Grundlagen der Regelungstechnik und ihrer Anwendung auf dem Gebiet des Maschinen-Ingenieurwesens: Einführungsvortrag

Autor(en): **Kägi, J.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **75 (1957)**

Heft 34

PDF erstellt am: **24.04.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-63406

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Grundlagen der Regelungstechnik und ihrer Anwendung auf dem Gebiet des Maschinen-Ingenieurwesens

DK 621-53

Einführungsvortrag, gehalten in der Schweiz. Gesellschaft für Automatik am 7. Dez. 1956 an der ETH

von Dipl. Ing. **J. Kägi**, Winterthur

Der Vortrag lehnt sich in seinem Aufbau an den einführenden Teil der entsprechenden Vorlesung «Grundlagen der automatischen Regelung» an, die Dr. P. Profos an der ETH für die Abt. IIIA und XII hält. Der Zielsetzung dieser Tagung Rechnung tragend, soll der Vortrag den Charakter einer Einführung haben. An einfachen Beispielen werden einige wesentliche Grundbegriffe erläutert. Anschliessend folgen einige gerätetechnische Ausführungen verschiedener Regelapparate, und als Abschluss wird anhand von Blockschaltbildern das Gemeinsame von Regelungen verschiedenster Art gezeigt und auf die allgemeinen Berechnungsmöglichkeiten dieser Systeme hingewiesen.

1. Grundbegriffe

Die Aufgabe einer Regelung besteht darin, bestimmte Grössen *(Regelgrössen)* auf einen verlangten Wert *(Sollwert)* zu bringen und möglichst konstant zu halten. Die Regelgrössen sind an und für sich veränderlich und abhängig von *Störgrössen.* So bildet die Drehzahl einer Dampfturbine eine Regelgrösse, welche zum Beispiel mit Rücksicht auf die Frequenzhaltung in einem Wechselstromnetz konstant gehalten werden muss. Die Störgrösse bildet in diesem Fall die wechselnde, vom Netz verlangte Belastung des Generators, unter deren Einfluss die Turbine das Bestreben hat, ihre Drehzahl zu ändern. Als weiteres Beispiel könnte ein Dampfnetz erwähnt werden, dessen Druck auf einem bestimmten Wert gehalten werden soll, wobei die Dampfentnahme aus diesem Netz sich verändert und als Störgrösse wirkt.

In Bild 1 ist zur Erläuterung der Begriffe das Schulbeispiel einer *Wasserstandsregelung* dargestellt. Die Regelgrösse ist gegeben durch den Wasserstand im Behälter; Störgrösse ist die Abflussmenge, welche sich entsprechend dem geforderten Verbrauch verändert. Es ist ohne weiteres ersichtlich, dass im Beharrungszustand die Zuflussmenge gleich der Abflussmenge sein muss. Jede Aenderung der Abflussmenge allein führt zu einem Auslaufen bzw. Ueberfluten des Behälters. Die Zuflussmenge muss daher durch die Regeleinrichtung entsprechend der Abflussmenge eingestellt werden; sie wird aus diesem Grund mit *Stellgrösse* bezeichnet. Die Wirkungsweise des einfachen Niveaureglers, welcher eine Drosselklappe direkt verstellt, ist ohne weiteres ersichtlich. Der Regler erfüllt seine Aufgabe mittels seines Schwimmers, der den Wasserstand fortlaufend misst und auf die Drosselklappe im Zulauf überträgt. Man spricht von einem *Messort* — in diesem Falle ist er die Berührungsstelle des Schwimmers mit dem Wasser — und von einem *Stellort,* der in unserem Beispiel die eingebaute Drosselklappe ist. Die Regelgrösse wird von der Regeleinrichtung mit einer vorbestimmten *Leitgrösse* verglichen. Abweichungen der Regelgrösse von der Leitgrösse führen zu Aenderungen der Stellgrösse. Die Leitgrösse kann im vorliegenden Fall mittels Handrad und Spindel verstellt werden. Man sieht ohne weiteres, dass je nach der Lage der Mutter gegenüber der Spindel der Wasserstand im Beharrungszustand einen anderen Wert annimmt. Auf einer an der Spindel angebrachten Skala kann auf Grund von Versuchen eine Einteilung angebracht werden, die die Wasserstände im Beharrungszustand anzeigt.

In der Regelungstechnik ist es üblich, ein vorliegendes System aufzuteilen in die *geregelte Anlage,* die auch als *Regelstrecke* bezeichnet wird und den *Regler* oder die *Regeleinrichtung.* Die Abgrenzung der geregelten Anlage gegenüber der Regeleinrichtung ist gegeben durch Stellort und Messort; im übrigen werden alle Teile zur geregelten Anlage gerechnet, welche bei einer Aenderung der Störgrösse die Regelgrösse beeinflussen. Jede Regelung bildet einen geschlossenen Kreis, in dem sich Wirkungen in einer eindeutig bestimmten Richtung fortpflanzen. In unserem Beispiel wandern Störungen vom Schwimmer entsprechend der Pfeilrichtung gegen den Stellort und von dort in Form einer geänderten Zuflussmenge, welche sich wiederum in einer Wasserstandsänderung ausdrückt, zurück gegen den Schwimmer hin.

Man kann diese Zusammenhänge in abstrakter Weise in einem sogenannten *Blockschaltbild,* wie es Bild 2 zeigt, darstellen. Die geregelte Anlage und der Regler sind durch Kästchen dargestellt, welche durch Linienzüge im Sinne der Wirkungsrichtung verbunden werden. Aus diesem Blockschaltbild geht der Charakter des geschlossenen Kreises deutlich hervor. Eingang und Ausgang der geregelten Anlage werden durch Stellort und Messort an dem Kästchen der geregelten Anlage dargestellt. Den Wirkungssinn der Störgrösse

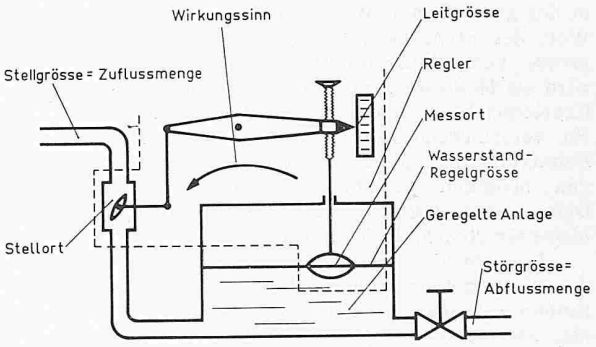

Bild 1. Wasserstandsregelung als Beispiel eines einfachen Regelkreises.

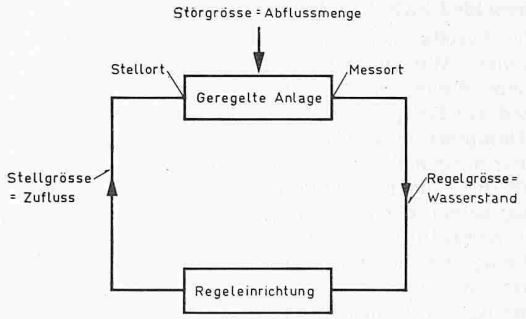

Bild 2. Blockschaltbild.

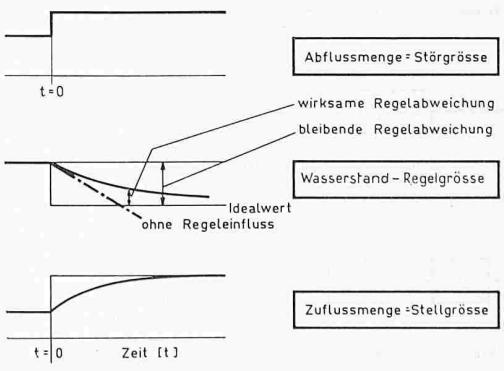

Bild 3. Diagramm zur Verdeutlichung der Regelwirkung.

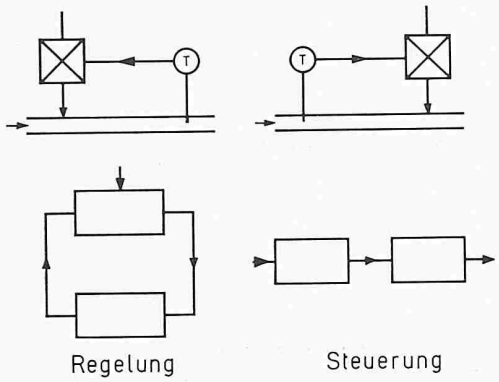

Bild 4. Unterschied Regelung — Steuerung am Beispiel einer Einspritzkühlung.

auf die geregelte Anlage vermerkt man durch einen Pfeil auf dem Kästchen.

Bild 3 zeigt anhand eines einfachen Diagrammes die *Regelwirkung*. Zur Zeit $t = 0$ wird die Abflussmenge um einen bestimmten kleinen Betrag vergrössert. Es ist ohne weiteres ersichtlich, dass der Wasserstand sich ohne Eingriff des Reglers entsprechend der strichpunktierten Geraden absenken würde. Der Regler begrenzt diese Absenkung auf einen bestimmten, einstellbaren Betrag. Die Zuflussmenge ändert sich in der gezeichneten Weise und nähert sich asymptotisch dem Wert der Störgrösse. Die bleibende Abweichung der Regelgrösse vom Beharrungswert vor der Störgrössenänderung wird als *bleibende Regelabweichung* bezeichnet. Die skizzierte Regeleinrichtung kann ihre Aufgabe nur erfüllen, wenn sie für verschiedene Abflussmengen kleine Abweichungen vom Beharrungswert zulässt; verschiedene Drosselklappenstellungen bedingen ja entsprechende Wasserstandsänderungen. Demgegenüber gibt es Regeleinrichtungen, bei denen *keine bleibende Regelabweichung* auftritt.

Der jeweilige neue Beharrungszustand der Regelgrösse, den die Regelung nach einer Störung im Idealfall, also ohne Reibungseinflüsse usw. einstellt, wird als *Idealwert* bezeichnet, der momentane effektive Wert der Regelgrösse als *Ist-Wert*. Der Unterschied zwischen Ist-Wert und Idealwert stellt die *wirksame Regelabweichung* dar. Der eingestellte Wert der Leitgrösse heisst *Einstellwert*.

