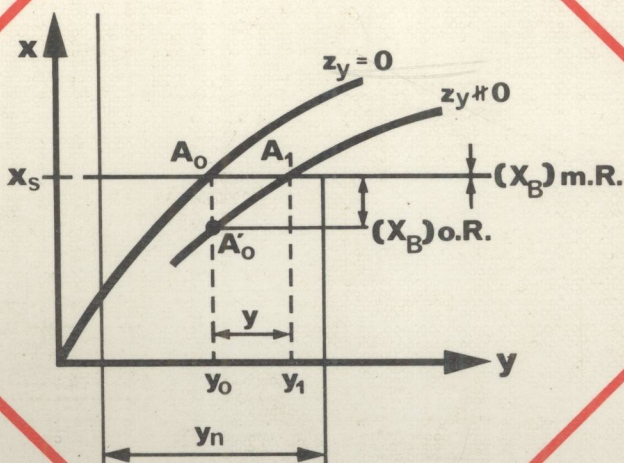


W. Lenz · E. Oberst · M. Koegele

Grundlagen der Steuerungs- und Regelungstechnik



Hüthig

TP27
L1

8261947

Grundlagen der Steuerungs- und Regelungstechnik

von
DR. PAED. DIPL.-ING. WILHELM LENZ,
DR. SC. TECHN. EBERHARD OBERST
und
DR. RER. NAT. MANFRED KOEGST

Mit 209 Bildern, 27 Tabellen und 10 Tafeln



E8261947

DR. ALFRED HÜTHIG VERLAG HEIDELBERG

Das Buch ist ein Auszug aus dem Werk
„Fachwissen des Ingenieurs“, Band 2,
7. Auflage 1981

CIP-Kurztitelaufnahme der Deutschen Bibliothek

Lenz, Wilhelm:

Grundlagen der Steuerungs- und Regelungstechnik/
Wilhelm Lenz; Eberhard Oberst; Manfred Koegst. —
Heidelberg: Hüthig, 1982.

ISBN 3-7785-0693-5

NE: Oberst, Eberhard.; Koegst, Manfred:

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdruckes, der Entnahme von Abbildungen, der Funksendung, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten.

© VEB Fachbuchverlag Leipzig 1982

Lizenzausgabe für den Dr. Alfred Hüthig Verlag GmbH, Heidelberg

Printed in the German Democratic Republic

Satz: VEB Druckhaus „Maxim Gorki“, Altenburg

Fotomechanischer Nachdruck: Grafische Werke Zwickau III/29/1

Vorwort



Zu den Grundlagen der Automatisierung gehören das Regeln und Steuern sowie Schaltsysteme, die zweiwertige Eingangssignale unter eindeutig logisch formulierbaren Bedingungen verarbeiten. Das hierfür notwendige Wissen zur Lösung von Automatisierungsaufgaben der verschiedensten Probleme wird in dem vorliegenden Buch sowohl für den in der Praxis tätigen Ingenieur, aber auch für Studenten in übersichtlicher und leichtfaßlicher Weise von Fachleuten dargestellt. Die Theorie spielt als Basis praktisch anwendbarer Hilfsmittel bereits bei der Ausbildung und Wissensvermittlung eine wichtige Rolle. Noch wichtiger ist aber ihre direkte und unmittelbare Nutzung bei der Entwicklung neuer automatisierbarer Technologien. Durch die übersichtliche Gliederung des Stoffes eignet sich dieses Buch vor allem auch für den Ingenieur in der Praxis, der für seine speziellen Probleme entsprechend günstige praktische Lösungen benötigt.

In dem Abschnitt Steuerungs- und Regelungstechnik werden einleitend die Wirkungsprinzipien beider Techniken gegenübergestellt. Anschließend werden die Übertragungseigenschaften der Funktionsglieder der Regelungstechnik sowie die Arbeitsverfahren zur Stabilitätsprüfung und Optimierung von linearen, nichtlinearen und getasteten Regelungen mathematisch behandelt. Bei allen Darstellungen wird größter Wert auf Praxisnähe und Anschaulichkeit gelegt, wobei viele Beispiele das Studium der einzelnen Anwendungsgebiete erleichtern.

Der zweite Teil ist dem Entwurf von Schaltsystemen gewidmet, die zweiwertige Eingangssignale verarbeiten. Ein Schaltsystem läßt sich als signalverarbeitendes System auffassen, das Eingabefolgen in Ausgabefolgen umsetzt. Ein Schaltsystem, dem jeder Eingangsbelegung eine entsprechende Ausgangsbelegung zugeordnet werden kann, wird als Kombinationsschaltung, kombinatorisches Schaltsystem oder Schaltnetz bezeichnet. Der Entwurf derartiger Schaltungen wird in knapper Form erklärt. Die Zusammenhänge und typischen Verfahren sowie die Methoden der Theorie sind so aufbereitet, daß der Leser einen Zugang zur Problematik des Entwurfs von Schaltsystemen findet. Für die Vermittlung tiefergehender theoretischer Zusammenhänge wird an den entsprechenden Stellen auf die einschlägige Spezialliteratur verwiesen.

Die Autoren sind für kritische Hinweise und Vorschläge dankbar.

