamischen, konstruktiven usw. Angaben, die zur Bestimmung des Streckenverhaltens nötig sind.

Zusammenfassung

Zwischen den Regelkreisen der Haupteinrichtungen von Kraftwerken bestehen starke, streckenseitige Kopplungen, deshalb sind diese Einrichtungen als Mehrfachsysteme zu behandeln. Nach kurzer Vorführung der Rolle theoretischer und experimenteller Untersuchungen in Zusammenhang mit diesen Systemen, beschreibt die vorliegende Arbeit anhand von zwei konkreten Aufgaben eine graphische Methode, die bei Zweifachsystemen erfolgreich benutzt werden kann. Die Untersuchungsergebnisse bestätigen die Wichtigkeit der Berücksichtigung streckenseitiger Kopplungen.

Literatur

1. PETZ, E.: Kesseldynamische Untersuchungen in Kraftwerken (ungarisch), Abhandlung, 1969.
2. CZINDER, J.: Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Leistungs- und Dampftemperaturregelung des Dampfkessels von Kraftwerken (ungarisch), Diplomarbeit, Technische Universität, Budapest, Lehrstuhl für Wärmekraftwerke, 1969.
3. PETZ, E.: Untersuchung der Leistungs- und Dampftemperaturregelung des Dampfkessels mit 320 t/h Leistung des Wärmekraftwerkes Gyöngyös (ungarisch), Gutachten, 1970.
4. PETZ, E., CZINDER, J., LENGYEL, L.: Dynamische Untersuchung des Dampfkessels TGM-90 des Wärmekraftwerks an der Donau (ungarisch), Abhandlung, 1972.
5. PETZ, E., CZINDER, J., LENGYEL, L.: Graphoanalytische Identifikationsmethoden (ungarisch), Abhandlung, 1971.
6. PROFOS, P.: Die Regelung von Dampfanlagen. Springer Verlag, 1962.
7. SCHWARZ, H.: Mehrfachregelungen. Springer Verlag, 1967.
8. LENGYEL, L.: Untersuchung von Zweifachsystemen (ungarisch), Diplomarbeit, Technische Universität, Budapest, Lehrstuhl für Wärmekraftwerke, 1970.
9. CSÁKI, F.: Dynamik der Regelungen (ungarisch), Verlag der Ungarischen Akademie der Wissenschaften, Budapest, 1966.
10. PETZ, E., CZINKÓCZKY, B., LENGYEL, L.: Untersuchung des Regelungssystems von Entnahme-Gegendruckdampfturbinen (ungarisch), Abhandlung, 1971.

Dr. Ernő PETZ H-1119 Budapest, Fehérvári út 141.