

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins :
gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen
Elektrotechnischen Vereins (SEV) und des Verbandes Schweizerischer
Elektrizitätswerke (VSE)

Band: 57 (1966)

Heft: 7

Artikel: Automatisierung im Dampfkraftwerk

Autor: Profos, P.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-916583>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 18.10.2024

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

Automatisierung im Dampfkraftwerk

Vortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV vom 28. Oktober 1965 in Lausanne,

von P. Profos, Zürich

621.311.22-52

Im Zusammenhang mit der Überwachung und Führung des Betriebes eines Dampfkraftwerkes können drei Aufgabenbereiche unterschieden werden, die allerdings eng miteinander verflochten sind: 1. Die laufende Erfassung des Betriebszustandes in weitestem Sinne; 2. Das Führen der Anlage unter normalen Betriebsbedingungen, d. h. das Aufrechterhalten des Betriebszustandes, und 3. Das Führen der Anlage unter allen übrigen Betriebsbedingungen, d. h. im allgemeinen das Verändern des Betriebszustandes.

Die erste Aufgabe wird heute in der Weise gelöst, dass dem Bedienungspersonal die wichtigsten Informationen in einer Messwarte konzentriert angezeigt und registriert werden. Das Aufrechterhalten des Normalbetriebszustandes erfolgt weitgehend automatisch durch die Regelung der Anlage. Dagegen werden in den übrigen Betriebsphasen (z. B. Anfahren oder Betriebsstörung) die erforderlichen Eingriffe vorwiegend von Hand eingeleitet, wenn auch unter Benützung von Fernsteuerungen. Der Mensch ist damit in diesen Phasen noch als aktives Glied in die Kette der Wirkungen eingeschaltet, indem er namentlich die allen Eingriffen vorangehenden Überlegungen und Entscheide — d. h. logischen Operationen — durchzuführen hat. Heute sind nun Entwicklungen im Gange, auch diese logischen Operationen teilweise oder vollständig an Prozessrechner zu übertragen und damit die Vollautomatisierung des Dampfkraftwerkes anzustreben. In der vorliegenden Arbeit wird ein Überblick über den heutigen Stand und die im Gang befindliche Weiterentwicklung der Automatik im Dampfkraftwerk gegeben.

En ce qui concerne la surveillance et la conduite d'une centrale thermique, trois tâches se présentent, qui sont d'ailleurs étroitement liées: 1^o la surveillance constante de l'état de service, dans le sens le plus étendu, 2^o la conduite de la centrale dans des conditions normales d'exploitation, c'est-à-dire le maintien du service, et 3^o la conduite dans toutes les autres conditions, c'est-à-dire d'une façon générale la modification de l'état de service.

La première de ces tâches est actuellement facilitée, pour le personnel d'exploitation, par la centralisation de l'indication et de l'enregistrement des informations les plus importantes. Le maintien de l'état normal de service est grandement automatisé par les équipements de réglage de l'installation. Par contre, pour les autres phases de l'exploitation (mise en marche ou perturbation, par exemple), les interventions sont le plus souvent amorcées manuellement, à l'aide de télécommandes. Dans ces cas, l'homme demeure un membre actif dans le déroulement des actions, car il doit procéder à des opérations logiques, c'est-à-dire réfléchir avant de décider des interventions nécessaires. Toutefois, depuis quelque temps, on cherche à confier partiellement ou complètement ces opérations logiques à des ordinateurs, afin d'arriver à une automatisation intégrale des centrales thermiques. Le conférencier donne un aperçu de l'état actuel de cette automatisation et des développements en cours.

1. Einleitung

Ein modernes Dampfkraftwerk ist eine sehr komplexe, vierteilige technische Einrichtung, in welcher gleichzeitig eine Vielzahl physikalischer und chemischer Vorgänge in bestimmter Weise ablaufen sollen. Dabei unterliegen diese Einrichtungen bzw. die sich in ihnen abspielenden Prozesse dauernd der Einwirkung innerer und äusserer Störungen, und damit ist die Notwendigkeit einer fortlaufenden Überwachung und Führung der Anlage gegeben. Die hierbei sich stellende Aufgabe besteht zunächst darin, laufend den Betriebszustand der Anlage zu erfassen, d. h. die Werte der Betriebsgrössen und den Schaltzustand, gegebenenfalls auch die Betriebsfähigkeit der Einrichtungen. Auf Grund dieser Information ist zu entscheiden, wann und welche Eingriffe in die Anlage vorzunehmen sind, und diese Eingriffe sind in der Folge auszulösen. Diese allgemeine Aufgabe besteht während sämtlicher Betriebsphasen des Kraftwerkes, also insbesondere auch ausserhalb des Normalbetriebes, wobei immer das Ziel ist, bei tunlichster Schonung der Einrichtungen eine möglichst hohe spezifische Energieausbeute zu erreichen und auch allenfalls auftretende Gefahrenzustände sicher zu beherrschen (Fig. 1).

Bei der Lösung dieser Aufgabe bedient man sich in zunehmendem Ausmass der Hilfsmittel der Automatik, wobei allerdings der Grad der Automatisierung in weiten Grenzen variieren kann. In den meisten grösseren Anlagen entspricht heute dieser Automatisierungsgrad etwa der stark schematisierten Darstellung in Fig. 2. Danach wird der Betriebszustand weitgehend durch Fernmessung bzw. Fernmeldung erfasst und in einer zentralen Mess- und Bedienungswarte angezeigt bzw. registriert. Von besonders wichtigen Grössen werden auch Grenzwertsignale gebildet und allenfalls Gefahrenmeldungen ausgelöst.

Im übrigen muss aber das Bedienungspersonal heute noch die Auswertung der laufend angegebene, sehr umfangreichen und komplexen Informationen selbst durchführen und darauf basierend Entscheidungen über allfällige Eingriffe treffen.

Im Normalbetrieb wird allerdings ein beträchtlicher Teil dieser Arbeit durch die automatische Regelung übernommen, welche die wichtigsten Betriebsgrössen der Anlage innerhalb der dem jeweiligen Betriebszustand entsprechenden Normalbereiche hält. Die Tätigkeit des Personals kann sich dann weitgehend auf die gelegentliche Anpassung der Sollwerte

34710-732

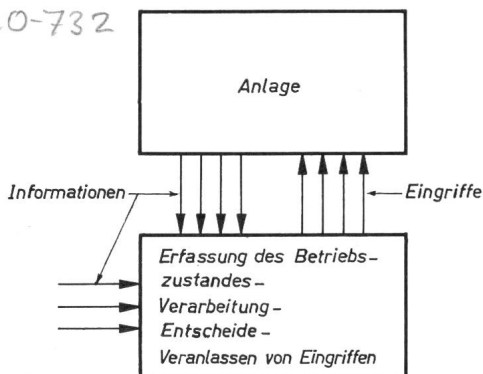


Fig. 1

Allgemeines Blockschaema der Überwachung und Führung eines Dampfkraftwerkes

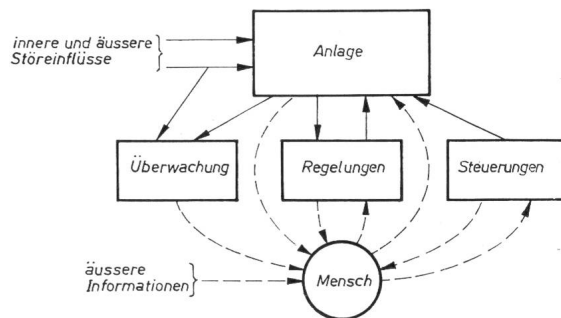


Fig. 2

Blockschaema zur summarischen Darstellung des üblichen Grades der Automatisierung im heutigen Dampfkraftwerk

--- durch Mensch realisierte Signalverbindungen
 — durch Automatik realisierte Signalverbindungen

dieser Regler und die allgemeine Überwachung der Anlage beschränken.