Autoren und Verlag

StR Steuerungs- und Regelungstechnik

Von Dr. paed. Dipl.-Ing. Wilhelm Lenz, Leipzig



Inhaltsverzeichnis

1.	Einführung	3	2.2.1.	Grundlegende Übertragungs- verhalten	37
1.1.	Steuerungs- und Regelungstechnik	4	2.2.2.	Grundsätzliche Kopplungsarten der Übertragungsglieder	44
1.1.1.	Steuern	4	2.2.2.1.	Reihenschaltung	45
1.1.2.	Regeln	5	2.2.2.2.	Parallelschaltung	45
1.1.3.	Darstellung von Steuerungen und Regelungen im Signalflußplan	7	2.2.2.3.	Rückführschaltung	46
1.1.3.1.	Übertragungsglied	7	2.2.2.4.	Zusammengesetzte Übertragungs- verhalten	47
1.1.3.2.	Signalflußplan einer Steuerung	8	2.3.	Regelstrecken	47
1.1.3.3.	Signalflußplan einer Regelung	9	2.3.1.	Regelstrecken mit Ausgleich	49
1.2.	Benennungen von Regelungen	11	2.3.2.	Regelstrecken ohne Ausgleich	55
1.2.1.	Hilfsenergie	11	2.4.	Stetige Regler	60
1.2.1.1.	Regelungen ohne Hilfsenergie	11	2.4.1.	Statische Kennwerte des Reglers	60
1.2.1.2.	Regelungen mit Hilfsenergie	12	2.4.1.1.	Allgemeine Begriffe	60
1.2.2.	Veränderlichkeit der Führungsgröße	14	2.4.1.2.	Hauptarten stetiger Regler	60
1.2.2.1.	Festwertregelung	14	2.4.1.3.	Kennlinieneigenschaften	62
1.2.2.2.	Führungsregelung	14	2.4.2.	Grundformen der Regler	62
1.2.2.3.	Zeitplanregelung	15	2.4.3.	Aufbau von Reglern	62
1.2.3.	Analoge Regelungen	15	2.4.3.1.	P-Regler	64
1.2.3.1.	P-Regelung	16	2.4.3.2.	PD-Regler	64
1.2.3.2.	I-Regelung	16	2.4.3.3.	PI-Regler	66
1.2.3.3.	PI-Regelung	18	2.4.3.4.	PID-Regler	67
1.2.4.	Diskrete Regelungen	20	2.5.	Arbeitsverfahren zur experimentellen Kennwertermittlung an Regel- strecken	72
1.2.4.1.	Zweipunktregelung	20	2.5.1.	Kennwertermittlung aus der Sprung- antwort	72
1.2.4.2.	Dreipunktregelung	21	2.5.1.1.	Meßvorgang	72
1.2.4.3.	Digitale Regelung	22	2.5.1.2.	Sprungantwort von P-Strecken	73
1.2.5.	Stetigkeit von Regelungen	22	2.5.1.3.	Faustformeln zur Bestimmung der Kennwerte bei Reihenschaltung	76
1.2.6.	Kontinuität von Regelungen	23	2.5.1.4.	Sprungantwort von I-Strecken	77
1.3.	Zusammenfassung	24	2.5.2.	Kennwertermittlung aus dem Fre- quenzgang	79
2.	Lineare Systeme	25	2.5.2.1.	Meßvorgang	79
2.1.	Allgemeine Arbeitsverfahren zur mathematischen Beschreibung des linearen Übertragungsverhaltens	26	2.5.2.2.	Auswertung der Frequenzkennlinie	80
2.1.1.	Statische Beschreibung	26	2.5.3.	Kennwerte üblicher Regelstrecken	80
2.1.2.	Dynamische Beschreibung	27	2.6.	Einschleifiger Regelkreis	82
2.1.2.1.	Zeitbereich	28			
2.1.2.2.	Frequenzbereich	32			
2.2.	Mathematische Beschreibung des Übertragungsverhaltens offener Systeme	37			

2.6.1.	Gleichung des einschleifigen Regelkreises	83	3.	Nichtlineare Systeme	108
2.6.2.	Statische Beschreibung	84	3.1.	Beschreibungsfunktion	110
2.6.2.1.	P-Strecke und P-Regleinrichtung	84	3.2.	Zustands- oder Phasenebene	112
2.6.2.2.	P-Strecke und I-Regleinrichtung	85	3.3.	Zweipunktregelung	114
2.6.2.3.	I-Strecke und P-Regleinrichtung	86	3.3.1.	Zweipunktregler an I-Strecken	114
2.6.2.4.	I-Strecke und I-Regleinrichtung	87	3.3.2.	Zweipunktregler an P-Strecken	115
2.6.3.	Dynamische Beschreibung	87	3.4.	Dreipunktregelung	118
2.6.3.1.	Störverhalten des Regelkreises	88	4.	Getastete Regelung	119
2.6.3.2.	Führungsverhalten des Regelkreises	88	4.1.	z-Transformation	120
2.6.3.3.	Stabilität	91	4.2.	Einstellregeln für Regler mit Impulsausgang	125
2.6.4.	Arbeitsverfahren zur Stabilitätsprüfung	92	4.2.1.	Getastete Dreipunktregelung	125
2.6.4.1.	Stabilitätskriterium an Hand der Differentialgleichung	92	4.2.2.	PI-Impulsregler	127
2.6.4.2.	Stabilitätskriterium an Hand der Frequenzgangdarstellung	94	5.	Adaptive Regelung	127
2.6.4.3.	Stabilitätskriterium an Hand der Sprungantwort	96	6.	Allgemeine Gesichtspunkte zum Entwerfen von Regelungsanlagen	128
2.6.5.	Arbeitsverfahren zur Einstellung von Reglern	97	6.1.	Entwurfsbedingungen	128
2.6.5.1.	Einstellregeln nach ZIEGLER und NICHOLS	97	6.2.	Gerätesystem	129
2.6.5.2.	Einstellregeln nach CHIEN, HRONES, RESWICK	99	6.2.1.	Einrichtungen zur Informationsgewinnung	129
2.6.5.3.	Einstellregeln nach SAMAL	99	6.2.2.	Einrichtungen zur Informationsverarbeitung	130
2.7.	Vermaschte Regelkreise	100	6.2.3.	Einrichtungen zur Informationsnutzung	130
2.7.1.	Kaskadenregelung	101	6.3.	Entwurfsalgorithmus	131
2.7.2.	Störgrößenaufschaltung	105	6.4.	Entwurfsbeispiel	136
2.8.	Mehrgrößenregelung	107	6.4.1.	Aufgabenstellung	136
			6.4.2.	Lösung	137
				Literaturverzeichnis	142

Wichtigste Formelzeichen

Formelzeichen	Größe	Formelzeichen	Größe
A	Amplitude	g	Fallbeschleunigung
$A(\omega)$	Amplitudengang	$H(j\omega)$	Frequenzgang des geschlossenen Systems
A	Fläche	$h(t)$	Übergangsfunktion
A	halbe Schwingungsbreite	h	Höhe
u	halber Unempfindlichkeitsbereich eines Dreipunktglieds	I	Impulsinhalt
a	Hebellänge, Weg	I_L	Läuferstrom
$a_0 \dots a_n$	Koeffizienten	Im	Imaginärteil
B	maximale Ausgangsgröße eines Dreipunktglieds	I_p	Informationsparameter
b	Hebellänge	i	Maschenstrom
$b_0 \dots b_m$	Koeffizienten	K	Übertragungskonstante (-faktor)
C	Kapazität	K_D	Übertragungskonstante des D-Anteils eines Reglers
c	Faktor, Konstante	K_I	Übertragungskonstante eines I-Glieds
c	Federkonstante	K_{IR}	Übertragungskonstante eines I-Reglers
c	mittlere spezifische Wärmekapazität	K_{IS}	Übertragungskonstante einer I-Strecke
D	Dämpfungsgrad	K_R	Reglerübertragungskonstante
D	Durchmesser	K_S	Übertragungskonstante einer P-Strecke
d	Dämpfungskonstante	K_0	Kreisverstärkung
$F(j\omega)$	Frequenzgang	L	Induktivität
$F(p)$	Übertragungsfunktion	$\mathcal{L}\{x\}$	LAPLACE-Transformierte
f	Frequenz	l	Länge