2. Unterschied zwischen Regelung und Steuerung

Wie bereits erwähnt, ist die Regelung durch den geschlossenen Wirkungskreis gekennzeichnet. Demgegenüber bildet eine Steuerung *eine offene Kette*. Bild 4 zeigt den Unterschied am Beispiel der Einspritzkühlung eines Dampfstromes. Links ist eine echte Regelung dargestellt. Der Temperaturfühler verstellt die Einspritzmenge und erhält die Meldung seiner eigenen Wirkung in Form einer Temperaturänderung des Dampfstromes. Demgegenüber wird auf der rechten Bildseite die Einspritzmenge entsprechend der jeweiligen Dampftemperatur *gesteuert*. Der Temperaturfühler erfährt nie etwas von den Auswirkungen seiner Befehle ans Einspritzventil. Die beiden Blockschaltbilder zeigen den geschlossenen Wirkungskreis links und die offene Kette rechts, welche den erwähnten Tatsachen entsprechen. Man erkennt leicht, dass Regelung und Steuerung nicht die gleiche Wirkung haben. So hält zum Beispiel die Regelung die Dampftemperatur *nach* der Einspritzstelle konstant, unabhängig von der durchfliessenden Dampfmenge. Hingegen wird durch die Steuerung einer bestimmten Temperaturänderung einfach eine bestimmte Einspritzmengenänderung zugeordnet, ohne Rücksicht auf die durchfliessende Dampfmenge. Die Steuerung kann eine Erhöhung der Dampftemperatur vor der Einspritzstelle nur bei einer bestimmten Dampfmenge ausgleichen. Für alle anderen Durchflussmengen spritzt sie falsch ein, das heisst zu wenig oder zu viel.

3. Klassifikation der Regler

In erster Linie wird unterschieden zwischen Handregelung und automatischer Regelung. Die Zukunft wird zweifellos der zweiten gehören, während Handregelungen, bei denen also der Mensch als Regler wirkt, mehr und mehr zurücktreten.

Die automatische Regelung kann wiederum unterteilt werden in *stetige* und *unstetige* Regelung. Bei der erstgenannten wird die Regelgrösse kontinuierlich gemessen und die Stellgrösse ebenfalls kontinuierlich verändert. Im Unterschied dazu arbeitet die unstetige Regelung nicht kontinuierlich. Die Regeleinrichtung spricht zum Beispiel nur an, wenn die Regelgrösse einen bestimmten maximalen bzw. minimalen Wert übersteigt, wie das beim *Zweipunktregler* der Fall ist. Ausser diesem gibt es noch einige andere Abarten unstetiger Regler; im folgenden wollen wir uns jedoch vorwiegend mit stetigen Regelungen befassen. Diese kann man wiederum in *direkte* und *indirekte Regelungen* unterteilen. Der beschriebene Wasserstandsregler stellt eine direkte Regelung dar, die dadurch gekennzeichnet ist, dass die Messgrösse direkt das Stellglied betätigt. Demgegenüber arbeitet die indirekte Regelung mit verschiedenen Zwischengliedern, wie dies im Blockschaltbild 5 dargestellt ist. Im Sinne der Wirkungsrichtung weist sie im wesentlichen folgende Glieder auf: Das *Messorgan* misst die Regelgrösse und formt sie möglicherweise auf eine andere physikalische Grösse um. Diese wird in ein *Vergleichsorgan* gebracht und mit dem eingestellten Sollwert der Leitgrösse verglichen. Am Ausgang des Vergleichsorgans erscheint eine Grösse, welche der Abweichung der momentanen Regelgrösse von der Leitgrösse entspricht. Diese Ausgangsgrösse kann in einem *Korrekturorgan* umgeformt werden. So wird zum Beispiel das Integral oder die Ableitung der momentanen Regelabweichung gebildet. Diese umgeformte Grösse gelangt in ein *Verstärkerorgan*, welches dazu dient, die verfügbare Energie für die Bedienung des Stellorganes zu liefern; diese ist im allgemeinen am Ausgang der bisher erwähnten Organe nicht verfügbar. Den Schluss bildet das Stellorgan, welches die Stellgrösse verändert.

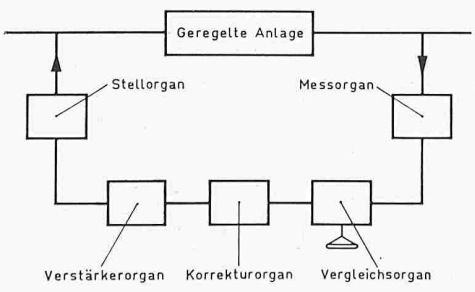

Bild 5. Die Regelkreisglieder einer indirekten Regelung.

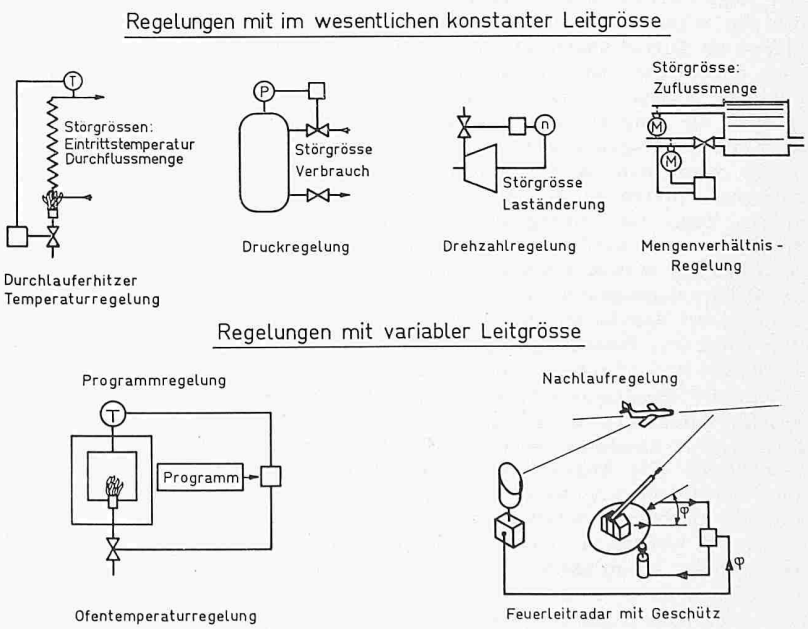

Bild 6. Beispiele von Regelungen.

Die indirekten Regelungen können weiter unterteilt werden in solche mit *konstanter* und solche mit *variabler Leitgrösse*. Bild 6 zeigt entsprechende Beispiele. Nachstehend sei auf einige Regelungen mit konstanter Leitgrösse hingewiesen:

Beim Durchlauferhitzer, bei dem die Endtemperatur geregelt wird, stellen Durchflussmenge und Eintrittstemperatur die Störgrössen dar. Regelgrösse ist die Endtemperatur und Stellgrösse die Heizleistung.

Die Druckregelung in einem Behälter weist als Störgrösse den Verbrauch auf, während der Druck im Behälter die Regelgrösse darstellt. Stellgrösse ist der Zufluss zum Behälter.

Bei der *Drehzahlregelung* der Turbine besteht die Störgrösse in Laständerungen, Regelgrösse ist die Drehzahl, Stellgrösse die Frischdampfmenge. Am Beispiel der Dampfturbine kann der Begriff der geregelten Anlage übrigens gut veranschaulicht werden. Von der Regeleinrichtung wird sie abgegrenzt durch den Messort, in diesem Fall durch den Drehzahlregler, und den Stellort, also die Regelventile. Die geregelte Anlage umfasst aber auch die Rückwirkungen des elektrischen Netzes über den Generator auf die Turbine. Solche Rückwirkungen beeinflussen den Regelvorgang wesentlich und sind daher unter den Begriff der Regelstrecke zu stellen.

Bei der *Mengenverhältnisregelung* schliesslich wird das Verhältnis durch Zuflussmengenänderungen gestört.

Alle diese Beispiele weisen im wesentlichen konstante Leitgrössen auf. Die Störgrössen beeinflussen vorwiegend den Beharrungszustand der Regelung. Bei Regelungen mit veränderlicher Leitgrösse tritt diese selbst als Hauptstörung auf. Die dargestellte Ofentemperatur-Regelung ist das Beispiel einer sogenannten *Programmregelung,* bei der die Leitgrösse, also die gewünschte Ofentemperatur, nach einem ganz bestimmten Programm verstellt wird.

Die *Nachlaufregelung* arbeitet mit einer Leitgrösse, die in unvorhergesehener Weise ändert. Im angeführten System ist die Leitgrösse gegeben durch die Flugzeugposition, welche durch ein Feuerleit-Radargerät erfasst und ans Geschütz weitergegeben wird. Die Nachlaufregelung am Geschütz sorgt nun dafür, dass die Regelgrösse, zum Beispiel das Azimut φ des Geschützrohres, mit dem vom Feuerleitgerät übermittelten Einstellwert übereinstimmt.

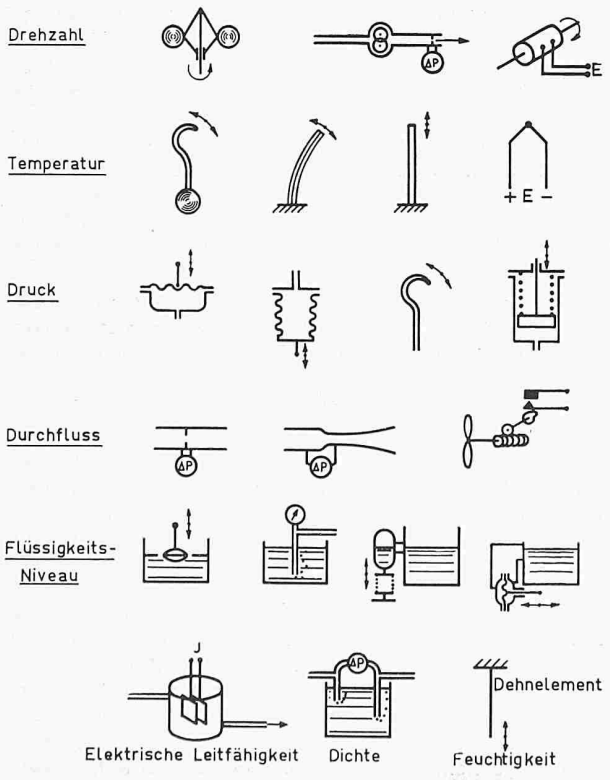

Bild 7. Messorgane

4. Grundsätzlicher Aufbau eines Reglers — gerätetechnische Beispiele

Wir kehren zu Bild 5 zurück und beginnen mit der Beschreibung der einzelnen Organe einer indirekten Regelung, welche im wesentlichen sind: Messorgan, Vergleichsorgan, Korrekturorgan, Verstärkerorgan und Stellorgan mit Rückführung.

a) Messorgane

Das Messorgan hat die Aufgabe, die Regelgrösse kontinuierlich zu messen und einen entsprechenden Impuls weiterzuleiten. Die zu messenden physikalischen Grössen können verschiedenster Natur sein. Bild 7 gibt eine kleine Auswahl aus der Vielzahl der zu messenden Grössen und der entsprechenden anwendbaren Messorgane.