In allen nicht als Normalbetrieb zu betrachtenden Betriebsphasen, also bei grösseren Laständerungen und Betriebsumstellungen, beim An- und Abfahren und in Gefahrensituationen ist dagegen die Führung der Anlage heute im allgemeinen noch fast ausschliesslich dem Betriebspersonal überbunden. Zwar können die nötigen Eingriffe wiederum weitgehend von der bereits erwähnten Warte aus mit Hilfe von *Steuerungen* vorgenommen werden. Aber der Mensch ist in diesen Phasen immer als unabhkömmliches Glied in die Funktionskette des technischen Geschehens eingeschaltet.

Im folgenden sollen nun derzeitiger Stand und Entwicklungstendenzen der Automatik zur Überwachung und Führung des Betriebes eines Dampfkraftwerkes etwas eingehender betrachtet werden. Dies soll in der üblich gewordenen Unterteilung des ganzen Komplexes in drei Bereiche geschehen, die sich auch in der einleitenden Betrachtung abzeichneten, nämlich:

1. Erfassung und Verarbeitung der Informationen über den Betriebszustand;
2. Aufrechterhalten des Betriebszustandes;
3. Verändern des Betriebszustandes.

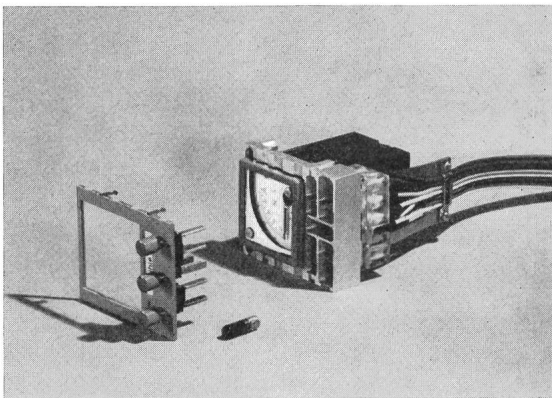


Fig. 3
Bausteine zur Kleinwartentechnik
(Siemens)

Es ist aber immer im Auge zu behalten, dass diese Bereiche stets mehr oder weniger eng verflochten sind und eine strenge Abgrenzung nicht möglich ist.

2. Datenerfassung und Datenverarbeitung

Um jederzeit einen hinreichenden Überblick über Zustand und Geschehen in der Anlage zu haben, müssen zahlreiche Messwerte, Schaltzustände und andere Informationen erfasst und an die Informationszentrale gemeldet werden. Als Beispiel möge dienen, dass in einem kohlebefeuerten 150-MW-Kraftwerk heute gegen 500 Messwerte durch Anzeigeeinstrumente an der Warte wiedergegeben werden, von denen ca. 1/5 ausserdem registriert werden. Daneben werden gegen 400 Signale für Betriebs- und Störungsmeldungen dort empfangen. Dabei sind dies nur die wichtigsten Informationen, und eine Anzahl untergeordneter Einrichtungen, wie Beköhlung, Entschlackung, Russbläser, Wasseraufbereitung usw., werden örtlich überwacht.

Die fortlaufende Aufnahme und Interpretation dieser vielen Informationen bedeutet eine beträchtliche Beanspruchung des Wartenpersonals, und man versucht mit verschiedenen Mitteln, diese Aufgabe zu erleichtern. Viel kann dabei schon durch

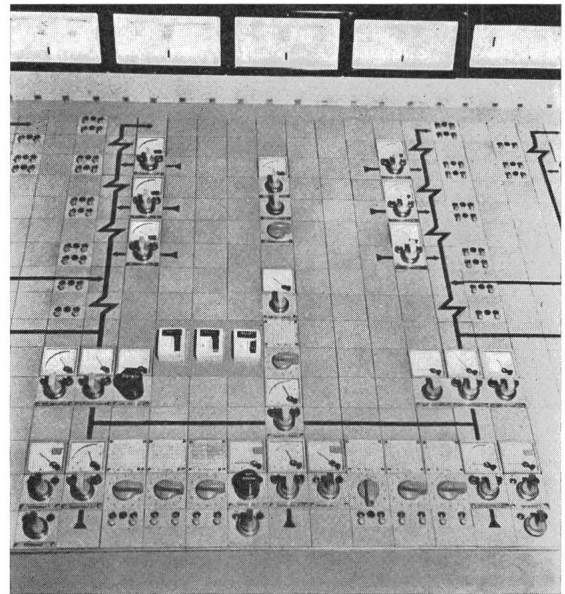


Fig. 4
Kleinwartentechnik
Ausschnitt eines Überwachungspultes in einem modernen Kraftwerk
(H+B)

geeignete Ausbildung der Warte getan werden. Leicht ablesbare Instrumente und Meldegeräte, übersichtliche, gegebenenfalls durch Schemadarstellungen unterstützte Anordnung derselben und die starke räumliche Raffung mit Hilfe der Kleinwartentechnik sind, unter anderen, geeignete Mittel dazu (Fig. 3...5). Sie bezwecken alle, die im Betrieb gesammelten Informationen dem Personal in möglichst leicht fasslicher Form anzubieten.

Man muss sich aber darüber klar sein, dass auch die geschickteste Wartentechnik nicht verhindern kann, dass das Bedienungspersonal gelegentlich — namentlich in Störfällen — überfordert wird und dann die Gefahr besteht, dass wichtige Informationen nicht mehr zur Kenntnis genommen und in der Folge Fehldispositionen getroffen werden. Diesem Problem kann nur in der Weise begegnet werden, dass die im Betrieb erfassten Informationen *vorverarbeitet* und dabei *verdichtet* werden und das Personal gleichzeitig von zeitraubenden Schreibarbeiten befreit wird.

Eine solche Verarbeitung findet, wie bereits erwähnt wurde, in beschränktem Umfang schon seit langem statt, indem kritische Messgrössen automatisch auf das Über- oder

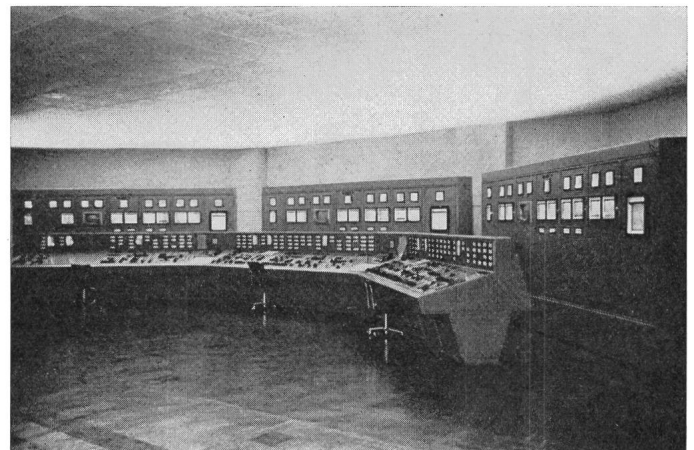


Fig. 5
Messwarte in einem Grosskraftwerk
(H+B)

DATUM	UHRZEIT	MESSTELLE	ABWEICHUNG	MESSWERT
12.11.63	6.36	KAM 45	ZU HOCH	513 GRAD C
	6.41	KAM 45		510 GRAD C
	8.12	KAM 17	ZU HOCH	280 GRAD C
	13.07	KAM 02	ZU HOCH	67 KP/CM2
	14.00	KAM 02		65 KP/CM2
	15.07	KAM 41	ZU HOCH	480 GRAD C
	16.01	KAM 41		470 GRAD C
	23.04	QAM 31	TENDENZ	43/48 GRAD C
13.11.63	23.17	QAM 31	ZU HOCH	63 GRAD C
	0.07	QAM 31		43 GRAD C