Formel- zeichen	Größe	Formel- zeichen	Größe
M	Moment	X_B	bleibende Regelabweichung
m	Masse	X_d	Schaltdifferenz
m_n	Exponent, Index	X_e	Eingangssignal
N	Beschreibungsfunktion	X_H	Hilfsregelgröße
n	Anzahl	X_h	Aussteuerbereich, Laufbereich
n	Exponent, Index	X_M	maximale Regelabweichung
n	Drehzahl	X_P	Proportionalbereich
p	Druck	X_S	Sollwert der Regelgröße
p	LAPLACE-Operator	X_U	Unempfindlichkeitsbereich eines
p	Wurzelwert		stetigen Reglers
R	Regelfaktor	X_U	Überschwingweite
R	Widerstand	x	Abweichung von X
Re	Realteil	x_a	Abweichung von X_a
R_L	Läuferkreiswiderstand	x_e	Abweichung von X_e
S	Schrittweite	x_H	Abweichung von X_H
T	Zeitkonstante	x_S	Abweichung von X_S
T	Periodendauer	x_w	Regelabweichung
T_a	Ausgleichszeit	Y	Stellgröße
T_{an}	Anregelzeit	Y_h	Stellbereich
T_{aus}	Ausregelzeit	Y_R	Stellgröße des Reglers
T_D	Differentialzeit	Y_S	Stellstrom der Regelstrecke
T_d	Tastdauer	y	Abweichung von Y
T_N	Nachstellzeit	y_R	Abweichung von Y_R
T_R	Reglerzeitkonstante	y_S	Abweichung von Y_S
T_S	Streckenzeitkonstante	Z	Störgröße
T_u	Verzugszeit	z	Abweichung von Z
T_V	Vorhaltzeit	z	z -Operator
T_t	Totzeit	z	z -Transformation
T_{tE}	Ersatztotzeit	α	Phasenwinkel
T_y	Stellzeit	α	Wärmeübergangszahl
T_0	Tastperiode	$\alpha(\omega)$	Phasengang
U	Spannung	Δ	Differenz
$u(\omega)$	Realteil eines Frequenzgangs	$\delta(t)$	DIRAC-Impuls
V	Volumen	ϑ	Temperatur
$\dot{V}$	Durchfluß	μ	Exponent, Index
v	Geschwindigkeit	ν	Exponent, Index
$v(\omega)$	Imaginärteil eines Frequenzgangs	ϱ	Dichte
W	Führungsgröße	ϱ	Faktor
W	Strömungswiderstand	σ	Realteil des LAPLACE-Operators p
W	Wurzelwert	Φ	Erregerfluß
$\dot{W}$	Wärmestrom	φ	Winkel
w	Abweichung von der Führungsgröße	$\dot{\varphi}$	Winkelgeschwindigkeit
X	Regelgröße	ω	Kreisfrequenz
X_a	Ausgangsgröße		

1. Einführung

In dem vorliegenden Abschnitt werden zunächst die Wirkungsprinzipien der Steuerungs- und der Regelungstechnik gegenübergestellt. Daran schließen sich an die mathematischen Behandlungen der Übertragungseigenschaften der Funktionsglieder der Regelungstechnik sowie die Arbeitsverfahren zur Stabilitätsprüfung und Optimierung von linearen, von nichtlinearen und von getasteten Regelungen. Dabei wird ein besonderer Wert auf Praxisnähe und Anschaulichkeit gelegt. Eine Vielzahl von Beispielen erleichtern das Studium der einzelnen Stoffgebiete und erschließen ein breites Anwendungsfeld. Auf weiterführende Literatur wird im Text hingewiesen.

1.1. Steuerungs- und Regelungstechnik

Beim Steuern und Regeln handelt es sich um technische Vorgänge in abgegrenzten technologischen Systemen, in denen physikalische oder technische Größen in beabsichtigter Weise auf Grund der inneren Gesetzmäßigkeiten der beteiligten Geräte und Anlagen beeinflusst werden. Es gibt jedoch zwischen beiden hinsichtlich ihres Wirkungsablaufs Unterschiede, die in folgenden Betrachtungen zu erläutern sind.

1.1.1. Steuern

In [22] ist das Steuern wie folgt definiert: »Das Steuern — die Steuerung — ist ein solcher Vorgang in einem abgegrenzten System, bei dem eine oder mehrere Größen als Eingangsgrößen andere Größen als Ausgangsgrößen auf Grund der dem abgegrenzten System eigenen Gesetzmäßigkeit beeinflussen. Charakteristisch für das Steuern ist, daß der Wirkungsweg der Steuerung nicht im Sinne einer Regelung fortlaufend geschlossen ist.« Anhand einiger Beispiele sollen die in dieser Definition verwendeten Begriffe erläutert werden.

Beispiel 1:

Durch Betätigung eines Spannungsteilers läßt sich eine gewünschte Teilspannung einstellen.

Eingangsgröße: Potentiometerstellung

Ausgangsgröße: Spannung

Wirkungsablauf: offen, denn die Teilspannung wirkt nicht auf die Potentiometerstellung zurück.

Beispiel 2:

In Abhängigkeit von der Tageshelligkeit wird mit Hilfe technischer Einrichtungen die Straßenbeleuchtung eingeschaltet.

Eingangsgröße: Lichtstärke (Tageshelligkeit)

Ausgangsgröße: Lichtstärke (Lampen)

Wirkungsablauf: offen, denn die Straßenbeleuchtung wirkt sich nicht auf die Tageshelligkeit aus.

In den Beispielen 1 und 2 sind die Gesetzmäßigkeiten, nach denen die Vorgänge ablaufen, leicht festzustellen. Im Bereich der industriellen Steuerungen hat man es aber zumeist mit mehreren Ein- und Ausgangsgrößen zu tun.

Zur Erläuterung weiterer Begriffe, die zwar nicht in der Definition vorkommen, aber zur praktischen Beurteilung einer Steuerung wichtig sind, sei noch ein ausführliches Beispiel besprochen.

Beispiel 3: Steuerung der Raumtemperatur

Es ist die Warmluftzufuhr $\dot{V}$ (Bild 1) so in Abhängigkeit von der Außentemperatur ϑ_A einzustellen, daß die Raumtemperatur ϑ_R konstant bleibt. Zu diesem Zweck liest eine Bedienungsperson 2 am Thermometer 1 den Wert der Außentemperatur ab und stellt an Hand der unter dem Hebel der Drosselklappe 4 angebrachten Skale die Warmluftzufuhr 3 ein. Die Gesetzmäßigkeit, nach der die Einstellung erfolgt, geht aus der Kennlinie 7 (linearisiert) hervor. Das Ergebnis dieser Steuerung, nämlich der Wert der Raumtemperatur, wird nicht gemessen, so daß keine Rückwirkung auf die Warmluftzufuhr möglich ist, und demzufolge ein offener Wirkungsweg vorliegt. Vom Technisierungsgrad her handelt es sich um eine *Handtierung*, weil der Mensch mit seiner Muskelkraft die Drosselklappe betätigt. Außerdem spricht man von einer Handsteuerung, da der Mensch im Wirkungsablauf mit enthalten ist.