Die Drehzahl kann gemessen werden durch das klassische Fliehkraftpendel oder etwa durch eine Zahnradpumpe, deren Fördermenge über eine Blende abströmt, wobei sich der Druckabfall an der Blende in Funktion der Pumpendrehzahl verändert. Als elektrisches Element kommt zum Beispiel der Messdynamo in Frage, dessen Drehzahl durch die erzeugte Spannung gemessen wird. *Temperaturen* können mittels Dampfthermometern, Bimetall-Streifen, Ausdehnungsstäben oder Thermoelementen gemessen werden. *Drücke* werden in Membran- oder Balgempfängern in entsprechende Längenänderungen umgewandelt; die selbe Wirkung weisen Bourdonrohre bzw. Kolbenempfänger auf. *Durchflussmengen* können durch Druckabfall an Blenden oder Venturirohren gemessen werden. Der Messflügel passt seine Drehzahl der jeweiligen Durchflussmenge an. Die Drehzahl kann wiederum umgeformt werden in eine entsprechende Folge von elektrischen Impulsen oder auch in die Spannung eines Messdynamos.

Flüssigkeitsstände lassen sich durch klassische Schwimmer messen. Eine pneumatische Messeinrichtung stellt das skizzierte Tauchrohr dar, bei dem der Manometerdruck dem jeweiligen statischen Druck am Tauchrohrende entspricht. Weiter kann der Wasserstand durch ein kommunizierendes Gefäss gemessen werden, dessen Gewicht sich entsprechend den Niveauänderungen verändert. Weiter kann natürlich ein Membran- bzw. Kolbendruckdifferenzempfänger dem gleichen Zwecke dienen.

Als Messgrösse tritt ferner oft die *spezifische elektrische Leitfähigkeit einer Flüssigkeit* auf, die gemessen wird durch den Strom, welcher bei Anlegen einer bestimmten Spannung durch zwei Elektroden in einer Flüssigkeit übertragen wird. Die *Dichte* kann durch eine Tauchrohranordnung nach Bild 7 gemessen werden. Die *Luftfeuchtigkeit* wird ähnlich wie die Temperatur durch ein Dehnelement — zum Beispiel ein Haar — in eine Längenänderung umgewandelt.

b) Vergleichsorgane

Die Vergleichsorgane haben die Aufgabe, den Ist-Wert der Regelgrösse bzw. die entsprechende Messgrösse mit dem eingestellten Wert der Leitgrösse zu vergleichen. Es handelt sich dabei zum Beispiel um den Vergleich von elektrischen Spannungen, von Kräften oder auch von Längenänderungen.

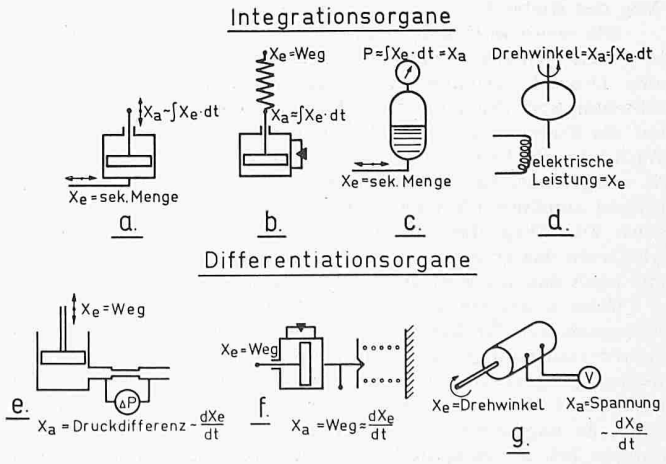

Bild 8. Elemente von Korrekturorganen

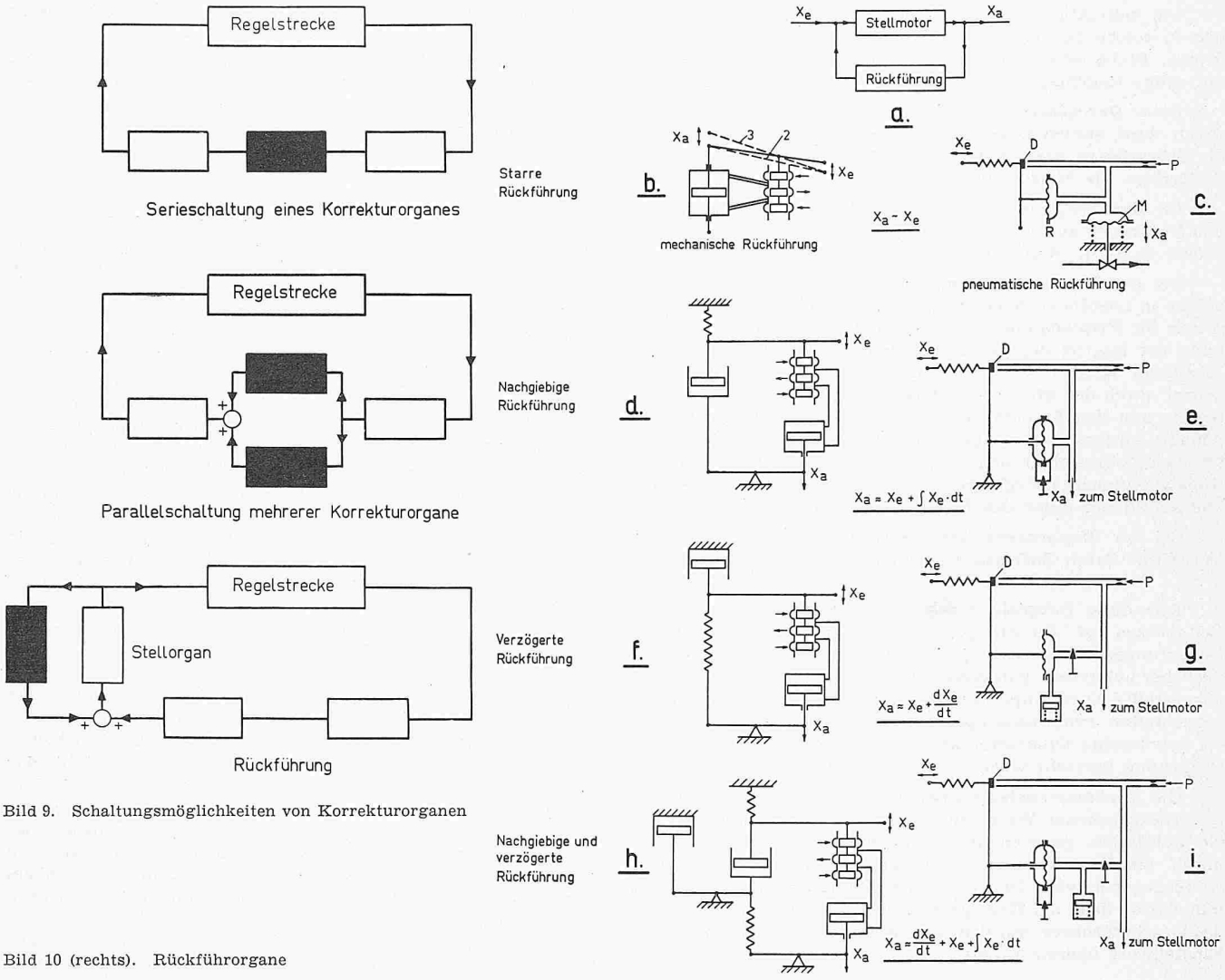

Bild 9. Schaltungsmöglichkeiten von Korrekturorganen

Bild 10 (rechts). Rückführorgane

c) Korrekturorgane

Die Korrekturorgane bestimmen weitgehend den Charakter einer Regeleinrichtung. Bild 8 zeigt einige wenige Beispiele. Vielfach angewendet werden sogenannte *Integrationsorgane*. Die Ausgangsgrösse dieser Vorrichtungen bildet dabei das zeitliche Integral der Eingangsgrösse. Diesen Zweck erfüllt ein Kolben in einem Zylinder, der durch eine bestimmte sekundliche Menge einer Flüssigkeit verdrängt wird. Die Verstellgeschwindigkeit des Kolbens ist proportional der zuströmenden Menge, dessen Stellung dementsprechend proportional zum Integral der Zuflussmenge. Einer konstanten Zuflussmenge entspricht ein linear mit der Zeit zunehmender Weg des Kolbens.

Ein weiteres Organ zeigt Bild 8b. Ein Kolben bewegt sich in einem Zylinder, wobei dessen Ober- und Unterseite durch eine Drossel verbunden sind. Einer bestimmten Verstellgeschwindigkeit des Kolbens entspricht eine konstante Kraft auf die Feder, entsprechend dem Druckabfall in der Drossel. Wird nun die Feder an ihrem oberen Ende um einen Betrag X_e ausgelenkt, so entspricht dem eine für kleine Wegänderungen annähernd konstante Verstellgeschwindigkeit des Kolbens. Der Weg des unteren Endes der Feder bildet somit wiederum das Integral dieser Verstellgeschwindigkeit und somit auch das Integral der Eingangsgrösse X_e.

Ganz allgemein kann gesagt werden, dass viele Korrekturorgane nur für kleine Störungen streng die mathematisch geforderten Bedingungen erfüllen. So ist zum Beispiel X_a nur solange proportional zum Integral der Eingangsgrösse, als die Federkraft, hervorgerufen durch eine Aenderung von X_e, konstant angenommen werden kann. Für grössere Auslenkungen bei X_a entspannt sich selbstverständlich die Feder, und der Kolben kommt zur Ruhe.

Bild 8c zeigt ein pneumatisches Integrationselement. In erster Näherung ist die Druckänderung im Gefäss proportional dem Integral der sekundlich zuströmenden Menge. Dabei ist der Zusammenhang nur für kleine Volumenänderungen im Druckgefäss richtig, nämlich nur solange, als sich die Volumen-Druckkurve des Gefässes noch durch die Tangente im Arbeitspunkt ausdrücken lässt. Wir werden später sehen, dass die gesamte lineare Regler-Theorie auf der Annahme kleiner Auslenkungen aufgebaut ist, wobei sämtliche Funktionen durch ihre Tangenten im betrachteten Beharrungspunkt ersetzt werden.