Fig. 6
Störungsprotokoll von analogen Messwerten [4]

Unterschreiten von Grenzwerten geprüft und entsprechende Signale ausgelöst werden. Aber die modernen Datenverarbeitungsanlagen sind im Stande, sehr viel weiterzugehen, und man geht in Grossanlagen heute mehr und mehr dazu über, solchen Einrichtungen etwa folgende Aufgaben zu überbinden:

- Feststellen von *Grenzwertüberschreitungen* hinsichtlich Grösse und Tendenz von kritischen Messwerten (z.B. Frischdampftemperatur), und zwar gegen feste oder gleitende Referenzwerte.
- Bildung von *Gütezahlen*, wie Kessel- und Turbinenwirkungsgrad, Gütezahlen von Vorwärmern und Kondensatoren (Momentan- und Mittelwerte).
- Erstellen des *Betriebsprotokolls*, in das neben wichtigen Messgrössen auch alle wesentlichen Störungen und Eingriffe aufgenommen werden können. Wichtig ist, dass hier die Möglichkeit besteht, wenn nötig interessierende Vorgänge vorübergehend in hoher zeitlicher Auflösung zu registrieren, um eine nachträgliche Störungsanalyse zu ermöglichen (Fig. 6, 7).

Die Automatisierung dieser Funktionen bringt dem Betriebspersonal bereits eine spürbare Entlastung [namentlich lit. c)] und gibt ihm besonders in kritischen Situationen vermehrt Zeit zum Überlegen der notwendigen Entscheide. Gleichzeitig hat es damit auch Informationen zur Verfügung, welche es erleichtern, einer optimalen Betriebsweise nahezu kommen.

Eine weitere Informationsverdichtung kann erfolgen, indem für bestimmte Betriebssituationen automatisch einzelne oder alle erforderlichen Massnahmen ermittelt und dem Wartepersonal im Sinne von *Entscheidungshilfen* bekanntgegeben werden. Damit kann also auch eine mehr oder weniger weitgehende Entlastung von komplexen und eventuell unter Zeitdruck durchzuführenden Überlegungen erzielt werden. Im Grenzfall kann diese automatische Informationsverarbeitung so weit gehen, dass der Mensch nur noch die ihm vom Automaten vorgeschlagenen Eingriffe *auslösen* muss.

Eine solche über den bisherigen Rahmen wesentlich hinausgehende Datenverarbeitung macht den Einsatz entsprechender *Rechenautomaten* notwendig (Fig. 8). Dabei kann die Verbindung des Rechners mit der Anlage aber in verschiedener Weise erfolgen. Man unterscheidet insbesondere

DATUM	UHRZEIT	MESSTELLE	
28.11.63	17.56.17	G-DIFFSCHUTZ	
		G-UEBERSTROM	
		G-SCHALTERFALL	
		SCHNELLSCHLUSS E	
29.11.63	7.26.22	HD-VORWAERMER 1	
		SCHNELLSCHLUSS E	
		RUECKLEISTUNG	
		G-SCHALTERFALL	
		SCHNELLSCHLUSS	
14.12.63	8.10.15	RUECKLEISTUNG	
		8.10.16	
		8.10.19	G-SCHALTERFALL

Fig. 7
Protokoll mit hoher zeitlicher Auflösung für Gefahrenmeldung [4]

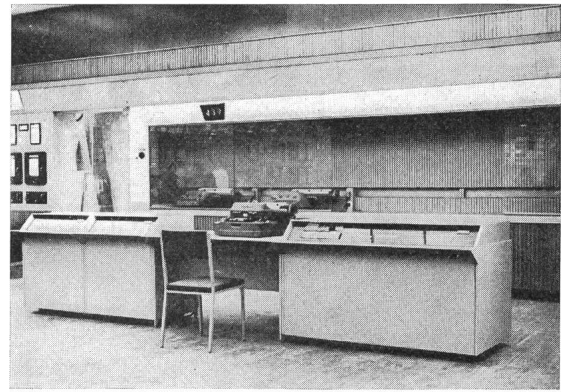


Fig. 8
Prozessrechner in einem Dampfkraftwerk
(Euro comp)

die beiden Möglichkeiten, die in Fig. 9 angedeutet sind. Bei der «on line»-Schaltung erfolgt die Verarbeitung der Informationen durch den Rechner praktisch synchron mit dem Geschehen in der Anlage; bei der «off line»-Anordnung liegt eine zeitliche Entkopplung der Vorgänge vor. Infolgedessen wird die zweite Variante nur für Protokoll und Datenreduzierung für nachträgliche Betriebskontrolle benutzt, die erste Variante darüber hinaus auch für alle übrigen oben genannten Zwecke.

3. Aufrechterhalten des Betriebszustandes

Im Normalbetrieb, einschliesslich Phasen mit nicht zu grossen und steilen Laständerungen, sind zum Aufrechterhalten des Betriebszustandes praktisch nur Anpassungen der Energie- bzw. Stoffströme nötig, dagegen *keine Eingriffe in die Betriebsstruktur* (Schalteingriffe). Diese Anpassungen werden heute mit wenigen Ausnahmen durch analog arbeitende *Regel-einrichtungen* vorgenommen, auf Grund laufend durchgeführter Messung der zu regelnden Betriebsgrössen. Dementsprechend beschränkt sich die Funktion des Wartepersonals im wesentlichen auf die allgemeine Betriebsüberwachung.

Welches ist nun die Aufgabe dieser Regelung? Zu ihrer Umschreibung ist davon auszugehen, dass der Prozess der Energieerzeugung sich zusammensetzt aus einer funktionellen Folge von einzelnen Energieumformungs- und Energietransportvorgängen (Fig. 10). Diese Vorgänge müssen in ihrem zeitlichen Ablauf alle so aufeinander abgestimmt sein, dass es nirgends zu Zerrungen oder Stauchungen des Energie- und Stoffflusses kommt, da solche immer mit Abweichungen der

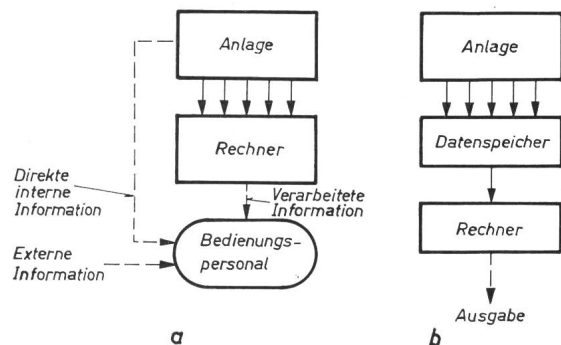


Fig. 9
Einsatz von Prozessrechnern zur Datenverarbeitung
a on-line-Schaltung: Rechner direkt mit Anlage gekoppelt
b off-line-Schaltung: Rechner indirekt (über Speicher) mit Anlage gekoppelt

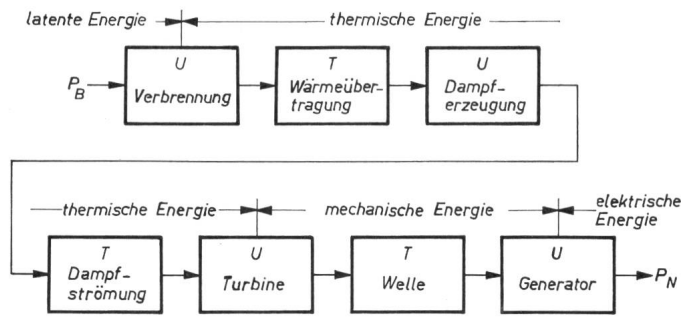


Fig. 10
Energieumformungs- und Energietransportvorgänge in einem Dampfkraftwerk

Betriebsgrößen vom Normalbereich verbunden sind. Gleichzeitig muss die vom Verbraucher verlangte Leistung erzeugt werden. Dazu kommen schliesslich noch besondere Bedingungen, die sich aus den Forderungen nach wirtschaftlich optimaler Fahrweise und sicherem Betrieb ergeben.