Bei dieser Steuerungsaufgabe existiert eine strenge Zuordnung zwischen der Eingangsgröße ϑ_A und der Zwischengröße $\dot{V}$, deren Realisierung man auch einer technischen Einrichtung übertragen kann, die die Funktion $\dot{V} = f(\vartheta_A)$ erfüllt. Wird zur Verstellung der Drosselklappe ein Elektromotor eingesetzt, also elektrische Hilfsenergie verwendet, dann liegt es nahe, zur Messung der Außentemperatur ein elektrisches Temperaturmeßverfahren auszuwählen. Im Bild 2 ist eine selbsttätige Steuerung, kurz *Steuerung* genannt, der Raumtemperatur dar-

gestellt. Die Aufgaben des Messens der Außentemperatur ϑ_A und das Stellen der Warmluftzufuhr $\dot{V}$ mit Hilfe der Drosselklappe übernehmen nunmehr das Thermoelement 1, der Verstärker 2 und der Motor 3. Der Mensch ist nicht mehr am Wirkungsablauf beteiligt, so daß für diese Steuerung der Technisierungsgrad *Automatisierung* zutrifft, und außerdem ist der Wirkungsweg 8, wie zum Bild 1 bereits erläutert, offen.

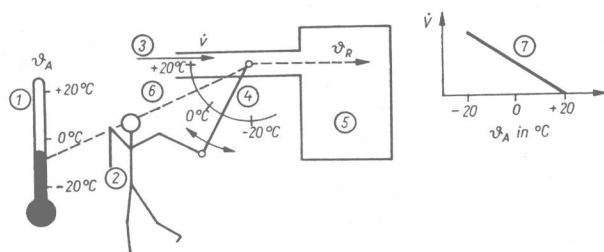


Bild 1. Handsteuerung einer Raumtemperatur

1 Außentemperaturthermometer; 2 Bedienungsperson; 3 Warmluftstrom; 4 Drosselklappe; 5 Raum; 6 offener Wirkungsablauf; 7 Kennlinie $\dot{V} = f(\vartheta_A)$

Mit Hilfe einer solchen Steuerung wäre ein Konstanthalten der Raumtemperatur ϑ_R nur unter Einhaltung aller anderen technologischen Bedingungen, wie eines gleichbleibenden Warmluftdrucks, einer konstanten Warmlufttemperatur, einer gleichen technologischen Belastung des Raumes und eines stets gleichen Fremdlufteinflusses (Fenster, Türen), zu erreichen. In der Praxis trifft dieses jedoch nicht zu. Die Änderungen der Parameter der genannten Größen bewirken, daß sich die Raumtemperatur entweder über oder unter dem gewünschten Wert einstellt. Ein Absinken der Raumtemperatur wird z. B. von einer Verminderung des Warmluftdrucks hervorgerufen, da bei gleicher Drosselklappenstellung weniger

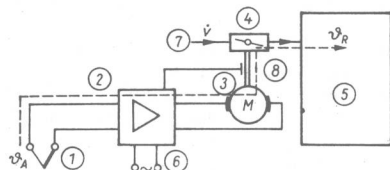


Bild 2. Steuerung der Raumtemperatur

1 Thermoelement; 2 Verstärker; 3 Motor; 4 Drosselklappe; 5 Raum; 6 Hilfsenergie; 7 Warmluftstrom; 8 offener Wirkungsweg

Warmluft in den Raum gelangen kann. So ist es möglich, den Einfluß aller Betriebsparameter auf die gesteuerte Größe zu untersuchen. Die Einhaltung der inneren Gesetzmäßigkeit der Steuerung wird also durch solche Betriebszustandsänderungen gestört, weshalb man auch die genannten Größen als *Störgrößen* und ihre Abweichungen von den projektierten Werten mit *Störsignalen* bezeichnet.

1.1.2. Regeln

Aus [22] entnimmt man folgende Definition:

»Das Regeln — die Regelung — ist ein technischer Vorgang in einem abgegrenzten System, bei dem eine technische oder physikalische Größe — die zu regelnde Größe (Regelgröße) — fortlaufend erfaßt und durch Vergleich ihres Signals mit dem Signal einer anderen Größe (Führungsgröße) im Sinne einer Angleichung an deren Signal beeinflußt wird.

Der hierzu notwendige Wirkungsablauf vollzieht sich in einem geschlossenen Kreis, dem Regelkreis. Innerhalb des Regelkreises wird stets gemessen, verglichen und gestellt.»

Beispiel 4: Regelung der Raumtemperatur

Besteht die Aufgabe, die Raumtemperatur unabhängig von der Außentemperatur und den anderen Einflußgrößen konstant zu halten, dann kann dieses Ziel mit einer Steuerung nicht erreicht werden. Das gelingt nur mit Hilfe einer Regelung, die in der Lage ist, den Einfluß der Störgrößen zu kompensieren. Im Bild 3 ist die Regelgröße die Raumtemperatur, die mit dem Thermoelement 5 gemessen und in eine Thermospannung U_{Th} umgewandelt wird. Das Spannungsmessgerät verfügt über eine CELSIUS-Skala, so daß man den Istwert der Temperatur ablesen kann. Da die Temperatur durch einen analogen Spannungswert dargestellt ist, erfolgt auch der Vergleich des Istwerts mit dem Wert der Führungsgröße, dem Sollwert, im Spannungsbereich. Bekanntlich lassen sich Gleichspannungen in einfacher Weise addieren bzw. sub-

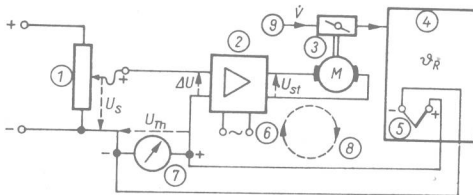


Bild 3. Regelung der Raumtemperatur

1 Potentiometer zur Sollwerteinstellung U_S ; 2, 6 Verstärker mit elektrischer Hilfsenergie; 3 Motor mit Drosselklappe; 4 Raum; 5 Thermoelement; 7 Spannungsmessgerät zur Istwertanzeige; 8 geschlossener Wirkungsablauf; 9 Warmluftstrom