Bild 8d stellt schematisch einen *Ferraris-Motor* dar, dessen Drehgeschwindigkeit proportional ist zur zugeführten elektrischen Leistung. Der Drehwinkel als Ausgangsgrösse bildet dann das Integral der Winkelgeschwindigkeit und ist somit auch proportional zum Integral der zugeführten elektrischen Leistung.

Häufig wird verlangt, dass von einer physikalischen Grösse die Ableitung gebildet wird. In Bild 8e ist ein entsprechendes Element angedeutet. Ein Kolben fördert durch seine Bewegung eine Flüssigkeit oder ein Gas durch eine Laminardrossel. Einerseits ist der Druckabfall an dieser Drossel näherungsweise proportional zur durchströmenden Menge. Anderseits ist diese Durchflussmenge wiederum proportional zur Verstellgeschwindigkeit des Kolbens. Stellt man sich also vor, dass sich der Kolben mit konstanter Geschwindigkeit senkt, sein Weg sich also linear mit der Zeit verändert, so entsteht an der Drossel ein konstanter Druckabfall, der proportional zur Verstellgeschwindigkeit des Kolbens, also proportional zur Ableitung des Kolbenweges nach der Zeit ist.

Eine ähnliche Wirkung wird mit einer Vorrichtung entsprechend Bild 8f erreicht. Einer konstanten Verstellgeschwindigkeit des Kolbens in der Oelbremse entspricht eine konstante Kraft auf die Feder und damit eine entsprechende Auslenkung X_a derselben. Diese ist wiederum annähernd proportional zur zeitlichen Ableitung des Kolbenweges, sofern man nur kleine Ausschläge betrachtet. Beim Dynamo entsprechend Bild 8g ist die elektromotorische Kraft proportional der Winkelgeschwindigkeit des Rotors.

In Bild 9 sind noch einige grundsätzliche Schaltungsmöglichkeiten von Korrekturorganen dargestellt. Eine Lösung besteht in der Hintereinanderschaltung des Korrekturorgans zu den übrigen Regelkreisgliedern. Kombinationen von differenzierenden und integrierenden bzw. proportionalen Impulsen erhält man durch Parallelschaltung entsprechender Korrekturorgane. Die Ausgangsimpulse aus den Korrekturorganen werden einfach addiert. Oft werden auch Korrekturorgane, zum Beispiel in Verbindung mit dem Stellglied, in einen Nebenzweig des Regelkreises verlegt. Wenn dabei die Wirkungsrichtung im Nebenzweig derjenigen im Regelkreis entgegenläuft, spricht man von einer Rückführung.

d) Rückführorgane (Bild 10)

Die Rückführorgane sind eine besondere Ausführungsform von Korrekturorganen und werden im allgemeinen dazu verwendet, dem Regler eine ganz bestimmte Charakteristik zu geben. Bild 10a zeigt im Blockschaltbild die grundsätzliche Schaltungsweise. Die Rückführung wird oft parallel zu einem Stellglied geschaltet. Sie tastet den Ausgang des Stellgliedes ab und führt eine entsprechende Meldung an dessen Eingang zurück.

Bild 10b zeigt das einfache Beispiel einer *starren Rückführung*. Die Wirkungsweise geht aus den drei gezeichneten Stellungen des Rückführgestänges 1, 2 und 3 hervor. Der Servomotor ist nur in Beharrung, wenn der Steuerschieber die Oeffnungen für Druck- und Ablauföl verdeckt. Lenkt man den Steuerschieber um einen bestimmten Betrag entsprechend Stellung 2 aus, so setzt sich der Servomotor nach oben in Bewegung. Bei fehlender Rückführung würde er nun einfach in seine Endlage laufen. Daran wird er verhindert, indem der Steuerschieber in seine Beharrungslage entsprechend Stellung 3 zurückgeführt wird. Einer ganz bestimmten Auslenkung am Eingang entspricht also im Beharrungszustand eine dazu proportionale Auslenkung des Servomotors. Der Wirkungssinn in diesem kleinen «Regelkreis» ist wiederum eindeutig entsprechend dem eingezeichneten Pfeil.

Eine starre Rückführung kann auch durch das gezeichnete pneumatische System nach Bild 10c erreicht werden. Nach einer Auslenkung bei X_e steigt der Druck über der Membran M des Stellgliedes. Die Rückführmembrane R sorgt nun dafür, dass sich das Drosselkläppchen D wieder um einen bestimmten Betrag gegen seine Ausgangslage zurückverschiebt, wodurch sich die Auswirkung von X_a auf einen bestimmten einstellbaren Wert beschränkt.

Ausser dieser starren Rückführung, bei der Ausgangs- und Eingangsgrössen zueinander proportional sind, werden häufig *nachgiebige Rückführungen* verwendet, wie sie in den Bildern 10d und 10e dargestellt sind. Bild 10d zeigt eine *hydraulische Lösung des Problems*. Lenkt man das Gestänge um einen Betrag X_e aus, so bewegt sich im ersten Moment der Servomotor um den zu X_e proportionalen Betrag X_a. Die Anordnung verhält sich also momentan gleich wie eine starre Rückführung. Die Feder am Rückführgestänge wird dabei gespannt. Da diese nun auf den Kolben der Oelbremse eine Kraft ausübt, bewegt sich der Kolben für kleine Auslenkungen mit einer konstanten, einstellbaren Geschwindigkeit nach unten. Dementsprechend bewegt sich wiederum der Servomotor mit einer konstanten Geschwindigkeit entsprechend den Auslenkungen des Steuerschiebers. Die ganze Einrichtung hat somit ein proportional-integrales Verhalten.

Bild 10e zeigt eine entsprechende Einrichtung mit pneumatischen Elementen. Wiederum entspricht einer Auslenkung X_e, an der Feder zum Drosselkläppchen ein proportionaler Druckanstieg in der Leitung zum Servomotor. Durch den langsamen Druckausgleich an der Rückführmembrane wird das Drosselkläppchen gegen die Düse geführt, und der Druck in der Leitung zum Servomotor steigt linear mit der Zeit weiter an; die Neigung des Druckanstieges kann dabei durch Verstellen der Drosselschraube festgelegt werden.

Einen entgegengesetzten Effekt erhält man mit der sogenannten *verzögerten Rückführung* (Bilder 10f und 10e). Wie der Name besagt, greift die Rückführung erst nach einer gewissen Zeit in den Regelablauf ein; sie ist im ersten Moment nach der Störung unwirksam. Man kann anschaulich zeigen, dass diesen verzögerten Rückführungen ein proportional-differentiales Verhalten eigen ist. Beginnen wir einfachheitshalber mit unserem Gedankenexperiment am Ausgang des Systems und nehmen an, X_a sei um einen bestimmten konstanten Betrag aus seiner Beharrungslage ausgelenkt. Die gespannte Rückführfeder bewegt nun den Kolben im Bremszylinder im ersten Moment mit annähernd konstanter Geschwindigkeit nach oben. Damit der Steuerschieber und damit der Servomotorkolben ruhig stehen, muss also X_e mit einer konstanten Geschwindigkeit nach unten bewegt werden. Somit entspricht einer mit der Zeit linear sich ändernden Eingangsgrösse X_e eine konstante Ausgangsgrösse X_a, welche proportional zur Aenderungsgeschwindigkeit von X_e ist. Nach einer gewissen Zeit entspannt sich die Rückführung; der Bremskolben und damit X_e kommen zur Ruhe. Für grosse Zeiten entspricht also einer Auslenkung X_e eine proportionale Auslenkung X_a.

Das Gegenstück zur hydraulischen Ausführung stellt die daneben gezeigte pneumatische Einrichtung dar. Die Rückführung wird hier verzögert durch den Einbau einer Drosselschraube vor der Rückführmembrane und eines zusätzlichen Speichers, welcher erst aufgefüllt werden muss, bevor der steigende Druck vor dem Stellglied sich auf die Rückführmembrane auswirken kann.

Bilder 10h und 10i zeigen Kombinationen von verzögerter und nachgiebiger Rückführung. Solche Einrichtungen weisen ein sogenanntes proportional-integral-differentiales Verhalten auf; d. h. sie kombinieren alle drei grundsätzlichen Uebertragungsverhalten. Wie erwähnt können diese Verhaltensweisen auch durch Schaltungen der bereits früher beschriebenen Korrekturorgane erzeugt werden.

e) Schaltelemente

Bild 11 zeigt einige Beispiele von *kontinuierlichen Schaltern*. Diese haben die Aufgabe, mittels kleiner Energien ver-

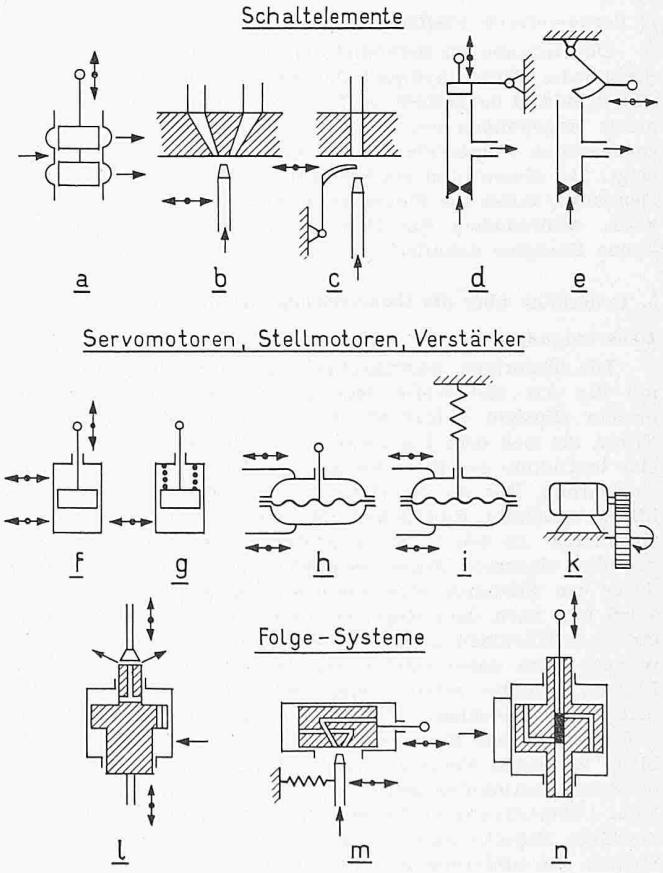

Bild 11. Schaltelemente, Servomotoren, Stellmotoren, Verstärker und Folgesysteme

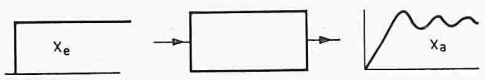

Bild 12. Uebergangsfunktion

hältnismässig viel grössere Energieströme zu steuern. Bild 11a zeigt einen hydraulischen Steuerschieber. Durch kleine Auslenkungen des entlasteten Schiebers, was an und für sich sehr kleine Energien erfordert, werden Querschnitte freigelegt, durch welche Flüssigkeiten unter sehr hohen Drücken ohne Rückwirkung auf den Schieber strömen können. Es gibt elektro-hydraulische Systeme dieser Art, bei denen der Steuerschieber durch einen Elektro-Magneten bedient wird. Dabei können mit einer Eingangsleistung von wenigen mW Ausgangsleistungen von mehreren kW gesteuert werden. Für die Bewegung der Schalter genügen oft die durch das Messorgan gelieferten Impulse. In extremen Fällen erfolgt eine Zwischenverstärkung.