Als primär einzuhaltende *Regelgrößen* können, wenn von Spannung und Frequenz des durch den Generator erzeugten Stromes abgesehen wird, die folgenden gelten:

- Leistung P
- Frischdampfdruck p
- Verbrennungsgüte (Massgrösse z.B. Luftüberschusszahl λ)

Meist kommen dann noch als weitere wichtige *Regelgrößen* hinzu:

- Frischdampfdruck p
- Rauchgasdruck in der Brennkammer p_R
- Arbeitsmittelinhalt des Dampferzeugers (Massgrösse z.B. Wasserstand h im Trommelkessel)

Die Beeinflussung dieser Größen durch die Regelung muss dadurch geschehen, dass diese auf die die Anlage durchfliessenden Stoffströme einwirkt. Als solche *Stellströme* kommen primär in Frage:

- Brennstoffstrom \dot{M}_B
- Luftstrom \dot{M}_L
- Speisewasserstrom \dot{M}_W

Ferner werden meist auch Regelwirkungen über:

- Frischdampfstrom \dot{M}_D
- Einspritzwasserstrom \dot{M}_E und
- Rauchgasstrom \dot{M}_R

ausgeübt.

Nun besteht eine besondere Schwierigkeit der Regelung einer Dampfanlage darin, dass keine von vornherein gegebene Zuordnung zwischen den den genannten Stellströmen entsprechenden *Stellgrößen* (z.B. Regelventilstellungen) und den erwähnten *Regelgrößen* besteht. Vielmehr ist es fast immer so, dass eine Veränderung *einer* Stellgrösse von Einfluss auf *mehrere* Regelgrößen ist. So beeinflusst etwa eine Brennstoffstrom-Änderung in jedem Falle sämtliche sechs genannten

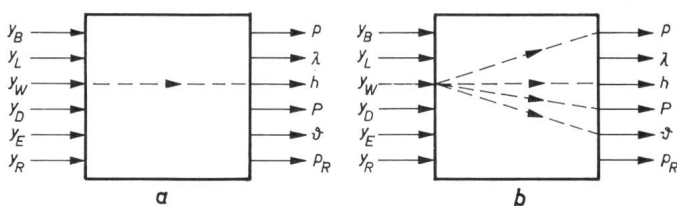


Fig. 11
Beispiele der Beeinflussung der Hauptregelgrößen von Dampferzeugern, ausgehend von einer Speisewasserstrom-Änderung
a Trommelkessel; b Zwangsdurchlaufkessel

Regelgrößen merklich. Andererseits ist eine Veränderung des Speisewasserstroms je nach Kesseltyp nur auf den Arbeitsmittelinhalt (beim Trommelkessel) oder aber auch auf verschiedene andere Regelgrößen von Einfluss (bei Zwangsdurchlaufkesseln) (Fig. 11). Es liegt mithin bei der Dampfanlage der typische Fall einer *Mehrfachregelung* vor, die eigentlich als Ganzes betrachtet werden müsste, da die einzelnen Regelkreise über die Anlage untereinander gekoppelt sind. Da hierbei aber die Bedingungen immer wieder anders liegen (Brennstoff, Kesseltyp, Dampfprozess, Betriebsweise usw.), gibt es keine Universallösung für dieses Regelproblem. Vielmehr muss in jedem Fall die optimale Regelschaltung gesucht werden, auch wenn dabei natürlich von bekannten und bewährten Schaltungselementen ausgegangen werden kann. Die Regelung einer Dampfanlage ist also immer ausgesprochene «Maßschneiderei».

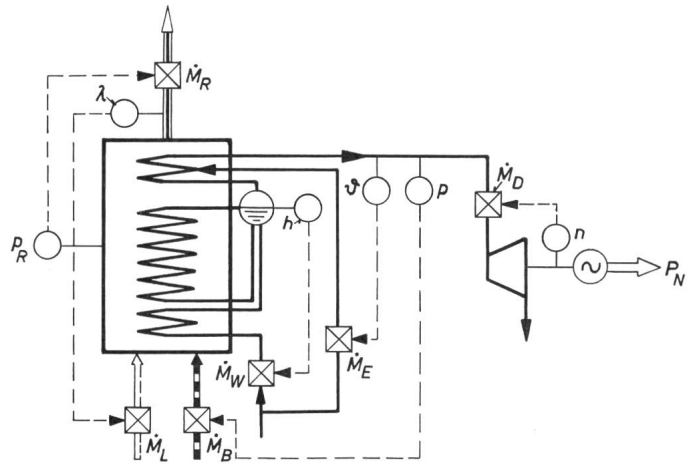


Fig. 12
Beispiel der Grund-Regelschaltung eines Dampfkraftwerks (Trommelkessel, Turbine mit Drehzahl-Leistungsregelung)

Anstelle einer Betrachtung der vielen möglichen Varianten soll nur *eine* besonders häufig angewandte Lösung eingehender besprochen werden, der die folgende Zuordnung von Regelgrößen und Stellströmen zugrunde liegt (Tabelle I). Die

Zuordnung von Regelgrößen zu Stellgrößen

Tabelle I

Regelgrösse	Stellstrom	Bezeichnung der Regelkreise
p	\dot{M}_B	Druck-Leistungsregelung des Kessels
ϑ	\dot{M}_E	Dampf temperaturregelung
$P, (n)$	\dot{M}_D	Drehzahl-Leistungsregelung der Turbine
λ	\dot{M}_L	Verbrennungsregelung
h	\dot{M}_W	Speisewasserregelung
p_R	\dot{M}_R	Rauchgasdruckregelung

üblichen Bezeichnungen der damit gegebenen Einzelregelungen sind ebenfalls in der Tabelle enthalten. Die entsprechende Gesamt-Regelschaltung ist für das Beispiel einer Anlage mit Trommelkessel in Abb. 12 vereinfacht wiedergegeben.

Im folgenden sollen nur die einzelnen Regelkreise kurz hinsichtlich der angewandten Schaltungen besprochen werden. Dabei wird sich zeigen, dass fast immer von der sog. *Kaskadenregelung* Gebrauch gemacht wird, deren Schema in Fig. 13 gezeigt ist. Der schnellwirkende Hilfsregelkreis arbeitet bei dieser Schaltung mit einer passend gewählten Hilfsregelgrösse, wofür oft der Stellstrom des Systems gewählt wird. Der Hauptregler beeinflusst dann nicht direkt die Stellgrösse (meist

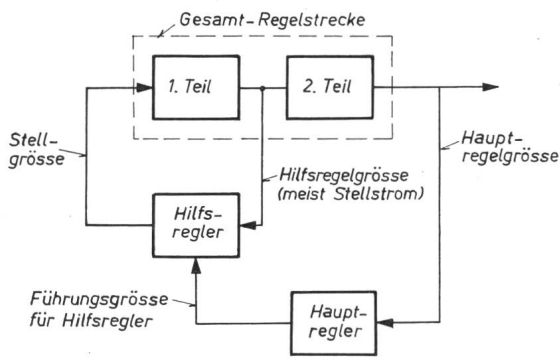


Fig. 13
Prinzipschaltung der Kaskadenregelung

Ventilstellung), sondern den Sollwert des Hilfsreglers. Mit dieser Anordnung gelingt es bekanntlich, die auf den ersten Teil der Regelstrecke wirkenden Störungen weitgehend unwirksam zu machen und damit eine bessere Regelgüte des Gesamtsystems zu erzielen.