trahieren, bei Temperaturen geht das nicht. Der Sollwert U_S wird am Spannungsteiler 1 eingestellt. Die Differenzspannung $\Delta U = U_{Th} - U_S$ ist die als Spannung dargestellte Differenz zwischen dem Istwert und dem Sollwert der Regelgröße, die sog. *Regelabweichung*, sie liegt in der Größenordnung von mV und reicht natürlich nicht aus, um einen Antriebsmotor auszusteuern. ΔU muß demzufolge zunächst in dem Verstärker 2 verstärkt werden. Die *Stelleinrichtung* 3 beeinflusst die *Stellgröße* (Warmluftstrom) $\dot{V}$ im Sinne einer Angleichung des Istwerts U_{Th} an den Sollwert U_S . Ist $\Delta U < 0$, d. h. $U_{Th} < U_S$, dann wird die Stellgröße $\dot{V}$ erhöht, damit die Raumtemperatur ansteigen kann. Bei $\Delta U = 0$ bleibt der Antriebsmotor auf der Stelle stehen, die er im selben Moment eingenommen hat. $\dot{V}$ hat dann einen Wert, der die Isttemperatur auf die Solltemperatur einstellt. Tritt ein Störsignal in Form einer Druckerhöhung im Warmluftstrom auf (z. B. infolge der Abschaltung eines anderen Verbrauchers vom Warmluftnetz), dann strömt bei zunächst gleicher Drosselklappenstellung mehr Warmluft in den Raum, und die Temperatur erhöht sich. Demzufolge werden U_{Th} größer, $\Delta U > 0$ und die Drosselklappe soweit geschlossen, bis die Regelabweichung wieder verschwunden ist. In diesem geschlossenen Wirkungskreis wird also stets gemessen, verglichen und gestellt, so daß jede Auswirkung einer Störung auf die Regelgröße kompensiert wird. Zu diesen Störungen gehört natürlich auch die Außentemperatur. Der Regelvorgang läuft automatisch ab, d. h. selbsttätig, in diesem Falle spricht man von einer *Regelung*. Liest aber eine Bedienungsperson den Istwert am Meßinstrument 7 ab, vergleicht diesen mit dem vorgegebenen Sollwert und stellt je nach Vorzeichen und Betrag der Regelabweichung mit der Drosselklappe den Warmluftstrom $\dot{V}$ von Hand, dann liegt eine *Handregelung* vor.

Beispiel 5: Füllstandsregelung

Besteht die Aufgabe, den Wasserspiegel in einem Behälter, aus dem in der Zeiteinheit unterschiedliche Wassermengen entnommen werden, auf einen bestimmten Wert konstant zu halten, so ist die Regelgröße der Füllstand, die Stellgröße der Zufluß zum Behälter und das Störsignal die Abweichung von einem durchschnittlichen Entnahmewert. Der Istwert der Regelgröße wird also ständig gemessen, mit dem Sollwert verglichen und der Zufluß nach Maßgabe der auftretenden Regelabweichung gestellt.

1.1.3. Darstellung von Steuerungen und Regelungen im Signalflußplan

1.1.3.1. Übertragungsglied

Das Gemeinsame der Steuerungen ist der offene, das der Regelungen der geschlossene Wirkungsablauf. Zur Untersuchung von Steuerungen und Regelungen ist es zweckmäßig, von der konkreten gerätetechnischen Ausführung zu abstrahieren und nur die für die Analyse und Synthese erforderlichen Eigenschaften darzustellen. Ein abgrenzbares Gerät oder ein abgrenzbarer Teil einer technologischen Anlage werden dabei lediglich durch einen Block (Bild 4) symbolisiert.

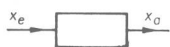


Bild 4. Übertragungsglied

x_e und x_a sind Signale und keine Energie- oder Massenströme. Ein *Signal* ist eine von einer physikalischen Größe getragene Zeitfunktion, deren Parameter, der sogenannte *Informationsparameter* (I_p), den Wertverlauf einer technischen oder physikalischen Größe abbildet. In Steuer- und Regeleinrichtungen treten häufig der Strom, der Druck und die Spannung als *Signalträger* auf, die zugleich die Dimensionen des Signals bestimmen. Die Signale teilt man nach dem Verhalten des I_p ein (Bilder 5 und 6):

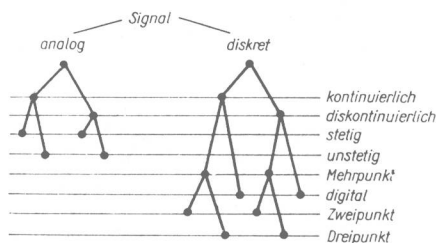


Bild 5. Einteilung der Signale

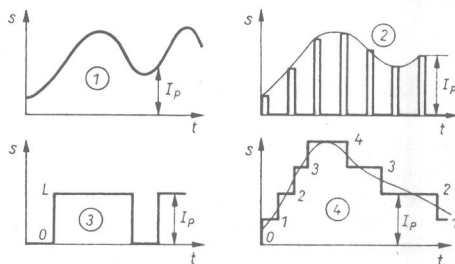


Bild 6. Beispiele von analogen und diskreten Signalen

1 analog, kontinuierlich, stetig;
2 analog, diskontinuierlich, unstetig;
3 diskret, kontinuierlich, Zweipunktsignal (binär); 4 diskret, kontinuierlich, digital

Analoge Signale: Der I_p kann innerhalb gewisser Grenzen jeden beliebigen Wert annehmen, z. B. die Ventilstellung zwischen den Stellungen »Auf« und »Zu«.

Diskrete Signale: Der I_p kann nur endlich viele Werte annehmen und ist quantisiert, z. B. schaltet ein Schütz einen Motor ein oder wieder aus. Hat der I_p nur zwei Werte, dann handelt es sich um ein *binäres* Signal.

Kontinuierliche Signale: Der I_p kann sich in jedem beliebigen Zeitpunkt ändern.

Diskontinuierliche Signale: Der I_p kann sich nur in festgelegten Zeitpunkten ändern, z. B. Fallbügelpunktschreiber zur Temperaturmessung.

Stetige Signale: Die Zeitfunktion $f(t)$ ist stetig.

Unstetige Signale: Die Zeitfunktion $f(t)$ ist unstetig, d. h., die Kurve springt von einem Wert auf einen anderen.

Digitale Signale: Die diskreten Werte des I_p entsprechen Wörtern eines vereinbarten Alphabets, z. B. das ganzzahlige Vielfache der Einheit Volt beim digitalen Spannungsmessgerät.

Mehrpunktsignale: Dazu gehören alle diskreten nichtdigitalen Signale.

Zweipunktsignale: Der I_p kann nur 2 Werte annehmen.

Dreipunktsignale: Der I_p kann nur 3 Werte annehmen.

In Bild 4 wird in das Kästchen das Übergangsverhalten in Form einer Kennlinie oder als Ausdruck (Differentialgleichung, Übertragungsfunktion) eingetragen.

Beispiel 6: Raum (Bild 7)

Eingangssignal: Werteverlauf des Warmluftstroms

Ausgangssignal: Werteverlauf der Raumtemperatur

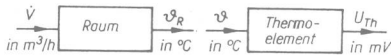


Bild 7. Beispiele für Übertragungsglieder

Beispiel 7: Thermoelement (Bild 7)

Eingangssignal: Werteverlauf der zu messenden Temperatur

Ausgangssignal: Werteverlauf der Thermospannung

1.1.3.2. Signalfußplan einer Steuerung

Im allgemeinen besteht eine Steuerung aus mehreren hintereinandergeschalteten Übertragungsgliedern (s. 1.1.1., Beispiel 3). Den Signalfußplan der Steuerung der Raumtemperatur (Bild 2) zeigt Bild 8. Aus diesem geht hervor, daß eine Steuerung im allgemeinen aus der *Steuereinrichtung* und der *Steuerstrecke* besteht. Dabei soll unter einer *Steuereinrichtung* die Gesamtheit aller Glieder (Geräte) verstanden werden, die die Steuerung einer oder mehrerer Größen in der *Steuerstrecke* bewirkt. Die *Steuerstrecke* ist derjenige Teil einer technologischen Anlage, in dem die *Steuereinrichtung* eine oder mehrere Größen, die *gesteuerten Größen*, beeinflusst.