Die Bilder 11b und 11c zeigen andere Ausführungsmöglichkeiten solcher hydraulischer Schalter, bei denen entweder ein vom Steuermedium durchströmtes Rohr vor zwei Oeffnungen bewegt oder der Strahl aus einer Düse durch einen Strahlablenker mehr oder weniger am Eintritt in eine Oeffnung verhindert wird. Mit diesen Systemen können ebenfalls mittels kleiner Energien zur Verstellung von Strahlrohr oder Strahlablenker grosse Energien gesteuert werden, indem der Staudruck des Oelstrahls an Servomotoren in entsprechende Verstellkräfte umgewandelt werden kann.

Zwei vorwiegend für pneumatische Systeme verwendete Schalter sind in den Bildern 11d und 11e dargestellt. Der Druckluftstrom aus einer Düse wird durch eine verstellbare Klappe oder einen Schieber mehr oder weniger gedrosselt; dadurch steigt der Druck im Raum vor der Klappe und nähert sich im Grenzwert dem Druck vor der gezeichneten Drossel in der Zuflussleitung an, indem der Druckabfall in dieser Drossel bei sinkender Durchflussmenge verschwindet. Der so erzeugte Druckanstieg im pneumatischen System kann zum Beispiel zur Betätigung eines Membranantriebs benützt werden.

f) Servomotoren, Stellmotoren, Verstärker

Die Aufgabe der Servomotoren liegt in der Bedienung des Stellgliedes. Einige hydraulische bzw. pneumatische Elemente sind in Bild 11 dargestellt. Auf ihre Wirkungsweise muss nicht näher eingegangen werden. Eine Sonderstellung nehmen die sogenannten Folgesysteme ein, wofür Bild 11 drei Beispiele zeigt. Bei diesen folgt ein Element der Bewegung des Steuerelementes, wobei das Folgesystem beträchtliche Arbeit leisten kann, währenddem die Betätigung des Steuerorgans nur kleine Energien erfordert.

5. Ueberblick über die theoretischen Grundlagen

Uebertragungsverhalten

Die bisherigen Ausführungen befassten sich vorwiegend mit der Art und Weise, wie eine Regelung in gerätetechnischer Hinsicht aufgebaut werden kann. Die wesentliche Frage, die sich dem Ingenieur nun stellt, heisst: wie arbeitet eine bestimmte geregelte Anlage mit einer bestimmten Regeleinrichtung. Für die Beurteilung dieses Problems bietet das öfters erwähnte Blockschaltbild eine äusserst vorteilhafte Grundlage. In den bisher gezeigten Blockschaltbildern wurden die einzelnen Regelkreisglieder und deren Wirkungen durch ein Kästchen ohne besondere Anschrift symbolisiert. Wird nun nach dem Regelverhalten gefragt, so müssen die einzelnen Kästchen entsprechend ihrem Charakter bezeichnet werden. Was dabei interessiert, ist das *Uebertragungsverhalten*. Darunter versteht man ganz allgemein den funktionellen Zusammenhang zwischen Ausgangsgrösse und Eingangsgrösse eines Kästchens im Verlauf der Zeit. Jeder beliebigen zeitlichen Veränderung der Eingangsgrösse entspricht ein ganz bestimmter zeitlicher Verlauf der Ausgangsgrösse. Vom Uebertragungsverhalten wird nicht nur im Falle eines einzelnen Regelkreisgliedes gesprochen, sondern auch bei Systemen von hintereinander bzw. parallel geschalteten Regelgliedern. Das Uebertragungsverhalten eines solchen Systems kann auf folgende Arten beschrieben werden:

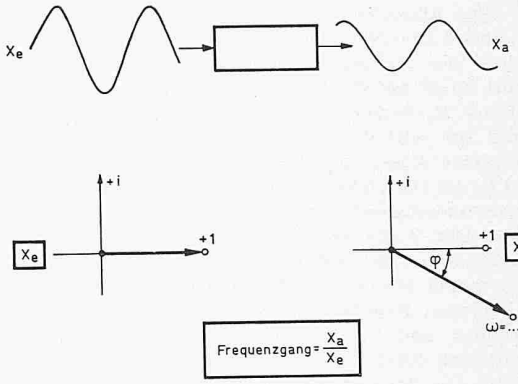

Bild 13. Bildung des Frequenzganges

a) *Die Differentialgleichung* eines Systems stellt die allgemeinste Darstellungsform für das Uebertragungsverhalten dar. Für bestimmte Zwecke eignen sich jedoch besser Angaben bestimmter Lösungen dieser Differentialgleichung. Dabei sind wiederum zwei Fälle in der Praxis von grosser Bedeutung, nämlich: die Uebergangsfunktion und der Frequenzgang.

b) Die *Uebergangsfunktion* stellt die Lösung der Differentialgleichung dar für eine sprunghafte Aenderung der Eingangsgrösse X_e (vgl. Bild 12).

c) Der *Frequenzgang* wird aus der Lösung der Differentialgleichung für harmonische Schwingung der Eingangsgrösse erhalten (Bild 13). Lasst man die Eingangsgrösse mit einer bestimmten Frequenz und Amplitude schwingen, so entsteht am Ausgang eines Regelkreisgliedes oder eines Systems solcher Glieder wiederum eine harmonische Schwingung gleicher Frequenz wie die Eingangsschwingung, wobei aber die Amplitude der Ausgangsschwingung von derjenigen des Eingangs abhängt und zudem eine Phasenverschiebung zwischen Ausgangsschwingung und Eingangsschwingung auftritt. Zur Bildung des Frequenzganges wird nun die Ausgangsschwingung durch die Eingangsschwingung dividiert. Stellt man die beiden Schwingungen als Vektoren in der komplexen Zahlenebene dar, so handelt es sich also um die Division des Ausgangsvektors durch einen Eingangsvektor.

Diese Division wird nach den Rechenregeln für komplexe Grössen durchgeführt, das heisst, die Amplituden werden durcheinander dividiert und die Phasenwinkel subtrahiert. Wählt man nun einfachheitshalber die Eingangsschwingung derart, dass ihre Amplitude 1 wird und definiert man ihren Phasenwinkel zu 0, so stellt der Vektor der Ausgangsschwingung direkt den Frequenzgangvektor dar (vgl. Bild 13). Die Amplitude des Ausgangsvektors wird ja definitionsgemäss durch 1 dividiert, verändert sich also nicht. Vom Phasenwinkel der Ausgangsschwingung wird der Phasenwinkel 0 der Eingangsschwingung abgezogen; er verändert sich also ebenfalls nicht. Es ist nun ohne weiteres ersichtlich, dass verschiedenen Schwingungsfrequenzen verschiedene Frequenzgangvektoren zugeordnet werden. Man kann diese Vektoren alle in der komplexen Zahlenebene auftragen und ihre Spitzen mit der jeweiligen Kreisfrequenz ω beschriften. Die Verbindungskurve der Frequenzgangvektoren wird mit Gangkurve bezeichnet und ist von ganz besonderer Bedeutung für die Berechnung der Stabilität von Regelkreisen.

Das Uebertragungsverhalten von Regelkreisgliedern kann nun zur Kennzeichnung der einzelnen Kästchen des Blockschaltbildes verwendet werden. Der Vorteil der Darstellung eines Regelkreises durch ein Blockschaltbild besteht ja in der Abstraktion von den gerätetechnischen Gegebenheiten. Mit Hilfe des Blockschaltbildes können sich Mathematiker, Elektro-Ingenieure, Maschinen-Ingenieure und Physiker in derselben Sprache unterhalten. Es zeigt sich nämlich, dass Regelkreisglieder verschiedenster Bereiche durch ein Kästchen mit dem selben Uebertragungsverhalten dargestellt werden können. Bild 14 veranschaulicht diese Tatsache. Hier werden einander gegenübergestellt: Ein Druckbehälter mit konstantem Zufluss und von Ventilquerschnitt und Druck abhängigem Abfluss; der dargestellte Wasserbehälter mit variablem Abfluss; eine elektrische RC-Schaltung und ein hydraulischer Servomotor mit Steuerschieber und Rückführung.