4. Drehzahl-Leistungsregelung des Turbogenerators

Der die vom Kraftwerk abgegebene Leistung unmittelbar bestimmende Teil der Anlage ist — als letztes Glied in der Kette der Energieumwandlungen — die Turbogeneratorgruppe. Ihre Regelung ist primär eine Drehzahlregelung, da die Drehzahl die für die Betriebssicherheit der Maschine wichtigste Grösse ist. Diese Regelung (Fig. 14) ist nun mit einer Leistungsregelung in passender Weise kombiniert, z.B. im Sinne der oben erwähnten Kaskadenschaltung. Dadurch wird erreicht, dass die Stabilität der Regelung bei jedem Betriebszustand gesichert ist und trotzdem die Beteiligung der Maschine an der Frequenzhaltung im Netz nach Belieben eingestellt werden kann. — Oft wird die Maschinenregelung auch mit einem Druckregler verknüpft, der dafür sorgt, dass keine gefährlichen Absenkungen des Frischdampfdruckes auftreten können.

5. Druck-Leistungsregelung des Dampferzeugers

Diese Regelung hat dafür zu sorgen, dass die Dampferzeugung laufend dem Bedarf der Turbine angepasst wird, wobei im allgemeinen zugleich ein fester Wert des Frischdampfdruckes eingehalten werden soll. Bei der betrachteten, bevorzugt realisierten Lösung wird die Brennstoffzufuhr \dot{M}_B dem Einfluss der Regelgrösse unterworfen, allerdings nicht direkt, sondern wiederum im Sinne einer Kaskadenregelung. Normalerweise wird ausserdem von der *Störgrössenauf-*

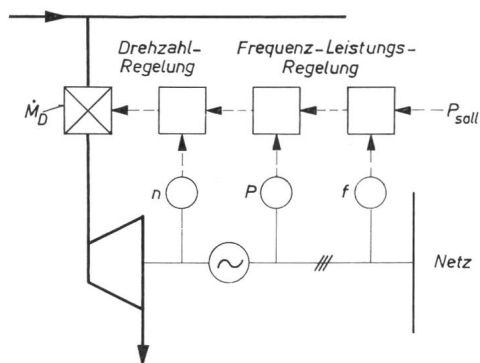


Fig. 14
Beispiel einer Grundschaltung der Drehzahl-Leistungsregelung der Maschinengruppe

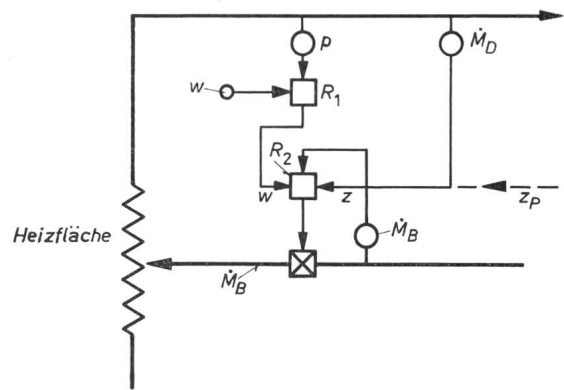


Fig. 15
Beispiel der Grundschaltung der Druck-Leistungsregelung des Dampferzeugers

schaltung Gebrauch gemacht, um die oft geforderten schnellen und grossen Laständerungen ohne grössere Druckabweichungen ausregeln zu können. Hierfür wird vielfach der Frischdampfstrom \dot{M}_D , nicht selten aber auch eine von der Leistungsregelung der Turbine abgeleitete Grösse z_P benutzt (Fig. 15).

6. Frischdampf-Temperaturregelung

Besondere Bedeutung kommt der Regelung der Frischdampf-Temperatur zu, da mit ihrer Güte einerseits der Prozesswirkungsgrad, andererseits die Lebensdauer wichtiger Anlage-teile verknüpft sind.

Abgesehen von besonderen Fällen, steht als Mittel zur Beeinflussung der Dampftemperatur das Einspritzen von Speisewasser in den Dampfstrom im Vordergrund. Die zugehörige Regelschaltung ist allgemein nach dem Prinzip der Kaskadenregelung aufgebaut, häufig noch ergänzt durch Störgrössenaufschaltung (Fig. 16). Aus regeldynamischen Gründen umfasst die Regelstrecke nur den Endüberhitzer. Sollen die Temperaturen in vorgeschalteten Überhitzerteilen ebenfalls unter genaue Kontrolle gebracht werden, so lässt sich das eben beschriebene Regelprinzip natürlich auch hier anwenden.

7. Regelung der Zwischendampftemperatur

Bei der Temperaturregelung des Zwischenüberhitzers ist bekanntlich eine Einspritzkühlung mit Rücksicht auf den Prozesswirkungsgrad unerwünscht. Hier hat sich die Anwendung von Wärmetauschern zwischen Frisch- und Zwischendampfsystem eingebürgert, oft noch kombiniert mit gleichzeitigem Wärmetausch mit dem Rauchgas (Triflux). Der Temperaturregler wirkt hierbei entweder auf ein Einspritzventil (Einspritzung ins Frischdampfsystem) oder ein Umgehungsventil am Wärmetauscher. Im übrigen wird auch hier die sinngemäss abgewandelte Regelschaltung nach Fig. 16 angewendet.

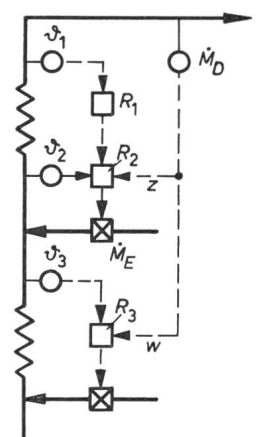


Fig. 16
Beispiel der Grundschaltung der Frischdampf-Temperaturregelung

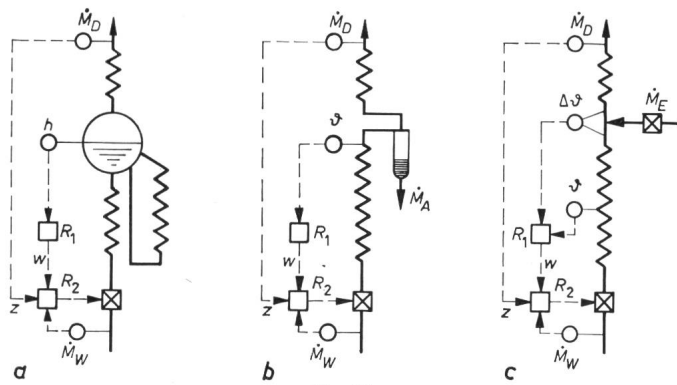


Fig. 17

Beispiele von Grundschaltungen der Speisewasserregelung

a für Trommelkessel; b für Sulzer-Einrohrkessel für unterirdischen Druck; c für Bensonkessel

8. Speisewasserregelung

Die Speisewasserregelung hat als primäre Aufgabe den arbeitsmittelseitigen Zustand im Innern des Dampferzeugersystems innerhalb gewisser Grenzen zu halten. Daraus ergibt sich die besonders enge Verknüpfung dieser Regelung mit dem Arbeitsprinzip des Kessels. Das bezieht sich vor allem auf Art und Erfassung der benützten Regelgröße.