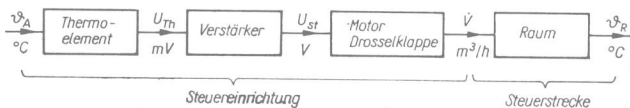


Bild 8. Signalfußplan der Raumtemperatursteuerung

Je nach der Aufgabenstellung unterscheidet man

- die *Führungssteuerung*, auch *Folgesteuerung* genannt, bei der die gesteuerten Größen durch die Führungsgrößen eindeutig bestimmt werden (s. 1.1.1., Beispiele 1 und 2),
- die *Zeitplansteuerung*, die mit Hilfe eines in einem Zeitplangeber gespeicherten Zeitplans die gesteuerte Größe eindeutig bestimmt, und
- die *Ablaufsteuerung*, bei der die gesteuerte Größe nur von den Zuständen bestimmter Größen selbst und einem von der Technologie vorgegebenen Programm abhängig ist.

1.1.3.3. Signallaßplan einer Regelung

Im Bild 9 ist der Signallaßplan der Raumtemperaturregelung dargestellt. In ihm werden nur die Änderungen vom Betriebszustand eingetragen. Erhöht sich beispielsweise der Druck (Störung) des Warmluftstroms, dann gelangt bei gleicher Drosselklappenstellung mehr Warmluft in den Raum, die Raumtemperatur steigt, ΔU wird > 0 , und der Verstärker stellt eine solche Steuerspannung U_{st} bereit, daß der Motor die Drosselklappe schließen kann. Die Regelungsinrichtung kompensiert also die infolge der Störung aufgetretene Erhöhung des Warmluftstroms.

Verallgemeinert man den beschriebenen Regelvorgang, so ist festzustellen, daß das Signal nur in einer Richtung den Regelkreis durchläuft, die im Regelkreis vorhandenen Regelglieder gerichtete Glieder sind, die das Signal nur in einer Richtung weiterleiten, und sich der Wirkungssinn infolge eines gegebenen Störanstoßes umkehrt und am Ausgangspunkt mit negativem Vorzeichen ankommt. Außerdem haben die Geräte stets betriebsbereit zu sein.

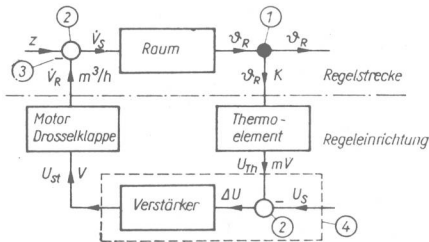


Bild 9. Signallaßplan der Raumtemperaturregelung
1 Signalverzweigung;
2 Signaladdition;
3 Vorzeichenumkehr; 4 Regler

Natürlich spielt sich ein solcher Regelvorgang nicht problemlos ab. Es ist z. B. leicht vorstellbar, daß der Motor die Drosselklappe bei entsprechender Drehzahl in wenigen Sekunden schließt, bevor sich ein Eingriff in den Warmluftstrom auswirkt, ein Vorgang, der je nach Raumgröße (Speicherwirkung) mehrere Minuten in Anspruch nehmen kann. Der Raum würde sich zu sehr abkühlen, ΔU einen Wert < 0 annehmen und der Motor wiederum in wenigen Sekunden die Drosselklappe völlig öffnen. Die Folge wäre mal ein überheizter, mal ein unterkühlter Raum. Die Raumtemperatur würde um den Sollwert herum erheblich schwanken, d. h., der Regelvorgang würde keinen Beharrungszustand erreichen und wäre instabil. Es treten also in den Geräten und im Raum Signalverzögerungen auf, die richtig aufeinander abzustimmen sind, wenn der Regelkreis stabil arbeiten soll. Nur eine stabile Regelung ist für den praktischen Einsatz geeignet. Mit den Fragen der Art der Signalübertragung, der richtigen Anpassung der für die Regelung erforderlichen Geräte an die technologische Anlage und der Stabilität befaßt sich die *Regelungstheorie*, deren Darstellung in den weiteren Betrachtungen einen großen Raum einnehmen wird.

Ähnlich wie bei den Steuerungen teilt man auch den Regelkreis in zwei Bereiche ein, und zwar in die *Regelstrecke* und die *Regeleinrichtung*.

Die *Regelstrecke* ist derjenige Teil einer technologischen Anlage, in dem eine technische oder physikalische Größe geregelt werden soll. Sie wird begrenzt durch den Stellort und den Meßort. Die *Regeleinrichtung* ist die Gesamtheit aller Bauglieder, die die Regelung in der Regelstrecke bewirkt. Sie ist ebenfalls abgrenzbar zwischen dem Meßort und dem Stellort, wobei an dieser Stelle sogleich vereinbart werden soll, daß zur Regeleinrichtung auch das vom Regelungs-techniker zu projektierende Stellglied gehört. Jeder Regelkreis besteht also aus der Regelstrecke und der Regeleinrichtung, so daß man den allgemeinen Signallaßplan einer Regelung (Bild 10) angeben kann. Es bedeuten:

- x — Regelgröße, das ist die zu regelnde Größe (z. B. Temperatur, Druck, Drehzahl usw.) und daher Ausgangsgröße der Regelstrecke und somit Eingangsgröße der Regeleinrichtung. Der Istwert der Regelgröße wird ebenfalls mit x gekennzeichnet.

- w — Führungsgröße als diejenige Größe, der die Regelgröße anzugleichen ist. Der Sollwert der Führungsgröße hat das Symbol X_S (z. B. 280°C eines Ofens, 10 MPa eines Reaktors, 1200 min^{-1} eines Antriebes usw.).
- y_R — Stellgröße, das ist die Ausgangsgröße der Regeleinrichtung, sie wirkt der Störgröße entgegen.
- y_S — Stellstrom, er ist die Eingangsgröße der Regelstrecke (z. B. Gas- oder Flüssigkeitsstrom oder Stromstärke eines elektrischen Netzwerks).
- z — Störgröße, die in unbeabsichtigter Weise in die Regelstrecke (z_S) oder in die Regeleinrichtung (z_R) eingreift und eine Abweichung des Istwerts der Regelgröße vom Sollwert hervorruft. Störgrößen machen eine Regelung erst erforderlich, ansonsten käme man mit einer Steuerung aus.