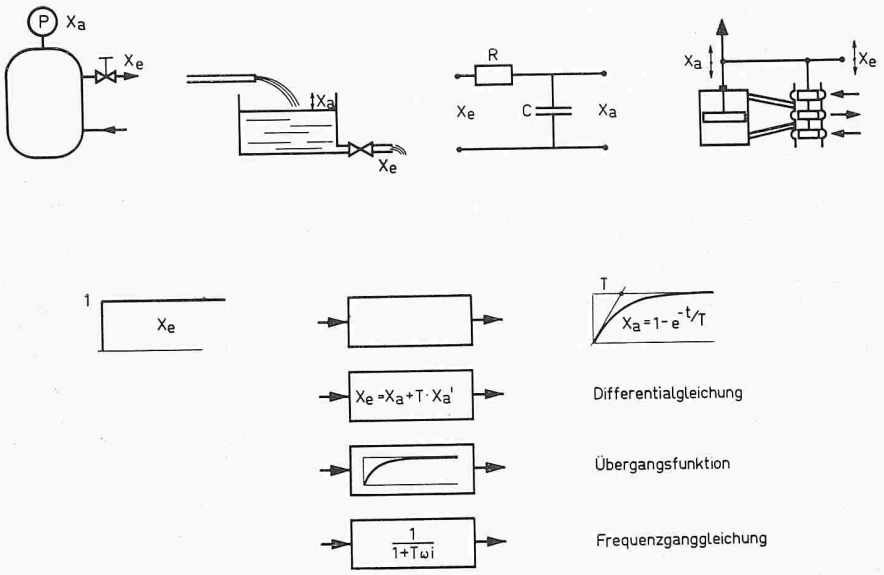

Bild 14 (links). Gemeinsames Uebertragungsverhalten verschiedener Regelkreisglieder

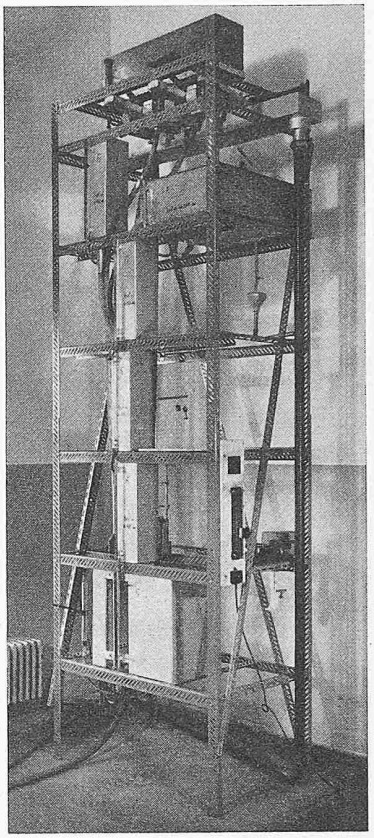

Bild 15 (rechts). Hydraulisches Analogiegerät

Alle diese Organe können durch ein Kästchen mit dem selben Uebertragungsverhalten dargestellt werden. Es muss dabei nochmals betont werden, dass das angegebene Uebertragungsverhalten auf einer linearisierten Theorie basiert, das heisst, dass die angeschriebenen Gleichungen nur richtig sind für kleine Abweichungen der Eingangs- und der Ausgangsgrösse vom Beharrungswert, also unter der Annahme, dass Kurven durch Tangenten ersetzt werden können. So verändert sich zum Beispiel die Ausflussmenge aus dem Wasserbehälter proportional zur Wurzel der Niveauänderung bei konstantem Ventilquerschnitt. Betrachtet man aber nur kleine Niveau-Auslenkungen um einen gegebenen Beharrungswert, so kann diese Wurzelfunktion durch die Tangente in diesem Beharrungspunkt ersetzt werden, und es kann X_a proportional zu X_e gesetzt werden.

Die Bezeichnung der Kästchen entsprechend ihrem Uebertragungsverhalten kann auf verschiedene Arten geschehen; Bild 14 zeigt einige übliche Anschriften. Man kann zum Beispiel die Differentialgleichung anschreiben. Aus ihr lässt sich in einfachen Fällen und bei einiger Uebung direkt auf den Charakter von Frequenzgang und Uebergangsfunktion schliessen. Die Differentialgleichung erster Ordnung

$$X_e = X_a + X_a' \cdot T$$

mit der konstanten Störfunktion $X_e = 1$ entsprechend der Uebergangsfunktion lässt ohne Schwierigkeiten die anschauliche Ermittlung des Anfangsverhaltens und des asymptotischen Verhaltens für grosse Zeiten zu. Im ersten Moment ist $X_a = 0$. Die Ableitung von X_a somit $= 1/T$. Die Tangente an die Uebergangsfunktion kann somit durch Abtragen von T auf der Geraden $X_a = 1$ gefunden werden, wie dies aus Bild 14 hervorgeht. Für sehr grosse Zeiten verschwindet X_a', es wird somit $X_e = X_a = 1$, welcher Wert durch asymptotische Annäherung erreicht wird.

Recht anschaulich ist besonders die Einzeichnung der Uebergangsfunktion, in unserem Falle einer e-Funktion. Der Nachteil dieser Anschrift besteht darin, dass die für Berechnungszwecke nötigen Grössen, zum Beispiel Frequenzganggleichung oder Differentialgleichung, aufgesucht werden müssen. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Frequenzganggleichung ins Kästchen zu schreiben. Bestrebungen zu einer Normalisierung der verschiedenen Anschriften sind gegenwärtig im Gange.

Auf der Tatsache des gleichen Uebertragungsverhaltens verschiedenster Regelkreisglieder, seien sie nun hydraulisch, elektrisch oder mechanisch, beruht die Möglichkeit, *Analogieregelungen* aufzubauen, also zum Beispiel irgend einen Regelkreis durch ein elektrisches oder auch hydraulisches Analogon nachzubilden. So kann das regeldynamische Verhalten eines Einrohrdampferzeugers mit angehängter Turbine, Generator und elektrischem Netz durch ein hydraulisches Analogon dargestellt werden, wie dies Bild 15 an einem Ausführungsbeispiel zeigt. Analogiegeräte eignen sich vorzüglich für Parameter-Untersuchungen an komplizierten Regelstrecken bzw. Reglerkombinationen. Sie erlauben die Untersuchung der Einflüsse verschiedener Parameter mit geringem Zeitaufwand.

Entsprechend ihrem Uebertragungsverhalten haben sich einige Standard-Reglertypen herausgebildet, wie sie oft angewendet werden; Bild 16 zeigt diese Beispiele anhand der idealisierten Uebergangsfunktion. An erster Stelle steht der sehr häufig verwendete *Proportionalregler*. Einer Aenderung der Regelgrösse ordnet dieser Regler eine proportionale Aenderung der Stellgrösse zu. Die eingangs behandelte Niveau-Regelung stellt ein Beispiel dieser Art dar. Ein reiner *P*-Regler weist eine bleibende Regelabweichung auf.

Der *Integral-Regler* wird durch Einschalten eines der behandelten Integrationsorgane in den Regelkreis erhalten. Einer plötzlichen Abweichung der Regelgrösse vom Sollwert entspricht eine linear mit der Zeit ansteigende Stellgrössenänderung, eben das Integral der Regelabweichung. Man sieht ohne weiteres, dass dieser Regler sich nur in Beharrung befinden kann, wenn die Regelabweichung 0 ist. Der *I-Regler* führt also die Regelgrösse unabhängig von den Störgrössen auf den Ausgangswert zurück.

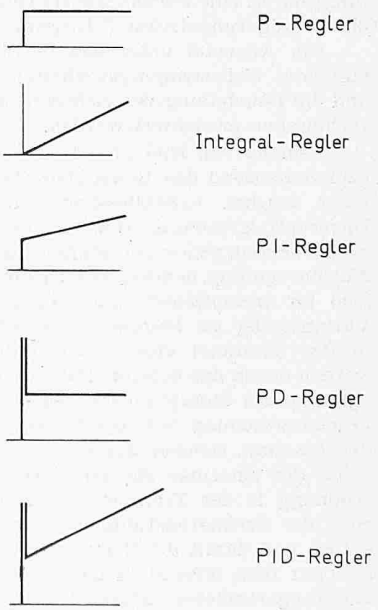

Bild 16. Idealisierte Uebergangsfunktionen verschiedener Standard-Reglertypen

Eine Kombination von Proportional- und Integralregler stellt der *PI-Regler* dar, wie er zum Beispiel durch eine der besprochenen nachgiebigen Rückführungen am Stellglied verwirklicht werden kann. Der PI-Regler kann aber auch aus einem P-Regler und einem parallel dazu ge-

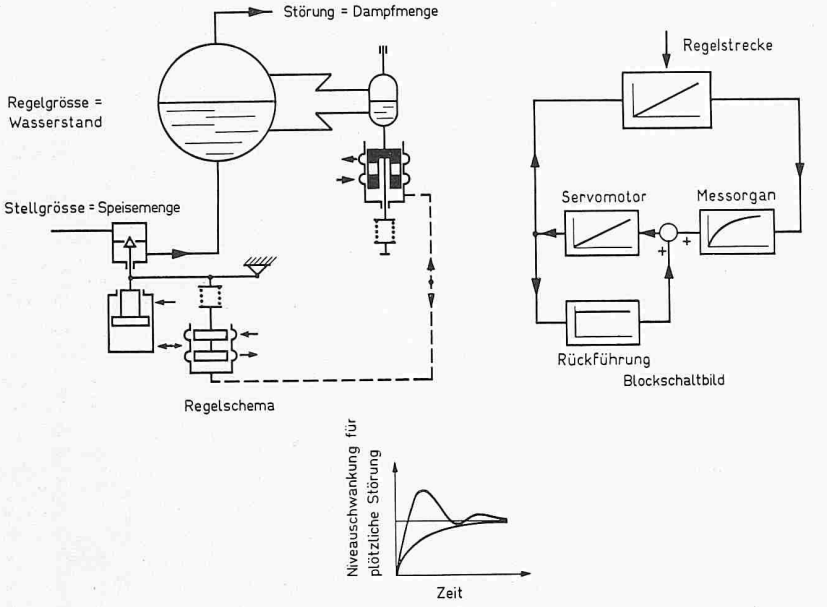

Bild 17. Gerätebild und Blockschaltbild eines einfachen Regelkreises

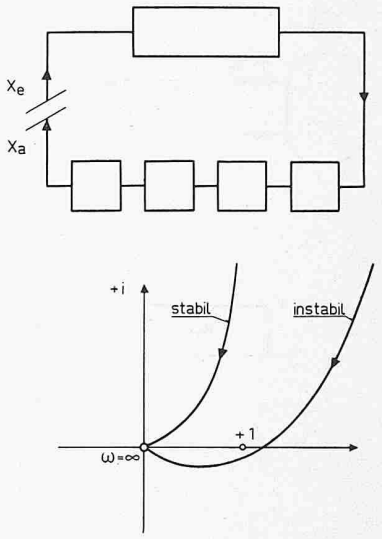

Bild 18. Stabilitätsentscheid auf Grund der Frequenzgangkurven des aufgeschnittenen Regelkreises

schalteten Integrationsglied aufgebaut werden. Auch der PI-Regler arbeitet mit einer verschwindenden Regelabweichung. Der Proportional-Regler kann aber auch kombiniert werden mit einem Differential-Impuls, etwa durch Anbringen einer verzögerten Rückführung am Stellglied, oder durch Parallelschaltung eines Differentialgliedes zu einem Proportionalglied im Sinne eines Korrekturorganes. Der *ideale PD-Regler* antwortet auf eine sprunghafte Aenderung der Eingangsgrösse mit einem unendlich kurzzeitigen Ausschlag ins Unendliche, da ja der Differentialregler proportional zur Ableitung der Eingangsgrösse reagiert, welche bei der Sprungfunktion unendlich wird. Der PD-Regler arbeitet wiederum mit einer bleibenden Reglerabweichung.