Am übersichtlichsten liegt der Fall bei den Trommelkesseltypen, also beim Naturumlauf- und Zwangsumlaufkessel. Dort sind nämlich vom Arbeitsprinzip her die Systemteile Vorwärmer-Verdampfer einerseits und Überhitzer andererseits eindeutig festgelegt und damit auch der Dampfzustand beim Übertritt vom einen in den andern (Sattedampf). Damit kann sich die Aufgabe für die Speisewasserregelung hier auf die Kontrolle des seiner Ausdehnung nach festgelegten Vorwärmer-Verdampfersystems beschränken.

Als Regelgröße drängt sich hier aus betrieblichen Gründen der Wasserstand in der Trommel auf. Das Wasserstandssignal führt im Normalfall eine Durchflussregelung (Kaskadenschaltung), wobei meist noch der Frischdampfstrom im Sinne der Störgrössenaufschaltung als Hilfsgröße herangezogen wird (Fig. 17a).

Bei Zwangsdurchlaufkesseln kann diese Art der Regelung im allgemeinen nicht angewendet werden, da hier die Trommel als örtlicher Fixpunkt für den Übergang vom Verdampfer zum Überhitzer fehlt. Indessen steht der Sulzer-Einrohrkessel mit Wasserabscheider (für unterkritischen Dampfdruck) diesem Fall noch ziemlich nahe, da hier der erwähnte Wasserabscheider diese Fixierung des Überhitzungsbeginns vornimmt. Als Hauptregelsignal wird hier indes aus regeldynamischen Gründen meist die Dampftemperatur am Austritt des sog. Leitstrangs vorgezogen, der schwach überhitzten Dampf erzeugt. Im übrigen werden hier wiederum Kaskadenregelung und Störgrössenaufschaltung des Dampfstroms angewendet (Fig. 17b). Wird unabhängig von der Kessellast eine konstante Restfeuchte vor dem Abscheider gewünscht, so wird der Sollwert des Reglers 1 noch in Abhängigkeit vom Verhältnis Abschlämmstrom zum Dampfstrom (\dot{M}_A/\dot{M}_D) angepasst (weitere Regelkaskade).

Zwangsdurchlaufkessel ohne Wasserabscheider (Bensonkessel, Sulzerkessel für überkritischen Druck) werden im allgemeinen mit verschieblichem Überhitzungsanfangspunkt betrieben bzw. dieser Punkt ist gar nicht mehr physikalisch definiert (bei überkritischem Druck). Es werden dann verschiedene Hauptregelgrößen benützt, wie eine Zwischentemperatur im ersten Überhitzerteil, das Verhältnis Einspritz-

wasserstrom/Speisewasserstrom (\dot{M}_E/\dot{M}_W) oder neuerdings die Temperaturdifferenz $\Delta\theta$ vor und nach Einspritzstelle der Überhitzer-Temperaturregelung. Im letztern Fall wird dann meist noch eine Zwischentemperatur θ als Hilfsregelgröße zusätzlich herangezogen. Im übrigen weist aber die Regelschaltung wiederum denselben prinzipiellen Aufbau auf wie die früher besprochenen (Fig. 17c).

9. Verbrennungsregelung

Die Aufgabe dieser Regelung besteht, etwas vereinfacht ausgedrückt, im Einhalten eines bestimmten, aus wärme- und feuerungstechnischen Bedingungen sich ergebenden Luftüberschusses λ bei der Verbrennung. Regelungstechnisch gesehen, bedeutet das die fortlaufende Anpassung der Luftzufuhr an den Brennstoffstrom.

Diese Aufgabe ist relativ einfach, solange dies gleichbedeutend damit ist, ein bestimmtes Verhältnis von Luftstrom zu Brennstoffstrom (\dot{M}_L/\dot{M}_B) aufrechtzuerhalten. Dieses Verhältnis kann dann unmittelbar als Regelgröße dienen, wenn eine hinreichend genaue Messung von \dot{M}_B möglich ist (für den Luftstrom dürfte dies immer zutreffen). Das führt dann zu Regelschaltungen von der in Fig. 18a gezeigten Art. Hierbei wird der Luftstromregler R_L vom Signal w des Verhältnissreglers R_V geführt (Kaskadenschaltung). Das gewünschte Verhältnis \dot{M}_L/\dot{M}_B wird am Regler R_V als Sollwert eingestellt. — Dieses Regelprinzip wird besonders bei Öl- und Gasfeuerungen oft angewendet.

Namentlich bei festen Brennstoffen schwankt dagegen der spezifische Luftbedarf \dot{M}_L/\dot{M}_B laufend beträchtlich und kann dann nicht mehr als Regelgröße benützt werden. Dazu kommt meist gleichzeitig die Schwierigkeit der zuverlässigen Messung des Brennstoffstromes. Hier benützt man nun vielfach die Tatsache, dass zwischen spezifischem Luftbedarf und Heizwert ein praktisch linearer Zusammenhang besteht. Damit wird der Luftbedarf mit guter Näherung der Dampferzeugung (\dot{M}_D) des Kessels proportional (der Kessel dient als Kalorimeter), und als Ersatzregelgröße kann daher das Verhältnis Luftstrom/Dampfstrom (\dot{M}_L/\dot{M}_D) herangezogen werden. Das entsprechende Regelschema zeigt Fig. 18b.

Eine grundsätzlich andere Art der Bildung einer mit der Luftüberschusszahl λ zusammenhängenden Regelgröße ist durch die Rauchgasanalyse gegeben. Insbesondere der Restsauerstoffgehalt im Rauchgas kann als brauchbares Mass für λ dienen. Die entsprechende Grundschaltung der Regelung zeigt Fig. 18c. Sie ist für beliebige Brennstoffe anwendbar.

10. Rauchgasdruckregelung

Eine Rauchgasdruckregelung ist immer dann notwendig, wenn die Kesselwände nicht gasdicht ausgeführt sind, was in

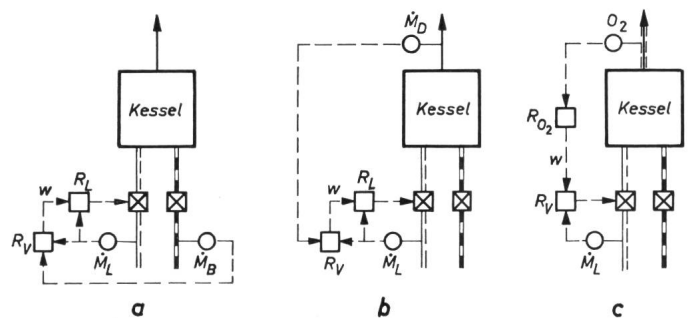


Fig. 18

Beispiele von Grundschaltungen der Verbrennungsregelung

Erläuterungen siehe im Text

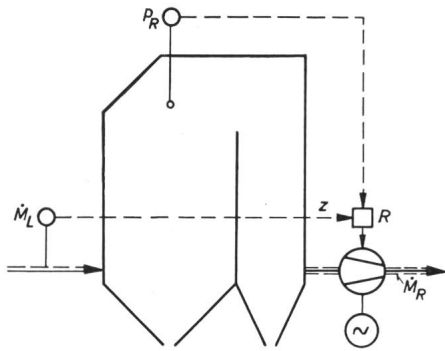


Fig. 19

Beispiel der Grundschialtung einer Rauchgasdruckregelung

Europa vorwiegend der Fall ist. Dann muss die Rauchgasabfuhr durch das Saugzuggebläse so geregelt werden, dass in allen rauchgasführenden Kesselteilen ein leichter Unterdruck gegenüber der Atmosphäre herrscht. Stellstrom ist mithin immer der Rauchgasstrom, wenn auch der Regeleingriff in sehr verschiedener Weise erfolgt, z. B. auf die Drehzahl oder Schaufelstellung des Gebläses, auf Klappen usw. Regelgrösse ist der Gasdruck an einer geeigneten Stelle der Brennkammer. Bei schnellen Laständerungen kann eine Störgrössenaufschaltung etwa vom Luftstrom her vorteilhaft sein (Fig. 19).