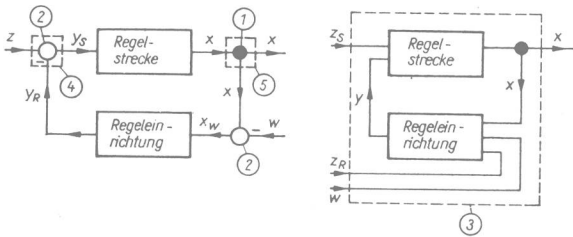


Bild 10. Darstellungsformen des allgemeinen Signalfußplans einer Regelung
1 Signalverzweigung; 2 Signaladdition; 3 System Regelkreis; 4 Stellort; 5 Meßort

x_w — Regelabweichung, sie ist die Differenz zwischen dem Istwert x und dem Wert der Führungsgröße w bzw. bei Festwertregelungen dem Sollwert x_S . Sie wird meistens durch Weg-, Kraft-, Spannungs- oder Stromvergleich gebildet.

Signalverzweigung: Darunter versteht man einen Punkt im Signalfußweg, an dem ein Signal für unterschiedliche Zwecke mehrfach entnommen wird. Das Eingangssignal stimmt mit den Ausgangssignalen überein.

Signaladdition: Das ist ein Punkt im Signalfußweg, an dem mehrere Eingangssignale zu einem Ausgangssignal vorzeichenbehaftet addiert werden. Aus Bild 10 entnimmt man für die Regelabweichung

$$x_w = x - w$$

und für die Eingangsgröße der Regelstrecke

$$y_S = z - y_R$$

Wie bereits erwähnt wurde, werden in den Signalfußplan nur die Änderungen vom Betriebszustand eingetragen, und zwar mit kleinen Buchstaben. Den Betriebszustand selbst stellt man mit großen Buchstaben dar. Anhand der statischen Kennlinie einer Regelstrecke (Bild 11) sind die Zusammenhänge verdeutlicht.

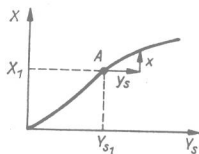


Bild 11. Statische Kennlinie einer Regelstrecke
A Arbeitspunkt

1.2. Benennungen von Regelungen

In der Praxis haben sich eine Reihe von Bezeichnungen für Regelungen herausgebildet, je nachdem, ob die gerätetechnische Ausführung, die Regelungsaufgabe oder die Signalverarbeitung im Vordergrund der Betrachtung steht. So fordert der Betreiber einer technologischen Anlage beispielsweise Druck- und Temperaturregelungen, d. h., er benennt sie nach der Regelgröße, und der Regelungstechniker entscheidet über die gerätetechnische Ausführung, darüber also, ob er zum Betreiben der Regeleinrichtung eine Hilfsenergie benötigt, ob eine analoge oder digitale Signalverarbeitung stattfindet usw. Es treffen demzufolge auf eine ausgeführte Regelung mehrere Benennungsgesichtspunkte gleichzeitig zu.

1.2.1. Hilfsenergie

Reicht die vom Meßwerk abgegebene Energie aus, das Stellorgan zu betätigen, dann braucht der Regeleinrichtung von außen keine Hilfsenergie zugeführt zu werden. Ist dieses nicht der Fall, so wird die Regeleinrichtung entweder mit elektrischer oder mit pneumatischer oder mit hydraulischer Hilfsenergie betrieben. Es kann auch vorkommen, daß man in einer Regeleinrichtung zwei Hilfsenergiearten antrifft.

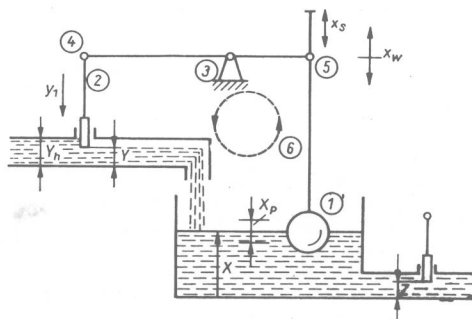


Bild 12. Flüssigkeitsstandregelung

1 Schwimmermeßeinrichtung; 2 Gestänge; 3 Stützpunkt; 4, 5 Gelenk; 6 Wirkungsrichtung, X Istwert des Füllstands, X_p Proportionalbereich, Y Stellgröße, Y_h Stellbereich, Z Störgröße

1.2.1.1. Regelungen ohne Hilfsenergie

Beispiel 8: Füllstandsregelung

Der Füllstand eines Behälters (Bild 12) soll auf einen vorgegebenen Wert gehalten werden. Dieser Sollwert wird durch die Länge des Schwimmergestänges, die am Gelenk 5 einstellbar ist, realisiert. Die Störgröße Z ist der Abfluß und die Stellgröße Y der Zufluß. Sinkt die Entnahme Z aus dem Behälter, dann steigt der Füllstand nicht weiter an. Dieser Zustand ist erreicht, wenn der Zufluß Y dem Abfluß Z entspricht. Die Meßenergie des Schwimmers reicht also aus, um den Schieber in der Zuflußleitung zu verstellen.

Beispiel 9: Drehzahlregelung

Die Drehzahl X (Bild 13) der Dampfturbine ist konstant zu halten. Als Meßeinrichtung dient das vom Getriebe 2 angetriebene Fliehkraftpendel 1, dessen Hubänderung x_1 proportional der Drehzahländerung x ist. Sobald die Drehzahl infolge einer stärkeren Belastung der Dampfturbine sinkt, bewegt sich die Muffe

vom Fliehkraftpendel nach unten und öffnet das Ventil 5, so daß ein stärkerer Dampfstrom in die Dampfturbine gelangt und ein weiteres Absinken der Drehzahl verhindert wird (Kennlinien s. Bild 13). In dieser Anordnung bringt die Meßeinrichtung in Form der Fliehkraft die Stellenergie für das Ventil auf.

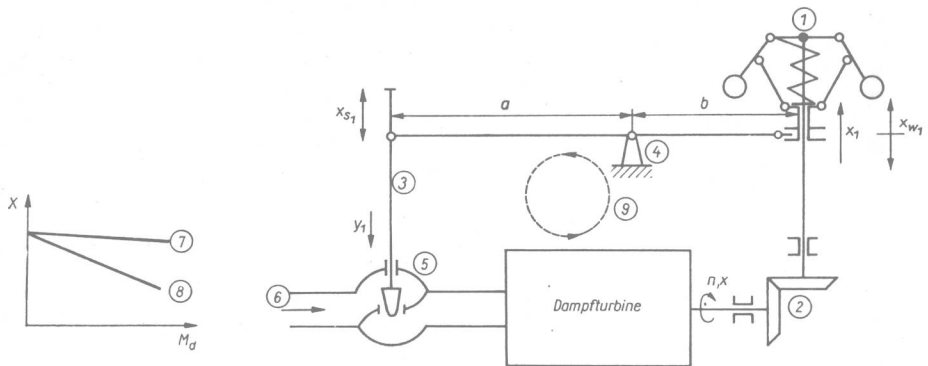


Bild 13. Drehzahlregelung

1 Fliehkraftpendel; 2 Getriebe; 3 Gestänge; 4 Stützpunkt; 5 Ventil; 6 Dampfzufuß; 7 mit Regeleinrichtung; 8 ohne Regeleinrichtung; 9 Wirkungsrichtung, n, X Drehzahl, x_1 Hubänderung, y_1 Ventilhubänderung, M_d Belastung