Eine Kombination sämtlicher drei Typen stellt der *Proportional-Integral-Differentialregler* oder PID-Regler dar. Er vereinigt die Eigenschaften sämtlicher drei Regler in einem und arbeitet ohne bleibende Regelabweichung.

Die angeführten Uebergangsfunktionen gelten nur für Regler ohne Verzögerung. In der Praxis treten im allgemeinen Verzögerungen auf, indem zum Beispiel ein Servomotor eine gewisse Zeit benötigt, um eine neue Position einzunehmen. Ein P-Regler mit Servomotor und Rückführung ist daher mit einer Verzögerung erster Ordnung behaftet. Seine Uebergangsfunktion ist eine *e*-Funktion im Gegensatz zur Sprungfunktion des verzögerungsfreien P-Reglers.

Die Auswahl unter den verfügbaren Reglertypen hängt nun vom Uebertragungsverhalten der geregelten Anlage ab, und die Beurteilung der richtigen Anwendung kann durch Berechnungen erleichtert werden.

Anhand von Bild 17 soll an einem einfachen Beispiel zusammenfassend das Blockschaltbild eines Regelkreises hergeleitet werden. Anschliessend soll gezeigt werden, wie sich Differentialgleichung, Uebergangsfunktion und Frequenzgang zu Berechnungszwecken eignen. Bei der in Bild 17 skizzierten Niveauregelung handelt es sich um eine Proportionalregelung, also im wesentlichen um nichts anderes als die indirekte Variante der zu Beginn behandelten Regelung. Das Niveau in der Trommel eines Naturumlaufkessels kann gemessen werden durch das bereits erwähnte Gewichtsgefäss. Die Uebertragung des Messimpulses geschieht in Form einer Regelöldruckabweichung auf den Steuerschieber eines hydraulischen Servomotors, welcher das Speiseventil betätigt. Die Wirkungsweise der einzelnen Elemente ist dabei z. B. für eine Niveauerhöhung in der Trommel, etwa verursacht durch Verkleinerung der Brennerleistung, folgende: Das Niveau im Gewichtsgefäss und damit die Belastung des Empfängerschiebers steigen mit dem Niveau in der Trommel an. Dadurch wird der Empfängerschieber unter dem Einfluss der erhöhten Belastung der Feder, auf der er ruht, aus der Mittellage nach unten ausgelenkt, und es fliesst so lange Drucköl in den Raum unter den Empfängerschieber, bis das erhöhte Gewicht des Gewichtsgefässes durch den höheren Oeldruck unter dem Schieber ausgeglichen, und der Schieber wieder in seine Ausgangslage zurückgekehrt ist. Dem erhöhten Oeldruck in der Impulsleitung von Empfängerschieber zu Steuerschieber am Servomotor entspricht ein dazu proportionaler Hub der Speiseventil-Spindel, wodurch die Speisemenge verkleinert wird. Das hier beschriebene Regelprinzip wird z. B. von Gebrüder Sulzer AG. zur Regelung des Wasserniveaus in Kesseltrommeln angewendet.

Fassen wir kurz zusammen: Die Störgrösse ist die Dampferzeugung entsprechend der Brennerleistung; die Regelgrösse wird durch das Wasserniveau in der Trommel dargestellt; Stellgrösse ist die Speisemenge entsprechend der Stellung des Speiseventils.

Ersetzt man das Geräteschaltbild durch das Blockschaltbild, so erhält man die in Bild 17 links aufgezeichneten Kästchen: Die *Regelstrecke* stellt den Zusammenhang zwischen zugeführter Wassermenge und Niveauänderung dar. Tragen wir die entsprechende Uebergangsfunktion ein, so sehen wir rein anschaulich, ohne auf die mathematische Herleitung einzugehen, dass die Regelstrecke integralen Charakter aufweist. Das *Messorgan,* also das Gewichtsgefäss, hat nun ein Uebertragungsverhalten entsprechend einem Verzögerungsglied erster Ordnung, wie es durch die Beispiele von Bild 14 veranschaulicht wird. Der *Servomotor* weist wiederum integrales Verhalten auf, indem einer bestimmten Steuerschieber-Auslenkung eine dazu proportionale Verstellgeschwindigkeit entspricht. Die Rückführung wirkt als P-Glied im eingezeichneten Sinne.

Die beiden Kästchen für Servomotor mit Steuerschieber und für die Rückführung könnten selbstverständlich auch in einem Kästchen zusammengefasst werden. Das Uebertragungsverhalten aus Integralglied und starrer Rückführung entspricht dem Verzögerungsglied erster Ordnung. Es müsste somit die gleiche Uebergangsfunktion eingezeichnet werden wie für das Messorgan.

Stört man das dargestellte System durch plötzliche Vergrösserung oder Verkleinerung der pro Zeiteinheit erzeugten Dampfmenge, so schwankt das Wasserniveau nach den eingezeichneten Funktionen. Man kann erreichen, dass das Niveau sich aperiodisch dem neuen Beharrungswert nähert; es kann aber auch sein, dass ein regelrechter Einschwingvorgang auftritt. Das Auftreten des einen oder anderen Verhaltens hängt von den Daten der Regelung ab.

Eine auf anschaulichen Ueberlegungen fussende Abschätzung der Wirkung dieser Regeleinrichtung ist schwierig, was noch in vermehrtem Mass für kompliziertere Systeme gilt, die anschaulich überhaupt nicht mehr erfasst werden können. Es rechtfertigt sich daher, hier noch einen knappen Ueberblick auf die Berechnungsmöglichkeiten anzufügen.

Uebersicht über die Berechnungsmöglichkeiten von Regelkreisen

Die klassische Regeltheorie wurde für lineare Systeme entwickelt, also für Systeme, deren Verhalten sich durch lineare Differentialgleichungen beschreiben lässt. In neuerer Zeit wurden auch Theorien für nicht-lineare Systeme entwickelt, die aber recht verwickelt sind und zudem den besonders schwerwiegenden Nachteil aufweisen, dass sich die Lösungen nicht verallgemeinern lassen. Im Maschinenbau kommt der linearen Theorie daher grosse Bedeutung zu, auch wenn sie nur Näherungslösungen liefert. In sehr vielen Fällen ist die Annäherung an die Wirklichkeit recht gut und leistet somit der Praxis ausgezeichnete Dienste.

Im wesentlichen interessieren den Ingenieur die Stabilität, die Regelgüte und den Regelablauf.

a) Stabilität

Eine Regelung ist dann *stabil,* wenn die Regelgrösse nach einer vorausgehenden Störung nach kürzerer oder längerer Zeit wiederum einen Beharrungswert einnimmt. *Unstabile Regelsysteme* fallen nach einer Störung in harmonische oder angefachte Schwingungen. Die Beurteilung der Stabilität ist ein Problem, das sehr häufig an denjenigen gestellt wird, der sich mit der Berechnung der Regelungen befasst. Es sind einfache Methoden entwickelt worden, welche Stabilitätsberechnungen mit verhältnismässig kleinem Aufwand an Zeit und Rechenarbeit erlauben. Besonders zweckmässig ist die Frequenzgangmethode, bei der die Gangkurve des aufgeschnittenen Regelkreises verwendet wird.

Bild 18 zeigt ein Beispiel. An der Schnittstelle wird die Eingangsschwingung X_e eingeleitet; der Ausgang der Schnittstelle gibt je nach Frequenz die entsprechende Antwort. Je nach Verlauf der Gangkurve bezüglich dem Punkt $+1$ ist die Regelung stabil oder instabil; nämlich stabil, wenn der Punkt $+1$ links der Gangkurve liegt, wenn man auf der Kurve vom Punkt $\omega = 0$ gegen $\omega = \infty$ wandert.

Die Anwendung der Frequenzgangmethode ist besonders praktisch, weil der Frequenzgang des aufgeschnittenen Kreises auf einfachste Weise durch Multiplikation der Frequenzgänge der in Serie geschalteten Regelkreisglieder ermittelt werden kann. Zudem bestehen in der Fachliteratur für die meisten vorkommenden Glieder die entsprechenden Formeln, welche mit dem Rechenschieber leicht ausgewertet werden können. Daneben gibt es auch Nomogramme für Phase und Amplitude in Funktion von ω, welche die Auswertung noch weiter vereinfachen.

b) Regelgüte

Für die Beurteilung, wie gut ein Regler Störungen an einer geregelten Anlage berichtigt, stehen verschiedene Kriterien zur Verfügung. Eines davon ist die *Dämpfung.* Sie gibt an, wie rasch eine e-Funktion gegen 0 konvergiert und wird durch den Dämpfungsfaktor α beschrieben. Analog dazu kann als Dämpfungsmass für abklingende Schwingungen auch das Verhältnis zweier aufeinanderfolgender Schwingungs-Amplituden verwendet werden.

Die *maximale Regelabweichung* nach einer bestimmten Störung kann ebenfalls als Mass für die Regelgüte angesehen werden. Oftmals wird zum Beispiel bei Temperaturregelungen ein bestimmter Maximalwert der Regelabweichung garantiert. Dies ist unter anderem der Fall bei Dampferzeugern. Die maximale Regelabweichung kann nur durch Berechnung des Regelablaufs ermittelt werden, möglicherweise mittels Analogiegeräten.

Optimale Einstellung eines Reglers: In der Praxis stellt sich oft die Aufgabe, einen gegebenen Regler an einer ebenfalls gegebenen Regelstrecke derart einzustellen, dass er optimal regelt. Hiefür gibt es verschiedene Näherungsformeln, die für ein bestimmtes Uebertragungsverhalten der Regelstrecke die optimale Einstellung eines der Standard-Reglertypen PI, PID usw. erlauben. Dabei wird als Kriterium oft die *minimale Regelfläche* angenommen. Es wird also die Bedingung gestellt, dass für eine Störung in Form des Einheitsstosses zur Zeit $t = 0$ das Integral der zeitlichen Abweichung der Regelgrösse von ihrem Beharrungswert minimal wird.