Die *Gesamtregelschialtung* einer Anlage ergibt sich nun durch Zusammenfügen der besprochenen Einzelschemata. Fig. 20 zeigt dafür zwei Beispiele. Natürlich handelt es sich auch hier immer nur um Grundschialtungen; die detaillierte Darstellung wäre wesentlich komplizierter und hätte auch die zahlreichen Regelkreise für untergeordnete Regelaufgaben zu berücksichtigen, auf die hier nicht eingegangen werden kann.

11. Änderung des Betriebszustandes

Es wurde bereits in der Einleitung darauf hingewiesen, dass bei grossen Laständerungen, beim An- und Abfahren und bei Betriebsstörungen *Eingriffe in den Schaltzustand* der Anlage und damit in die Betriebsstruktur notwendig werden, gegebenenfalls parallel zur Wirkung der im vorangehenden Abschnitt beschriebenen Regelungen. Zu solchen Eingriffen kann auch das Verändern der Sollwerte dieser Regelungen gehören. Normalerweise werden diese Schalt- bzw. Führungsoperationen heute noch von Hand ausgelöst, wenn auch unter Zuhilfenahme von Steuerungen (vgl. Fig. 2).

Voraussetzung für ein zweckmässiges Eingreifen ist, dass das Wartpersonal in jeder Situation den vollen Überblick über den augenblicklichen Betriebszustand und die Tendenzen seiner Weiterentwicklung hat. An das *Erfassen* der Betriebs-

situation hat dann das *Überlegen* der zu treffenden Massnahmen und ihrer Reihenfolge sich anzuschliessen, eventuell im Sinne einer Auswahl unter mehreren möglichen Varianten. Nach gefasstem Entschluss sind endlich die nötigen Schalt- und Führungseingriffe vorzunehmen und ihre Auswirkungen zu kontrollieren, womit wieder ein neuer, im Prinzip gleicher Kontrollprozess einsetzt usw. Hierbei sind die zu beurteilenden Situationen oft recht komplex, und gleichzeitig müssen die Entscheide mit Sorgfalt und Umsicht getroffen werden, auch wenn dies gelegentlich unter Zeitdruck zu geschehen hat.

Man muss sich darüber im klaren sein, dass jedem Bedienungsmann infolge momentaner Überforderung durch sich überstürzende Betriebsereignisse, aber auch nur infolge vorübergehenden Nachlassens der Aufmerksamkeit, versagenden Gedächtnisses, Ermüdung oder Unwohlseins gelegentlich *Fehler* unterlaufen. Die absolute Forderung nach dauernd fehlerfreiem Verhalten ist zweifellos unrealistisch. Nun ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein solches Versagen gerade auf einen kritischen Moment fällt und damit zu einer Betriebsstörung oder gar zu einem Betriebschaden führt, zwar nicht gross. Meist bewirken solche Fehler nur kleinere oder grössere Abweichungen von der wirtschaftlichsten Fahrweise und äussern sich dann vor allem in erhöhten Energieverlusten. Aber angesichts der wachsenden Einheitsleistungen wiegt die einfach nicht auszuschliessende Möglichkeit schlimmer Folgen menschlichen Versagens immer schwerer.

Diese und andere Überlegungen haben in jüngster Zeit die Entwicklung eingeleitet, den Menschen auch von den *logischen Schlüssen und Entscheidungen* zu entlasten, die mit den erwähnten Schalt- und Führungseingriffen verbunden sind, und damit letztlich die Vollautomatisierung des Dampfkraftwerkes anzustreben.

Die Aufgaben, die der entsprechenden Automatik damit zufallen, sind summarisch bereits umschrieben worden. Sie sind in jedem Falle ausserordentlich komplex und umfangreich, ganz besonders bei kohlegefeuerten Anlagen. Das möge durch ein Beispiel illustriert werden, das einen kleinen Ausschnitt aus dem Anfahrprogramm — den Start einer Strahlwasserpumpe — wiedergibt (Fig. 21).

Eine solche weitere Automatisierung kann nun auf verschiedene Weise und in verschiedenem Ausmass durchgeführt werden. Entsprechend sind auch die Aufwendungen dafür recht unterschiedlich.

Hinsichtlich des Arbeitsprinzips stehen heute in Europa zwei Gerätebauarten in Konkurrenz: der speicherprogrammierte *Digitalrechner* und das strukturprogrammierte *Sequenzschaltwerk*.

Beide haben Vorzüge und Nachteile, die hier im einzelnen nicht erörtert werden können. Besondere Vorteile des Digitalrechners sind wohl seine hohe Genauigkeit und seine Universalität, die jederzeit erlaubt, das Programm zu ändern. Andererseits sind die aufzuwendenden Minimalkosten beträchtlich, so dass sich nur ein grösserer Schritt in Richtung Vollauto-

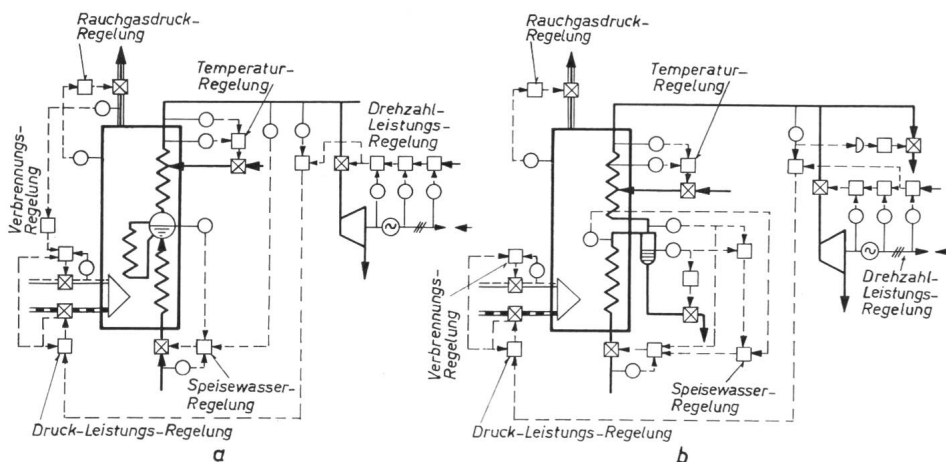


Fig. 20

Zwei Beispiele von Gesamtschialtungen
a für Trommelkessel;
b für Sulzer-Einrohrkessel

Fig. 21
**Programm des Starts einer Strahlwasser-
 pumpe [7]**

matisierung lohnen dürfte. Umgekehrt liegt gerade ein Vorzug des Folgeschaltwerks darin, dass es auch in Einheiten geringer Kapazität preiswert angeboten werden kann, wodurch die Möglichkeit der teilweisen bzw. schrittweisen Automatisierung gegeben ist. Eine solche Aufteilung in mehrere Automateinheiten kommt im übrigen auch der aus programmertechnischen Gründen erhobenen Forderung entgegen, funktionell getrennte Prozessbereiche durch die Automatik nicht unnötig zu verknüpfen.