1.2.1.2. Regelungen mit Hilfsenergie

Beispiel 10: Druckregelung mit pneumatischer Hilfsenergie

In einem Rohrleitungssystem (Bild 14) ist der Druck durch Eingriff in den abströmenden Gasstrom zu regeln. Im ungestörten Zustand sind die Druckkraft X_1 (Istwert) und die Federkraft X_{s1} (Sollwert) gleich groß, und in der Steuerleitung des pneumatischen Verstärkers 2, 3, 5, 6 herrscht ein Druck p_v , der über den pneumatischen Stellmotor 7 das Abströmventil so einstellt, daß keine Regelabweichung vorhanden ist. Erhöht sich infolge einer Störung der Gasstrom in der Rohrleitung, dann steigt auch der vom Plattenfedermeßwerk 1 gemessene Druck an und wird in eine erhöhte Druckkraft X_1 umgewandelt (Meßwandler). Die Differenz $X_1 - X_{s1}$ drückt die Sollwertfeder zusammen und verringert somit den Düse-Prallplattenabstand. Der p_v steigt an und bewirkt über den Stellmotor 7 ein Öffnen des Ventils, so daß mehr Gas abströmen kann. Der Einsatz der Druckluft 6 als Hilfsenergie ist erforderlich, wenn die Druckkraft X_1 nicht ausreicht, die Reibungs- und Druckkräfte am Ventil zu überwinden.

Wie dieses Beispiel, allerdings unabhängig von der Hilfsenergie, zeigt, stimmen bei Regelungen die Signalflußrichtung 8 und die Massenflußrichtung 9 nicht immer überein.

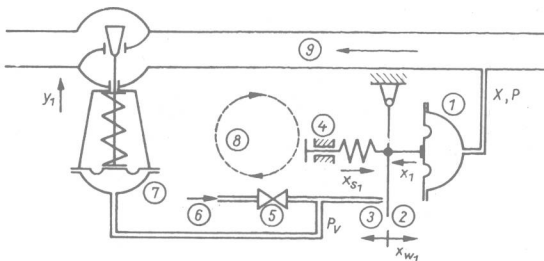


Bild 14. Pneumatische Druckregelung

1 Plattenfedermeßwerk; 2 Prallplatte; 3 Düse; 4 Sollwerteinsteller; 5 Festdrossel; 6 Druckluft; 7 pneumatisches Stellventil; 8 Wirkungsrichtung; 9 Massenflußrichtung; p_v Druck; X Regelgröße

Beispiel 11: Drehzahlregelung mit hydraulischer Hilfsenergie

Reicht die Kraft des Fliehkraftpendels (Bild 13) nicht aus, das Dampfventil 5 zu betätigen, dann muß ein Verstärker zwischen die Meßeinrichtung 1 und das Stellglied 5 geschaltet werden. Bild 15 zeigt eine Drehzahlregelung mit einem hydraulischen Verstärker 4, 5, 6. Als Hilfsenergie dient Drucköl, das von der Pumpe 6 gefördert wird. Die Drehzahl hat ihren Sollwert erreicht, wenn die Steuerkolben 5 die Steuerleitungen S_1 und S_2 verschließen, und der Stellkolben 4 sich infolge Druckausgleichs in der oberen und unteren Kammer nicht bewegt. Sinkt nun infolge einer höheren Belastung der Dampfmaschine die Drehzahl, dann bewegt die Muffe 1 den Hebel 7 nach unten (skizzierte Stellung), und das Drucköl gelangt durch die Steuerleitung S_2 in die untere Kammer des Stellzylinders, so daß infolge des größeren Drucks der Stellkolben 4 nach oben bewegt wird, und das Dampfventil öffnet. Das Öl der oberen Kammer des Stellzylinders fließt durch die Steuerleitung S_1 in den Ölkreislauf zurück.

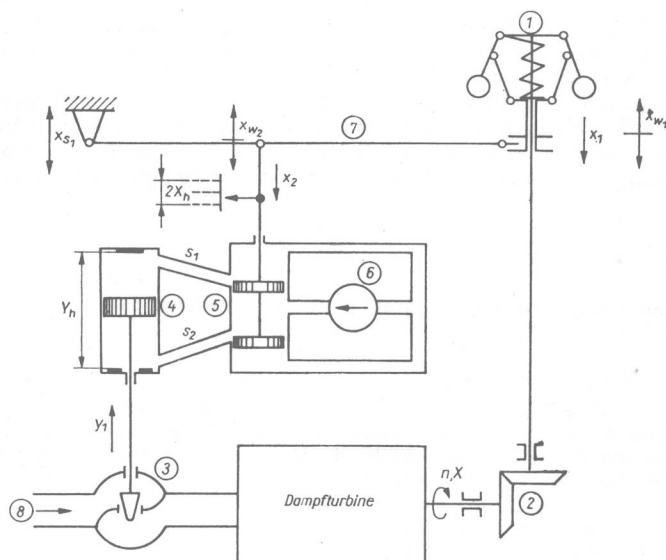


Bild 15. Hydraulische Drehzahlregelung
1 Fliehkraftpendel; 2 Getriebe; 3 Ventil; 4 Stellkolben; 5 Steuerkolben; 6 Ölpumpe;
7 Gestänge; 8 Dampfzufuß; n, X Regelgröße; x_1, x_2, y_1 Hubänderungen; $S_{1,2}$ Steuerleitungen; x_h Aussteuerbereich; y_h Stellbereich

Die Drehzahl der Dampfturbine steigt an, und über x_1 und x_2 verschließen die Steuerkolben 5 die Steuerleitungen S_1 und S_2 erneut. Der Stellkolben 4 bleibt auf einem Wert stehen, der erforderlich ist, die aufgetretene Regelabweichung wieder rückgängig zu machen. Die Verstärkerwirkung besteht darin, daß zur Betätigung der Steuerkolben nur eine geringe Energie notwendig ist, während der Stellkolben große Verstellkräfte aufbringen kann.

Beispiel 12: Temperaturregelung mit elektrischer Hilfsenergie

Im Bild 3 ist eine Temperaturregelung mit elektrischer Hilfsenergie dargestellt. Da das Thermoelement 5 nur eine Energie von ca. 10^{-12} W zur Verfügung stellt, kann damit der Motor 3 der Drosselklappe natürlich nicht angesteuert werden. Die Regelabweichung ΔU muß demzufolge erst den größeren Hilfsenergiestrom 6 aussteuern, der seinerseits auf den Motor 3 geschaltet wird. Als Verstärkerelemente verwendet man in der Praxis Transistoren und Thyristoren.