Tabelle 1. Zusammenstellung der wichtigsten Rechenmethoden

Zu ermitteln	*Methoden*	*Bemerkungen*
Frequenzgang	1. Numerisch auf Grund der Teilfrequenzgänge des Systems	sehr praktisch, weil sich im allgemeinen die Teilfrequenzgänge leicht ermitteln lassen (z. B. mittels Nomogrammen für Phasenwinkel und Amplitude)
	2. Analytisch durch Lösung der Differentialgleichung des Systems für harmonische Störfunktion	bei Differentialgleichungen niedriger Ordnung einfach und übersichtlich
	3. Transformation der Differentialgleichung einschl. Anfangsbedingung in Form des Einstosses in den Laplace-Raum: Lösung im L-Raum; $\times i\omega$ = Frequenzgang	kann in komplizierten Fällen angwendet werden, wenn z. B. das Uebertragungsverhalten der Regelstrecke durch eine partielle Differentialgleichung gegeben ist
Uebergangsfunktion	4. Lösung der Differentialgleichung mit Einheitsstoss als Störfunktion	in einfacheren Fällen leicht möglich
	5. Aus Frequenzgang mittels Laplace-Transformation	in komplizierten Fällen etwa durch Anwendung einer graphisch-numerischen Methode zur Lösung des L-Umkehrintegrals
Stabilität	6. Auf Grund der Differentialgleichung des geschlossenen Regelkreises (verschiedene Koeffizienten-Kriterien usw.)	in einfachern Fällen
	7. Anhand der Gangkurve des aufgeschnittenen Regelkreises	sehr praktisch auch in komplizierten Fällen, vgl. 1.
Regelablauf *a) sinusförmige Störung*	8. Resultierende Gangkurve aus Teilfrequenzgängen	
	9. Lösung der Differentialgleichung des geschlossenen Regelkreises mit harmonischer Störfunktion	
	10. Aus Uebergangsfunktion durch Anwendung der Laplace-Transformation	
b) Einheitsstoss der Störgrösse	11. Lösung der Differentialgleichung des geschlossenen Regelkreises	
	12. Aus resultierendem Frequenzgang mittels Laplace-Transformation	in komplizierten Fällen anwendbar, vgl. 5.
c) Beliebige Störfunktion	13. Differenzenrechnung	die Differenzenrechnung ist selbstverständlich in allen erwähnten Fällen für die Lösung einer Differentialgleichung anwendbar
	14. Analogiegerät	

c) Regelablauf

In vielen Fällen werden genauere Angaben über den Regelablauf verlangt, da häufig nur auf dieser Grundlage Vorteile und Nachteile von Reglern bei ihrer Verwendung mit einer bestimmten Regelstrecke richtig beurteilt werden können. Die Berechnung des Regelablaufes ist im allgemeinen für sinusförmige Aenderung der Störgrössen oder Störungen in Form des Einheitsstosses verhältnismässig gut möglich. Für beliebige Störfunktionen ist man dagegen praktisch meist auf Differenzenrechnungen angewiesen oder man kann ein Analogie-Gerät verwenden. Tabelle 1 gibt zusammenfassend einen Ueberblick über die verschiedenen wichtigsten Berechnungsmethoden und soll sozusagen als Sprungbrett dienen für weitere Arbeiten über die Anwendung der Laplace-Transformation und der Frequenzgangmethoden, die für den Ingenieur praktische Hilfsmittel zur Lösung komplizierterer Probleme darstellen.

Eine sehr praktische Methode zur Bestimmung des Frequenzganges eines Systems besteht in der in Tabelle 1 unter 1. angeführten Ermittlung der Gangkurven aus den Teilfrequenzgängen. Sehr oft besteht das Uebertragungsverhalten der einzelnen Regelkreisglieder aus Funktionen, deren Formeln für den Frequenzgang der Fachliteratur ohne weiteres entnommen werden können. Für ein bestimmtes ω lassen sich die Phasenwinkel und die absoluten Beträge der einzelnen Vektoren berechnen, möglicherweise bestehen sogar Nomogramme, aus denen diese Werte für ein bestimmtes ω direkt abgelesen werden können. Die Multiplikation oder Addition der einzelnen Vektoren geschieht in einfacher Weise nach den Regeln der Vektorrechnung.

Oft kann auch entsprechend Zeile 2. ein partikuläres Integral der Differentialgleichung eines aufgeschnittenen Regelkreises für eine harmonische Störfunktion gefunden werden, das heisst mit anderen Worten wiederum der Frequenzgang. Für kompliziertere Regelstrecken wie zum Beispiel durchströmte lange Rohrsysteme, bei denen nach dem Frequenzgang der Austrittstemperatur des Mediums in Funktion der Eintrittstemperatur gefragt wird, führt diese Methode in Form einer partikulären Lösung einer partiellen Differentialgleichung zum Ziel.

In sehr komplizierten Fällen leistet die Laplace-Transformation zur Ermittlung des Frequenzganges vorzügliche Dienste. Die Differentialgleichung einschliesslich Rand- und Anfangsbedingung, die letztere in Form einer konstanten Störfunktion, werden in der Zeit t nach Laplace transformiert, was im allgemeinen ohne grössere Schwierigkeiten möglich ist. Die Lösung der Gleichung in der Bildebene der Transformation in t kann nun direkt erfolgen oder durch eine weitere L-Transformation in der zweiten unabhängigen Variablen und anschliessende Rücktransformation.

Multiplikation dieser Lösung mit $i\,\omega$ ergibt den Frequenzgang, welcher somit auch in denjenigen Fällen gefunden werden kann, für die zum Beispiel die Bestimmung eines partikulären Integrals für harmonische Störung ohne Anwendung der L-Transformation nicht ohne grosse Schwierigkeiten möglich ist. Ein Anwendungsbeispiel dieser Art aus dem Gebiet des Maschinenbaues stellt der Wärmeaustauscher im Gegen- oder Gleichstrom dar, bei dem nach den Temperaturschwankungen eines Mediums am Austritt in Funktion der Schwankungen des anderen Mediums am Eintritt gefragt wird.

Die *Uebergangsfunktion* eines Gliedes bzw. einer Reihe von Gliedern lässt sich in einfacheren Fällen direkt durch die Lösung der Differentialgleichung für eine Konstante als Störfunktion finden. In komplizierteren Fällen kann diese Lösung durch Anwendung der L-Transformation erleichtert werden, wobei sich zum Beispiel die Rücktransformation aus dem Bildraum durch graphisch-numerische Methoden bewerkstelligen lässt. Da die Lösung der Differentialgleichung für konstante Störfunktion in der Zeit t nach Laplace transformiert und mit $i\,\omega$ multipliziert den Frequenzgang ergibt, können diese graphisch-numerischen Verfahren zur Lösung des L-Umkehrintegrals auch verwendet werden zur Bestimmung der Uebergangsfunktion aus einem bekannten Frequenzgang.

Die *Stabilität* eines Systems lässt sich anhand der Differentialgleichung des aufgeschnittenen Regelkreises ermitteln, entsprechend Zeile 6. der Tabelle 1. Es existieren verschiedene Kriterien, die anhand der Koeffizienten der Differentialgleichung oder der Wurzeln der charakteristischen Gleichung den Stabilitätsentscheid zu fällen erlauben. Bei Gleichungen höherer Ordnung führen diese Verfahren jedoch auf unübersichtliche numerische Rechnungen. Der Stabilitätsentscheid anhand der Gangkurve des aufgeschnittenen Regelkreises ist oft einfacher und führt insbesondere auch zum Ziel, wenn von einem Glied des Regelkreises nur die Frequenzkurve, nicht aber die Differentialgleichung vorliegt.

Der *Regelablauf* interessiert natürlich besonders für diejenigen Störfunktionen, die in der Praxis an einer bestimmten Regulierung zu erwarten sind. Es kann sich dabei um ein Lastprogramm handeln, welches durch eine Dampfturbine mit angehängtem Dampferzeuger durch dessen Feuerregulierung ausgefahren werden muss, oder ähnliches. Solche Untersuchungen sind im allgemeinen in der Praxis auf Analogieversuche oder Berechnungen mittels Differenzenrechnung oder der Methode der Zeitserien angewiesen.

Oft genügt aber auch die Kenntnis des Regelablaufes für einen Einheitsstoss zur Zeit $t = 0$ als Störgrösse. Es handelt sich dabei also um die Bestimmung der Uebergangsfunktion für den geschlossenen Regelkreis; die Methoden sind somit analog wie bei Zeile 4. und 5. Sie bestehen in der Lösung der Differentialgleichung oder in der Bestimmung der Uebergangsfunktion aus dem resultierenden Frequenzgang durch Anwendung der Laplace-Transformation.

Es ist nicht so, dass die Anwendung dieser Methoden nur mathematisch besonders begabten Ingenieuren vorbehalten bleibt. Mit den gegenwärtig vorhandenen Hilfsmitteln bieten solche Untersuchungen im allgemeinen keine besonderen Schwierigkeiten mehr. Das Problem ist beinahe gelöst, wenn der Schritt vom Regelschema zum Blockschaltbild gemacht ist. Hier liegt auch die Hauptschwierigkeit, wenn das Uebertragungsverhalten komplizierterer Regelstrecken durch die linearisierte Theorie erfasst werden muss. Dieser Schritt wird für Spezialfälle dem mathematisch gut versierten Ingenieur vorbehalten bleiben.

Adresse des Verfassers: Dipl. Ing. *J. Kägi* bei Gebr. Sulzer AG., Winterthur

Die St. Alban-Brücke über den Rhein in Basel

Schluss von S. 520

DK 624.65

Dipl. Ing. **O. Oberholzer,** Tiefbauamt des Kantons Basel-Stadt

d) *Die Nietkontrolle* war der Sektion für Brückenbau der Kreisdirektion II der SBB übertragen. Im ganzen wurden 62 380 Nieten, davon 31 100 in den Werkstätten und 31 280 auf der Baustelle kontrolliert. In den Werkstätten wurden die Nieten teils mit pneumatischen Pressen, teils mit pneumatischen Hämmern, auf der Baustelle ausschliesslich mit den letztern geschlagen. Beim ersten Hauptträgerstück mit 1332 Werkstattnieten mussten 17 bis 438, d. h. 1,28 bis 32,9 % ersetzt werden. Vom zweiten Stück an waren jedoch nur noch 0 bis 9,3 %, im Mittel 2,2 % zu beanstanden und neu zu schlagen. Auf der Montage konnten nur noch 332 =1,06 % lose Nieten festgestellt werden. Die anfänglich verhältnismässig häufig auftretenden Fehlnieten waren zum einen Teil auf die mangelnde Uebung der Nieter, zum andern Teil auf ungeeignete Werkzeuge zurückzuführen.

e) Schweissnahtkontrolle

Dieser war im Hinblick auf die grosse Totallänge der Schweissnähte und die Verwendung von St. 52 als Konstruktionsmaterial sehr grosses Gewicht beizumessen. Die gesamte Schweissnahtkontrolle, sowohl von Auge als auch mit Ultraschall-, Röntgen- und Gammastrahlen war den Organen des Schweiz. Acetylenvereins (heute Schweiz. Verein für Schweisstechnik) mit Sitz in Basel übertragen. Dessen Direktor, Dr.