In jedem Falle ist die *Programmierung* solcher Automaten eine erhebliche Arbeit, da ja alle Operationen im voraus durchgedacht werden müssen, und zwar muss dies in *betriebsnaher Weise* erfolgen. Daher ist hier eine enge Zusammenarbeit von Automatikspezialisten, Kraftwerkbauern und Betreibern dringend erwünscht.

Je nach dem Grad der Automatisierung wird das Wartepersonal noch als aktives Glied im Informationsfluss verbleiben oder der Kreis wird durch die Automatik ganz geschlossen. Dem entsprechen die zwei in Fig. 22 gezeigten Grundschaltungen.

Natürlich besteht die Möglichkeit, diese Automatik auch für den Normalbetrieb einzusetzen. Abgesehen von der Datenverarbeitung, kann sie insbesondere auch zur optimalen Führung der im vorigen Abschnitt beschriebenen Regelungen herangezogen werden. Dies kann dabei so geschehen, dass die Regeleinrichtungen (subloops) in herkömmlicher Weise ausgeführt werden (also analog arbeiten) und der Prozessrechner lediglich die Werte der Führungsgrößen bestimmt. Es besteht aber auch die Möglichkeit, auch die von den Reglern durchzuführenden Rechenoperationen dem Prozessrechner zu überbinden. In diesem Falle verschwinden die «subloops» (Fig. 23), womit allerdings praktisch zugleich die Möglichkeit entfällt, die Anlage ohne den Rechner zu betreiben.

Eines der schwierigsten Probleme in diesem Zusammenhang ist aber nicht ein technisches, sondern ein wirtschaftliches: nämlich die Frage nach dem im Einzelfall *gerechtfertigten* Grad der Automatisierung. Da man mit der Automatisierung der Struktureingriffe noch weitgehend am Anfang

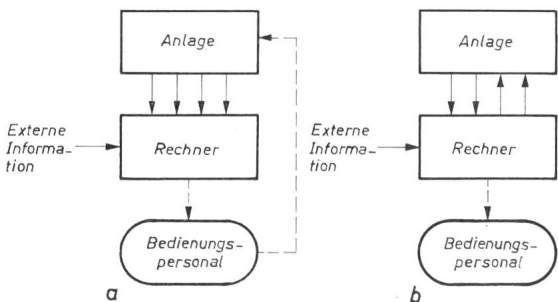
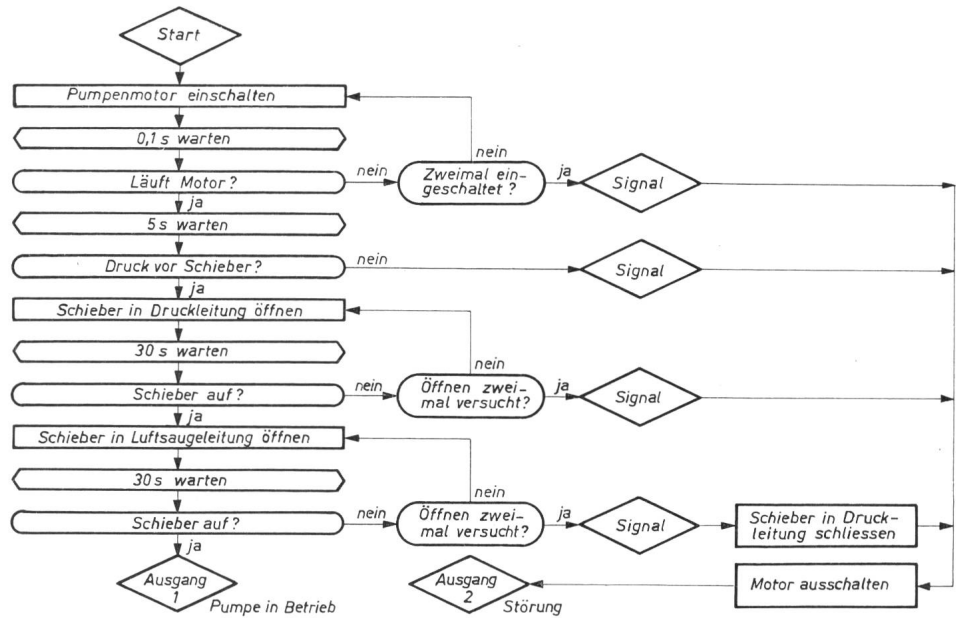


Fig. 22

Grundschaltungen der Automatisierung eines Dampfkraftwerkes
 a Open Loop-System; b Closed Loop-System



steht und eine grössere Zahl von zum Teil inkommensurablen Faktoren bestimmd mitwirken, lassen die heute vorliegenden Erfahrungen noch kein klares Bild über diese Fragen gewinnen. Vielmehr ist hier noch sehr viel Arbeit zu leisten, wobei die verständnisvolle *Mithilfe des Betreibers* der Anlagen von ganz besonderer Bedeutung ist. Jeder Einzelfall verlangt heute noch umfangreiche Voruntersuchungen und eine sorgfältige Planung, und gelegentliche Schwierigkeiten und Enttäuschungen werden nicht ganz zu vermeiden sein. Das alles wird aber zweifellos die nun angelaufene Entwicklung zur weitergehenden Automatisierung des Dampfkraftwerkes nicht verhindern.

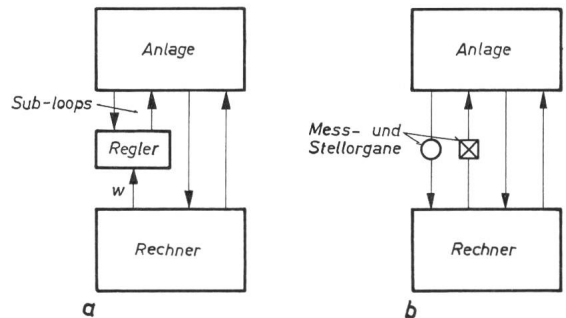


Fig. 23

Möglichkeiten der Einschaltung eines Prozessrechners im Zusammenhang mit der Regelung eines Dampfkraftwerkes

Literatur

- [1] E. J. Burdick und T. J. Glass: Aufgabe und Wirtschaftlichkeit von digitalen Rechenmaschinen bei der Automatisierung von Dampfkraftwerken. *Regelungstechnik* 12(1964)1, S. 1...7.
- [2] U. Cleve und U. Sauerbeck: Automatisierung in Wärmekraftwerken. *Brown Boveri Mitt.* 51(1964)3, S. 121...130.
- [3] D. Ernst: Entwicklungsbeiträge zur Automatisierung in der Energieversorgung. *Siemens Z.* 39(1965)5, S. 473...483.
- [4] W. Friedewald: Überwachung von Dampfkraftwerkblocks durch das Siemens-Prozessleitsystem. *Siemens Z.* 38(1964)1, S. 3...7.
- [5] H. Kruse: Einsatz elektronischer Prozessrechenanlagen in Dampfkraftwerken. *Brennstoff, Wärme, Kraft* 16(1964)5, S. 234...240.
- [6] P. Profos: Die Regelung von Dampfanlagen. Berlin, Springer 1962.
- [7] R. Quack: Automatisierung in Dampfkraftwerken. *Brennstoff, Wärme, Kraft* 15(1963)2, S. 53...61.
- [8] K. Reiske: Das automatische Kraftwerk. *Siemens Z.* 38(1964)3, S. 125...129.
- [9] H. Zwet: Rechenautomaten in amerikanischen Dampfkraftwerken. *Brennstoff, Wärme, Kraft* 15(1963)2, S. 62...65.

Adresse des Autors:

Prof. Dr. P. Profos, Vorstand des Institutes für Regelung und Dampfanlagen an der ETH, Sonneggstrasse 3, 8006 Zürich.